



ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ И СКЛАДКИ ВРЕМЕНИ

К. ТОРН

К. ТОРН

ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ И СКЛАДКИ ВРЕМЕНИ

Дерзкое наследие Эйнштейна

ISBN 9875-94052-144-4



9875940521448

КИП ТОРН

ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ и складки времени

Дерзкое наследие Эйнштейна

Перевод с английского под редакцией
чл.-корр. РАН *В.Б. Брагинского*



Москва
Физматлит
2007

ББК 22.632
Т 59
УДК 16.5.6

КИП С. ТОРН. Черные дыры и складки времени: Дерзкое последнее Эйнштейна. Перевод с англ. под ред. чл.-корр. РАН В.Б. Брагинского. — М.: Издательство физико-математической литературы, 2007. — 616 с. — ISBN 9875-94052-144-4.

Предлагаемая монография является популярным изложением новейших достижений в области астрофизики и гравитации, которые тесно связаны с фундаментальными предсказаниями А. Эйнштейна. Читатель найдет в книге много интересного о вкладе ученых разных стран в эту область науки, а также в близких к ней областях.

Эта книга переведена с английского на французский, немецкий, японский, китайский, польский, греческий языки. Несколько глав ее были ранее переведены на русский и опубликованы в журнале «Природа».

Книга рассчитана на широкий круг читателей, включая школьников старших классов.

© Перевод на русский язык,
Издательство физико-
математической литературы,
2007

ISBN 9875-94052-144-4

BLACK HOLES AND TIME WARPS

Einstein's Outrageous Legacy

KIP S. THORNE

THE FEYNMAN PROFESSOR OF THEORETICAL PHYSICS
CALIFORNIA INSTITUTE OF TECHNOLOGY

A volume of
THE COMMONWEALTH FUND BOOK PROGRAM
under the editorship of Lewis Thomas, M.D.

W · W · NORTON & COMPANY

New York London

Copyright © 1994 by Kip S. Thorne

All rights reserved

Printed in the United States of America

The text of this book is composed in Walbaum,
with the display set in Walbaum display.
Composition and manufacturing by the Haddon Craftsmen, Inc.
Book design by Jacques Chazaud.
Illustrations by Matthew Zimet.

Library of Congress Cataloging-in-Publication Data

Thorne, Kip S.

From black holes to time warps : Einstein's outrageous legacy / Kip S. Thorne.

p. cm.

Includes bibliographical references.

1. Physics—Philosophy. 2. Relativity (Physics) 3. Astrophysics. 4. Black holes (Astronomy)
I. Title.

QC6.T526 1993

530.1'1—dc20

93-2014

ISBN 0-393-31276-3

W. W. Norton & Company, Inc., 500 Fifth Avenue, New York, N.Y. 10110

W. W. Norton & Company Ltd., 10 Coptic Street, London WC1A 1PU

3 4 5 6 7 8 9 0

От редактора перевода

Вниманию читателей предлагается книга «Черные дыры и складки времени: дерзкое наследие Эйнштейна» (Black Holes and Time Warps: Einstein's Outrageous Legacy. — New York City: W.W. Norton Publishers, 1994), написанная профессором Калифорнийского технологического института К.С.Торном, выдающимся американским физиком-теоретиком. Ему принадлежат фундаментальные исследования в области релятивистской астрофизики и гравитации, квантовых измерений и теории гравитационных антенн. Он член Национальной академии наук США, иностранный член Российской Академии наук, а также ряда других академий, почетный доктор Московского государственного университета им. М.В.Ломоносова. Основная цель книги Торна заключается в том, чтобы в популярной форме рассказать о появлении и развитии новых идей в той области физики, которую обычно называют релятивистской гравитацией.

При написании книги оказалось, что во многих случаях эта задача может быть решена лишь в виде параллельного рассказа о том, что сделали в этой области ученые США и нашей страны. Поэтому Торн включил в нее много комментариев и живых деталей, касающихся драматической истории XX века, на фоне которой разворачивалась драма физических идей. В частности, многие ученые, оказавшие влияние на развитие гравитационной физики, являлись активными участниками американского и советского атомных и термоядерных проектов. Значительная часть этих исторических отступлений почерпнута Торном из личных контактов и специально проведенных при подготовке книги интервью со многими выдающимися физиками. Видимо, другим названием книги могло бы быть «История открытий и история их авторов».

Мне кажется, что предлагаемая книга должна заинтересовать читателей, если, конечно, они, как и автор этих строк, считают, что популяризация научных достижений и идей — один из важнейших для человечества методов борьбы с разными видами обскурантизма и астроложества.

В.Б.Брагинский,
Член-корреспондент РАН
Москва

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	9
ВВЕДЕНИЕ	
<i>О чем эта книга, и как ее читать</i>	11
ПРОЛОГ: Путешествие среди черных дыр	
<i>здесь читатель в научно-фантастической сказке впервые встречается с черными дырами и с их странными свойствами (насколько мы их понимаем в 1990 г.)</i>	15
Аид (15). Стрелец (30). Гаргантюа (33). Дом (41)	
ГЛАВА 1. Реальность пространства и времени	
<i>глава, в которой Эйнштейн разрушает абсолютное пространство и время Ньютона</i>	53
Абсолютное пространство и время Ньютона и эфир (54). Относи- тельные пространство и время Эйнштейна и абсолютная скорость света (65)	
ГЛАВА 2. Искривление пространства и времени	
<i>глава, в которой Герман Минковский объединяет пространство и время, а Эйнштейн их искривляет</i>	83
Абсолютное пространство-время Минковского (83). Закон тяготе- ния Ньютона и попытка Эйнштейна связать его с теорией отно- сительности (89). Приливные силы и кривизна пространства-време- ни (100)	
ГЛАВА 3. Черные дыры открыты и отвергнуты	
<i>глава, в которой законы искривленного пространства Эйнштейна предсказывают черные дыры, а сам Эйнштейн их отвергает</i>	117
ГЛАВА 4. Загадка белых карликов	
<i>глава, в которой Эддингтон и Чандрасекар ведут баталии вокруг смерти массивных звезд; должны ли они, погибая, схлопнуться, образуя черные дыры, или их спасет квантовая механика?</i>	136
Квантовая механика и строение белых карликов (137). Предельная масса (145). Схватка (154)	
ГЛАВА 5. Схлопывание неизбежно	
<i>глава, в которой даже ядерные силы, казалось бы самые мощные из всех видов сил, не могут противостоять мощи гравитации</i>	160
Цвикки (160). Ландау (175). Оппенгеймер (183). Уилер (194)	

ГЛАВА 6. Схлопывается во что?

глава, в которой весь арсенал теоретической физики не помогает уйти от вывода — схлопывание порождает черные дыры 206

Рождение черных дыр: первый взгляд (208). Ядерная интерлюдия (217). Рождение черных дыр: все более глубокое понимание (233)

ГЛАВА 7. Золотой век

глава, в которой выясняется, что черные дыры вращаются и пульсируют, запасают и высвобождают энергию, но не имеют волос 256

Наставники: Уилер, Зельдович, Сиама (259). У черных дыр нет «волос» (271). Черные дыры вращаются и пульсируют (284)

ГЛАВА 8. Поиск

глава, в которой продолжен, воплощен и (возможно) привел к успеху метод поиска на небе черных дыр 298

Метод (298). Поиск (307)

ГЛАВА 9. Наитие

глава, в которой астрономы оказываются вынужденными признать, что в ядрах галактик могут находиться непредсказанные черные дыры, в миллионы раз массивнее Солнца 321

Радиогалактики (321). Квазары (334). Гигантские черные дыры (345)

ГЛАВА 10. Рябь кривизны

глава, в которой гравитационные волны несут к Земле закодированные симфонии столкновений черных дыр, а физики изобретают инструменты, чтобы следить за этими волнами и расшифровывать эти симфонии 357

Симфонии (357). Болванки (366). LIGO (379)

ГЛАВА 11. Что такое реальность?

глава, в которой пространство-время искривлено по воскресеньям и плоское по понедельникам; горизонты по воскресеньям сделаны из вакуума и по понедельникам из зарядов, но воскресные эксперименты согласуются с понедельничными во всех деталях 400

ГЛАВА 12. Испарение черных дыр

глава, в которой горизонт черной дыры, окутанный атмосферой излучения и горячих частиц, медленно испаряется, а черная дыра сжимается и затем взрывается 415

Рост черных дыр (415). Энтропия (425). Излучение черной дыры (431). Черная дыра сжимается и взрывается (438)

ГЛАВА 13. Внутри черных дыр

глава, в которой физики борются с уравнением Эйнштейна и пытаются понять, что скрыто внутри черных дыр: путь в другую Вселенную? Сингулярность с бесконечными приливными гравитационными силами? Конец пространства и времени и рождение квантовой пены? 452

Сингулярности и другие вселенные (452). Революция Пенроуза (463). Наилучшие предположения (477)

ГЛАВА 14. Червоточины и машины времени

глава, в которой автор пытается проникнуть в суть физических законов и задается вопросом: могут ли высокоразвитые цивилизации построить в гиперпространстве тоннели для быстрого межзвездного сообщения и машины для путешествий во времени? 488

Червоточины и экзотическое вещество (488). Машины времени (503). Парадокс матереубийцы (514). Защита хронологии? (522)

ЭПИЛОГ

Обзор наследия Эйнштейна, прошлое и будущее теории, основные действующие лица 527

БЛАГОДАРНОСТИ

Мой долг — выразить признательность друзьям, коллегам, благодаря которым родилась эта книга 532

ДЕЙСТВУЮЩИЕ ЛИЦА

Список действующих лиц, чье появление было необходимо для повествования 534

ХРОНОЛОГИЯ

Хронология событий, озарений, открытий 541

ГЛОССАРИЙ

Определения экзотических терминов 551

ПРИМЕЧАНИЯ

Что придает мне уверенности в том, что я говорю? 572

БИБЛИОГРАФИЯ

Записанные интервью, ссылки 599

ПРЕДИСЛОВИЕ

Эта книга о революции в наших представлениях о пространстве и времени и о замечательных следствиях этой революции, некоторые из которых неизвестны до сих пор. В то же время это потрясающее свидетельство человека, который находится в самой гуще событий, о борьбе и редких успехах в поисках понимания того, что является наиболее таинственным объектом во Вселенной — о черных дырах.

Когда-то считалось очевидным, что поверхность Земли плоская: она либо бесконечная, либо имеет край, за который вы можете упасть, если будете настолько неосторожны, что отправитесь в дальнее путешествие к этому краю. Успешное возвращение Магеллана и других кругосветных путешественников, в конце концов, убедило людей, что поверхность Земли замыкается на себя, образуя сферу¹.

Однако само собой разумеющимся считалось, что сфера существует в плоском пространстве, плоском в том смысле, что к нему применима геометрия Евклида: параллельные линии никогда не пересекаются. Однако в 1915 г. Эйнштейн выдвинул теорию, объединяющую пространство и время в нечто, называемое пространством-временем. Оно уже не является плоским, а искривляется или сворачивается под действием заключенного в нем вещества или энергии. Поскольку вблизи нас пространство-время почти плоское, эта кривизна не имеет никакого значения в нормальных ситуациях. Но последствия этой теории для более отдаленных от нас областей Вселенной были настолько удивительны, что даже Эйнштейн не мог предположить. Так, например, у звезды под действием ее собственной гравитации может начаться коллапс, в результате которого пространство вокруг нее становится настолько искривленным, что звезда просто исчезает из Вселенной. Сам Эйнштейн не верил, что такой

¹ Великий физик повторяет, к сожалению, распространенное историческое заблуждение. В средние века, не говоря уже о XVI веке, представление о шарообразности Земли, возникшее еще в античности, не подвергалось сомнению среди образованных людей. Вполне научные доказательства шарообразности приводит уже Аристотель, имевший долгое время непререкаемый авторитет. [М.Г.]

коллапс возможен, однако, многие ученые показали, что это неизбежное следствие его собственной теории.

Рассказ о том, как они это сделали и как были обнаружены особые свойства черных дыр в пространстве, и составляет основу этой книги. Это история научного открытия и процесса его совершенствования, написанная одним из участников, такая же, как книга Джеймса Уотсона «Двойная спираль», рассказывающая об открытии структуры ДНК, которое привело к пониманию генетического кода. Но в отличие от истории ДНК, здесь не было никаких экспериментальных данных, которые направляли бы исследователей. Вместо этого была развита теория черных дыр, до того, как появились какие-либо свидетельствующие об их реальном существовании наблюдения. Я не знаю какого-либо другого примера в науке, когда такие великие экстраполяции были успешно сделаны только силой мысли. В этом и состоит замечательная мощь и глубина теории Эйнштейна.

Мы еще многого не знаем, например, что происходит с объектами и информацией, которые попадают в дыру. Появляются ли они где-либо во Вселенной или в других вселенных? И можем ли мы так свернуть время и пространство, чтобы осуществить путешествие назад во времени? Эти вопросы — часть нашего непрекращающегося поиска в понимании Вселенной. Может быть, кто-нибудь вернется к нам из будущего и даст ответ на все вопросы.

Стивен Хокинг

ВВЕДЕНИЕ

О чем эта книга, и как ее читать

Тридцать лет я участвую в великом поиске: в поиске понимания наследства, оставленного будущим поколениям Альбертом Эйнштейном — теории относительности и ее предсказаний о Вселенной, а также в исследованиях ее ограничений — где и когда теория относительности не работает, и что ее тогда заменяет.

Этот поиск провел меня через лабиринт экзотических объектов: черные дыры, белые карлики, нейтронные звезды, сингулярности, гравитационные волны, червоточины, свертывание времени и машины времени. Этот поиск поднимает многие глобальные вопросы: Что делает теорию «хорошей»? Какие трансцендентные принципы управляют законами природы? Почему мы, физики, думаем, что мы знаем такие вещи, о которых мы думаем, что мы их знаем, даже когда техника слишком слаба, чтобы проверить наши предсказания? Поиски рассказали мне, как работает ум ученого, показали огромную разницу между одним и другим умом (например, Стивена Хокинга и моего), и почему многие ученые разных складов, каждый из которых идет своим путем, развивают наше понимание Вселенной. Изыскания сотен участников, рассеянных по всему свету, помогли мне оценить международный характер науки, различные пути того, как организовано научное предприятие в разных сообществах и как переплетается наука с политикой, особенно в ходе советско-американского соперничества.

Эта книга — попытка поделиться моими взглядами с теми людьми, которые не являются учеными, а также с учеными, работающими в других областях науки. Эта книга посвящена разным пересекающимся темам, которые связаны между собой основной нитью: история наших усилий по расшифровке наследия Эйнштейна, кажу-

щихся такими дерзкими предсказаний черных дыр, сингулярностей, гравитационных волн, червоточин и свертывания времени.

Книга открывается прологом: научно-фантастической сказкой, которая быстро введет читателя в физические и астрофизические концепции, использованные в книге. Возможно, читая эту сказку, некоторые читатели придут в уныние. Многие понятия (черные дыры, их горизонты, червоточины, приливные силы, сингулярности и гравитационные волны) вводятся слишком быстро, без подробного объяснения. Мой совет: пусть это вас не смущает. Просто получайте удовольствие от сказки, и вы получите общее представление о новых для вас вещах. Каждое из этих понятий будет еще раз упоминаться в более свободном стиле и далее в этой книге. После того как вы прочтете всю книгу, вернитесь назад к прологу и вчитайтесь в технические нюансы.

Основное содержание книги (главы 1–14) сильно отличается от пролога. На основную историческую нить повествования нанизываются другие темы. Сначала я на нескольких страницах рассказываю об истории, затем отвлекаюсь на другую связанную с изложением тему, затем на третью. Потом снова возвращаюсь к истории, чтобы снова запустить новую тему. Эти отвлечения, ремарки и переплетения обращают читателя к элегантному полотну взаимосвязанных идей физики, астрофизики, философии науки, социологии и политики.

Некоторые физические положения могут восприниматься с трудом. Для удобства в конце книги приложен справочник физических терминов.

Наука является общественным занятием. Углубление наших представлений о Вселенной происходят не от работы одного какого-то индивидуума или небольшой группы, а от совместных усилий многих людей. Поэтому в книге появляется много имен. Чтобы помочь читателю запомнить тех, кто появлялся на страницах несколько раз, в конце книги приведен именной указатель, включающий краткую справку о каждом ученом.

В научных изысканиях, как и в жизни, многие направления развиваются одновременно различными людьми; теории одного десятилетия могут рождаться из идей, которые появились десятки лет тому назад, однако долгое время игнорировались. Поэтому в книге случаются прыжки во времени вперед и назад, останавливаясь на некоторое время в 1960-х годах, я погружаюсь в 1930-е, чтобы потом вернуться в основное течение 1970-х. Читатели, которые почувствуют головокружение от таких блужданий, найдут помощь в хронологическом указателе в конце книги.

Я не претендую на стандарты профессиональных историков: полнота изложения, точность и беспристрастность. Если бы я стал добиваться полноты изложения, многие читатели в изнеможении быстро свернули бы на обочину, я бы во всяком случае. Если бы я был более точен, книга заполнилась бы уравнениями и стала нечитаемой. Хотя я и старался быть беспристрастным, мне это, очевидно, не удалось — тема книги мне слишком близка: я лично участвовал в разработках с 1980-х годов и продолжаю участвовать сейчас, и несколько моих самых близких друзей также занимались этим направлением с 1930-х годов. Я пытался уравновесить мои предпочтения с помощью многочисленных интервью с другими участниками наших поисков, записанных на диктофон (см. библиографию), которые использовались в качестве основы для написания некоторых глав (см. благодарности). Однако некоторые предпочтения все же остались.

В помощь читателям, желающим большей полноты, точности и беспристрастности, я перечислил в конце книги источники многих моих исторических утверждений, а также дал ссылки на некоторые оригинальные статьи, которые написали участники нашего поиска, чтобы объяснить друг другу свои открытия. Эти работы содержат более точные (и поэтому более профессиональные) описания некоторых вопросов, которые в тексте книги могут быть искажены из-за моего стремления к упрощению.

Воспоминания ненадежны; разные люди, переживая одни и те же события, интерпретируют их по-разному. Именно в связи с такими возможными различиями, я отсылаю читателя к этим работам. В тексте книги я выношу по многим вопросам свое личное суждение как откровение. Пусть настоящие историки простят меня, а не историки, может, скажут спасибо.

Мой наставник и учитель Джон Уиллер в годы моего становления как физика (и центральный персонаж в этой книге) любил спрашивать своих друзей: «Что единственное, самое важное вы из этого смогли узнать?» Мало вопросов, которые заставляют так точно сконцентрировать ваш ум. В духе вопросов Джона, завершив книгу, я спрашиваю себя: «Что является тем единственным, самым важным, что я бы хотел, чтобы от меня узнали читатели?»

Мой ответ: потрясающая мощь человеческого ума, позволившая наскоками обходными путями и мгновенными озарениями разгадать сложность нашей Вселенной и выявить предельную простоту, элегантность и фантастическую красоту фундаментальных законов, по которым она существует.

*Я посвящаю эту книгу
Джону Арчибальду Уилеру —
моему другу и учителю*

ПРОЛОГ:

Путешествие среди черных дыр

здесь читатель в научно-фантастической сказке впервые встречается с черными дырами и с их странными свойствами (насколько мы их понимаем в 1990 г.)

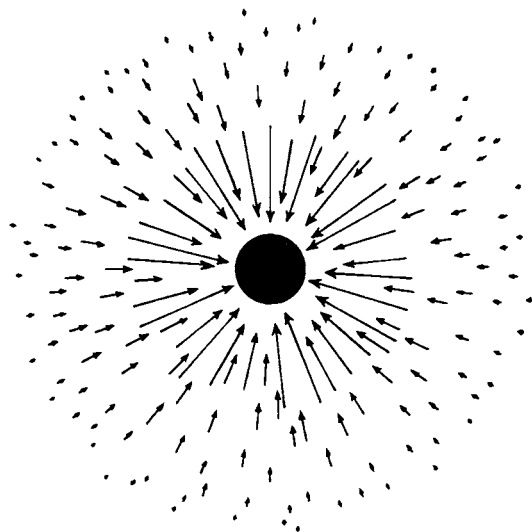
Из всех порождений человеческого разума, от единорогов и горгулий до водородной бомбы, самое фантастическое, наверное, — это черная дыра: дыра в пространстве с резко очерченными границами, в которую проваливается все, что оказывается поблизости, но из которой ничего не может выйти обратно, дыра с настолько мощной силой тяготения, что даже свет оказывается пойманным в ее объятиях, дыра, которая искривляет пространство и сворачивает время¹. Подобно единорогам и горгульям черные дыры больше подходят миру научной фантастики и древних мифов, чем реальной Вселенной. Тем не менее, существование черных дыр надежно предсказывается хорошо доказанными законами физики. Только в нашей галактике их может быть миллионы, но их чернота прячет их от наших взоров. Обнаружение черных дыр вызывает у астрономов большие трудности².

Аид

Представьте, что вы владелец и капитан гигантского звездолета, и вашим приказам подчиняются все компьютеры, роботы и сотни членов команды. Всемирное географическое общество уполномочило вас исследовать черные дыры на дальних рубежах межзвездного пространства и доставить на Землю описание ваших экспериментов. После шестилетнего путешествия звездолет замедляется в окрестности ближайшей к Земле черной дыры Аид в окрестности Веги.

¹ Главы 5, 6, 7.

² Глава 8.

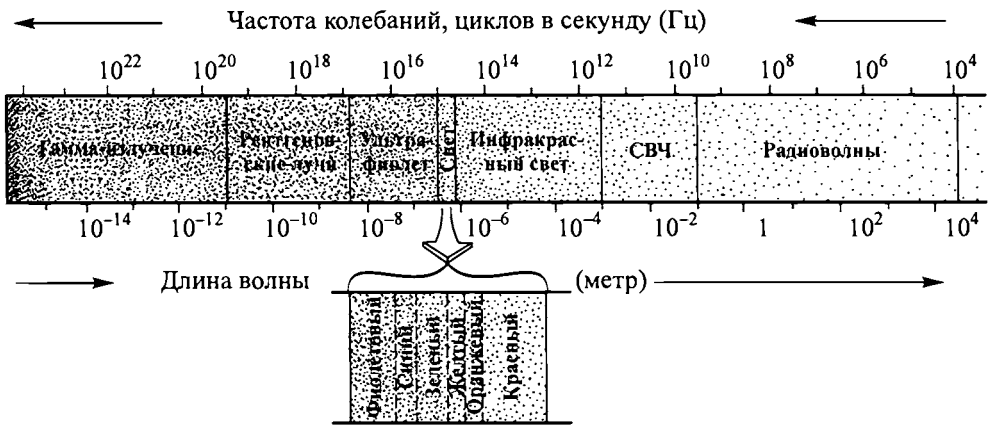


П.1. Атомы газа устремляются со всех сторон к черной дыре, затягиваемые ее гравитацией

На дисплее вы и ваша команда ясно видите, что дыра действительно существует: гравитация звезды затягивает атомы газа, свободно заполняющие межзвездное пространство с плотностью примерно в 1 атом на кубический сантиметр (рис. П.1). Атомы с разной скоростью устремляются к звезде со всех сторон: медленно на больших расстояниях, где гравитация слаба, быстрее ближе к дыре, там, где гравитация сильнее, и очень быстро, почти со скоростью света, вблизи поверхности дыры, где гравитация самая мощная. Если допустить ошибку, ваш звездолет тоже может засосать в эту дыру.

Первый помощник Карес, избегая катастрофы, с помощью быстрых и осторожных маневров выводит корабль на круговую орбиту. Затем она глушит двигатели. Пока вы обращаетесь вокруг дыры, центробежная сила кругового движения компенсирует гравитационное притяжение дыры. Ваш корабль, отбрасываемый центробежной силой, как в раскручиваемой детской игрушечной праче удерживается натяжением веревки — гравитационной силой черной дыры. Пока звездолет обращается по орбите, вы с командой готовитесь исследовать дыру.

Сначала пассивно. Используя хорошо оборудованные телескопы, можно исследовать электромагнитные волны (излучение), испускаемые газом, падающим в дыру. Температура холодных далеких от черной дыры атомов газа лишь на несколько градусов отличается от абсолютного нуля. Холодные атомы колеблются медленно, и их колебания порождают медленно колеблющиеся электромагнитные волны, что означает, что волны обладают большим расстоянием от одной верши-



П.2. Спектр электромагнитных волн простирается от радиоволн с очень большими длинами волн (очень низкие частоты) до гамма-лучей с очень короткими длинами волн (очень высокие частоты). Для того чтобы понять, какие обозначения здесь выбраны для чисел (10^{21} , 10^{-12} и т.д.), см. Врезку П.1 ниже

ны волны до другой — это длинные волны, т. е. радиоволны (см. рис. П.2). Ближе к дыре, где гравитация затягивает атомы в мощный поток, они сталкиваются друг с другом и нагреваются до нескольких тысяч градусов. Тепло заставляет их колебаться быстрее и быстрее, испускать волны с более короткими расстояниями между максимумами, волны, которые вы знаете как свет разного цвета: красный, оранжевый, желтый, зеленый, голубой, синий, фиолетовый (рис. П.2).

Еще ближе к дыре, где гравитация еще сильнее, а поток еще быстрее, соударения нагревают атомы до температуры в несколько миллионов градусов, и они начинают колебаться с бешеной скоростью, создавая электромагнитные волны с очень короткими длинами: рентгеновские лучи. Наблюдая эти рентгеновские лучи, исходящие из окрестности дыры, вы вспоминаете, что именно так в 1972 г. астрофизики обнаружили и идентифицировали с помощью рентгеновских лучей первую черную дыру в далеком пространстве: X-1 Лебедя, на расстоянии 6000 световых лет от Земли³.

Переводя телескопы на области еще более близкие к дыре, вы видите уже гамма-лучи, испускаемые атомами, нагретыми до еще более высоких температур. Затем, направив взгляд на центр этого восхитительного творения, вы видите большую круглую сферу, абсолютно черную — это и есть черная дыра, закрывающая собой весь свет, рентгеновские и гамма-лучи от атомов, расположенных позади

³ Глава 8.

нее. Вы видите, как сверхгорячие атомы со всех сторон устремляются к черной дыре. Попад внутрь дыры, они должны стать еще горячее, колебаться еще быстрее и излучать еще сильнее, чем раньше, но их излучение уже не может покинуть звезду из-за сильной гравитации. Ничто не может вырваться из звезды. Вот почему дыры выглядят черными; черными как смоль⁴.

Вы внимательно изучаете черную сферу в телескоп. У нее абсолютно резкие края, это та поверхность дыры, откуда «нет выхода». То, что находится *над* этой поверхностью, может при некоторых усилиях ускользнуть из объятий гравитации: ракета может улететь, могут оторваться частицы, если им придать достаточную скорость, может излучиться свет, но сразу *под* поверхностью объятия гравитации непреодолимы — оттуда ничто и никогда не может вырваться, вне зависимости от прилагаемых усилий: ни ракета, ни частицы, ни свет, ни излучение какого-либо иного вида, ничто не может достичь орбиты вашего звездолета. Именно поэтому поверхность дыры похожа на земную линию горизонта, за которую вы не можете заглянуть. Вот почему она называется *горизонтом черной дыры*⁵.

Ваш первый помощник Карес аккуратно измеряет длину орбиты звездолета. Она составляет 1 миллион километров, т. е. примерно половину окружности орбиты Луны вокруг Земли. Затем, следя за изменением при движении корабля положения удаленных звезд и замечая период их перемещения, она устанавливает, что корабль совершает один оборот вокруг дыры за 5 минут и 46 секунд. Это время называется *орбитальным периодом* корабля.

Из периода обращения и величины окружности теперь вы можете вычислить массу дыры. Это тот же метод, который использовал Исаак Ньютон в 1685 г. для вычисления массы Солнца. Чем больше центральная масса Солнца (черной дыры), тем больше гравитационная сила, и поэтому тем скорее должна двигаться по орбите планета (звездолет), чтобы избежать падения, и тем короче должен быть орбитальный период. Применяв математическое уравнение, выражающее закон тяготения Ньютона⁶, для расчета орбиты корабля, вы находите, что черная дыра Аид имеет массу в десять раз больше, чем у Солнца («10 солнечных масс»)⁷.

Вы знаете, что эта дыра возникла давно, когда погибла звезда, погибла, потому что не смогла больше сопротивляться стягивающей

⁴ Главы 3 и 6.

⁵ Глава 6.

⁶ Глава 2.

⁷ Читатели, которые захотят сами рассчитать свойства черных дыр, найдут соответствующие формулы в конце книги.

ПРОЛОГ

ее силе гравитации и потому схлопнулась⁸. Вы знаете также, что когда звезда схлопнулась, ее масса не изменилась; у черной дыры Аид сейчас такая же масса, какая когда-то была у звезды-прародительницы. Точнее почти такая же — масса Аида в действительности должна быть немного больше на величину всего того, что провалилось в дыру с тех пор, как она родилась: межзвездный газ, космический мусор, звездные корабли.

Вы это знаете, поскольку, перед тем как отправится в путешествие, вы изучали фундаментальные основы теории гравитации: законы, которые в приближенной форме были открыты Исааком Ньютоном в 1687 г., а затем радикально пересмотрены и уточнены в 1915 г. Альбертом Эйнштейном⁹. Вы узнали, что законы гравитации Эйнштейна, называемые *общей теорией относительности*, заставляют черные дыры вести себя по столь же неумолимым законам, которые заставляют отпущенный камень падать на землю. Невозможно представить, чтобы камень вопреки законам тяготения воспарил в небо как птица, точно также невозможно, чтобы черная дыра избежала действия законов гравитации.

Дыра неизбежно появляется на свет при схлопывании звезды; масса дыры при рождении должна быть в точности равна массе звезды; каждый раз, когда что-то проваливается в дыру, ее масса должна возрастать¹⁰. Точно так же, если звезда вращается, когда начинается ее взрыв, новорожденная дыра тоже должна вращаться; и *угловой момент* дыры (мерило того, насколько быстро она вращается) должен быть в точности равен угловому моменту звезды.

Перед путешествием вы ознакомились также с историей изучения природы черных дыр. В семидесятые годы XX столетия Брэндон Картер, Стивен Хокинг, Вернер Израэль и другие на основании общей теории относительности Эйнштейна¹¹ для законов гравитации сделали вывод, что черная дыра должна быть исключительно простой сущностью¹² — все свойства дыры (сила гравитационного тяготения, величина, на которую она отклоняет траектории света звезд, форма и площадь поверхности) определяются всего тремя величинами: массой

⁸ Главы 3–5. Для описания этого явления, играющего главную роль в этой книге, К.Торн почти всегда вместо распространенного научного термина «collapse» (коллапс) использует более красочный термин «implosion», наиболее адекватным переводом которого, видимо, является слово «схлопывание». [*Прим. ред.*]

⁹ Глава 2.

¹⁰ Для дальнейшего обсуждения вопроса о том, как законы физики заставляют черные дыры, Солнечную систему и Вселенную вести себя определенным образом, смотрите последние параграфы главы 1.

¹¹ Глава 2.

¹² Глава 7.

дыры, которая вам уже известна, угловым моментом ее вращения, который вы пока не знаете, и электрическим зарядом. Более того, вам известно, что никакая дыра в межзвездном пространстве не может обладать большим электрическим зарядом: в противном случае она бы быстро притянула к себе заряды противоположного знака из межзвездного пространства, нейтрализуя свой собственный заряд.

Вращаясь, черная дыра образует вокруг себя космический вихрь, подобный водовороту. Так же как винт самолета, закручивающий воздух и все, что в нем находится, космический вихрь около черной дыры вовлекает во вращение все тела вблизи дыры¹³.

Чтобы узнать угловой момент Аида, вы должны обнаружить вихревое движение в потоке атомов межзвездного газа, падающего в дыру. К удивлению, наблюдая подходящий все ближе звезде и все ускоряющийся поток, вы не замечаете никаких признаков завихрения. Часть атомов, падая на дыру, движется по часовой стрелке, а другая — наоборот, сталкиваясь иногда со встречными атомами, движущимися по часовой стрелке. Но в среднем атомы падают прямо на дыру без какого-либо закручивания. Вы заключаете, что эта черная дыра в 10 солнечных масс вряд ли вообще вращается, ее угловой момент равен нулю.

Зная массу и угловой момент дыры и зная, что ее электрический заряд пренебрежимо мал, вы теперь можете рассчитать, используя формулы общей теории относительности, все свойства черной дыры: силу гравитационного тяготения, соответствующую ей величину отклонения света далеких звезд и, что особенно интересно, форму и размеры дыры.

Если бы дыра вращалась, ее горизонт имел бы хорошо выраженные северный и южный полюсы, соответствующие оси вращения, поскольку у этих полюсов образовывались бы водовороты из падающих атомов. Дыра имела бы хорошо выраженную линию экватора между полюсами, и центробежная сила, действующая на вращающийся горизонт, привела бы к выпячиванию поверхности у экватора¹⁴ подобно тому, как немного сплюснута к экватору вращающаяся Земля. Но поскольку Аид вряд ли вращается, у него нет выпуклости на экваторе. Его очертания согласно законам гравитации должны представлять собой почти точную сферу. Вот почему Аид так и выглядит в телескоп.

Что касается размеров, то законы физики, как утверждает общая теория относительности, диктуют, что чем больше масса звезды, тем

¹³ Глава 7.

¹⁴ Там же.

больше ее горизонт. Фактически окружность горизонта должна быть равна 18,5 километрам, умноженным на массу дыры, выраженную в единицах массы Солнца¹⁵. Поскольку ваши орбитальные измерения показали, что масса дыры в десять раз больше солнечной, окружность ее горизонта должна быть равна 185 километрам, почти как у Лос-Анджелеса. С помощью телескопов вы аккуратно измеряете длину окружности: 185 километров — полное согласие с общей теорией относительности.

Врезка П.1

Обозначение степени больших и малых чисел

В этой книге я буду иногда использовать «научную нотацию», чтобы описать очень большие или очень малые числа. Например, 5×10^6 означает пять миллионов, или 5000000, а 5×10^{-6} означает пять миллионных, или 0,000005.

Вообще говоря, степень, в которую число возводится, — это число знаков, на которое нужно передвинуть десятичную запятую, чтобы представить число в обычном десятичном виде. Так, 5×10^6 обозначает, что мы берем 5 (5,000000000) и двигаем десятичную запятую на 6 знаков вправо. В результате получаем 5000000,00. Подобным же образом 5×10^{-6} означает, что берем 5 и двигаем десятичную запятую на шесть знаков влево. В результате получаем 0,000005.

Эта окружность горизонта ничтожна по сравнению с орбитой нашего звездолета в миллион километров, и в такую маленькую окружность стиснута масса в десять раз больше массы Солнца! Если бы дыра была твердым телом, сжатым до таких размеров, ее средняя плотность была бы равна 200 миллионов (2×10^8) тонн на кубический сантиметр — в 2×10^{14} раз плотнее, чем вода; см. Врезку П.1. Однако дыра не твердое тело. Общая теория относительности настаивает, что 10 солнечных масс материи звезды, которая произвела дыру, схлопнувшись, теперь сконцентрировались в ничтожный размер пространства, называемой *сингулярностью*¹⁶. Эта сингулярность имеет размер порядка 10^{-33} сантиметра (в сто миллиардов миллиардов раз меньше, чем ядро атома) и окружена только пустотой, в которой падает к центру межзвездный газ, и излучением, испускаемым этим газом. Такая пустота простирается от сингулярности вплоть до самого гори-

¹⁵ Глава 15. Величина 18,5 километров, которая многократно появляется в этой книге, равна произведению 4π (т. е. 12,5663706...) гравитационной постоянной Ньютона и массы Солнца, деленному на квадрат скорости света. В этой главе вы найдете и другие полезные формулы, описывающие черные дыры.

¹⁶ Там же.

зонта дыры, такая же как пустота от горизонта дыры до вашего звездолета.

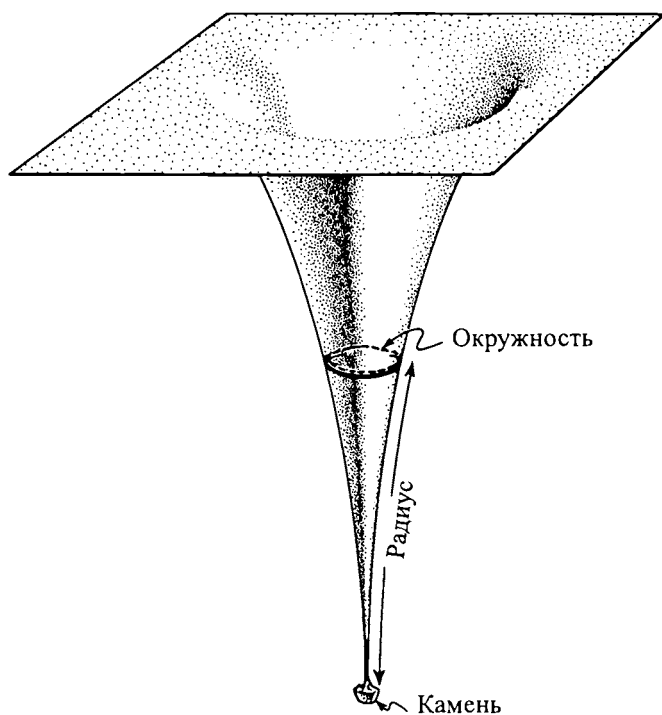
Сингулярность и запертая в ней звездная материя спрятаны под горизонтом дыры. Сколь бы долго вы не ждали, запертая материя никогда не вырвется наружу, ее не пускает гравитация черной дыры. Запертая материя также никогда не сможет передать вам никакой информации с помощью радиоволн, света или рентгеновских лучей. Для всех практических применений она навсегда ушла из нашей Вселенной. Единственное, что осталось от материи, это мощное гравитационное тяготение, такое же на вашей орбите в миллион километров, которое было и перед схлопыванием звезды, превращенной в дыру, но такое сильное на поверхности горизонта и под ним, что ему ничто не может противиться.

«Какое же расстояние от горизонта до сингулярности?» — спрашиваете вы себя. (Конечно, вы не собираетесь измерять его непосредственно, такое измерение было бы самоубийством; вы никогда не сможете выбраться из-под горизонта, чтобы доложить результаты Всемирному географическому обществу.) Из-за того что сингулярность очень мала, 10^{-33} сантиметра, и находится точно в центре дыры, расстояние от сингулярности до горизонта должно быть равно радиусу горизонта. Вам очень хочется вычислить этот радиус стандартным методом, поделив длину окружности на 2π (6,2831805307...). Однако когда вы учились на Земле, вас предупредили не доверять подобным расчетам. Огромное гравитационное тяготение дыры полностью искажает геометрию пространства внутри и вблизи дыры¹⁷, подобно тому, как тяжелый камень, положенный на резиновую пленку, изменит геометрию листа (рис. П.3), в результате чего радиус горизонта не будет равен длине окружности, деленной на 2π .

«Ничего страшного, — говорите вы себе, — Лобачевский, Риман и другие великие математики научили нас рассчитывать свойства окружностей и в искривленном пространстве, а Эйнштейн ввел эти расчеты в свою общую теорию относительности для законов гравитации. Я могу использовать эти формулы искривленного пространства для вычисления радиуса горизонта».

Но потом, припоминая то, что узнали во время подготовки на Земле, вы понимаете, что хотя масса дыры и ее угловой момент определяют все свойства горизонта дыры и окружающего пространства, они ничего не говорят о внутренних свойствах дыры. Общая теория относительности настаивает, что внутренность дыры, вблизи

¹⁷ Главы 3 и 13.



П.3. Тяжелый камень, помещенный на резиновую поверхность (например, на батут), деформирует плоскость, как показано на рисунке. Искривленная геометрия поверхности очень похожа на искривленное пространство вокруг и внутри черной дыры. Например, длина окружности жирного черного круга намного меньше, чем 2π , умноженное на его радиус. См. подробности в главах 3 и 13

сингулярности, должна быть хаотична и сильно несферична¹⁸, также как центр резиновой пленки на рис. П.3, если тяжелый камень имеет неровную форму и непрерывно дергается вверх и вниз. Более того, хаотичная природа ядра дыры будет зависеть не только от массы звезды и ее углового момента, но и от всех деталей схлопывания дыры, при котором родилась дыра, а также от истории последующего падения на дыру межзвездного газа — всех деталей, которые вам неизвестны.

«Ну и ладно, — решаете вы, — какая бы ни была ее структура, хаотичное ядро должно иметь длину окружности много меньше сантиметра. Итак, я сделаю небольшую ошибку, если вообще пренебрегу им, когда буду вычислять радиус горизонта».

Но затем вы вспоминаете, что пространство вблизи сингулярности может быть деформировано так сильно, что хаотичный участок может иметь радиус в миллионы километров, хотя длина его окружности

¹⁸ Глава 13.

будет составлять только долю сантиметра. Точно так же тяжелый камень на рис. П.3 может сколь угодно глубоко вниз вытянуть острый неровный конус резиновой пленки, оставляя в то же время длину его окружности малой. Ошибки в наших вычислениях радиуса могут быть поэтому огромными. Радиус горизонта просто-таки не может быть вычислен из той скудной информации, которой вы владеете: масса дыры и ее угловой момент.

Оставив размышления по поводу внутренностей черной дыры, вы готовитесь исследовать окрестности ее горизонта. Не желая рисковать человеческой жизнью, вы просите 10-сантиметрового робота Арнольда, оснащенного ракетными двигателями, провести для вас исследования и передать результаты назад на звездолет. У Арнольда простые инструкции: прежде всего он должен запустить ракетные двигатели так, чтобы погасить первоначально общую со звездолетом скорость орбитального движения, а затем выключить двигатели и позволить гравитации дыры затянуть его вниз. Во время падения Арнольд направит ярко-зеленый лазерный луч в сторону звездолета и закодирует в этом луче информацию о пройденном расстоянии и о состоянии его электронной системы, так же как радиостанция кодирует передачи на радиоволнах.

Команда звездолета примет лазерный луч, а Карес декодирует передачу, получив информацию от робота. Она также измерит длину волны луча (или, что то же самое, его цвет; см. рис. П.2). Знание длины волны очень важно: она будет нести информацию о скорости движения Арнольда. Поскольку он будет двигаться все быстрее и быстрее, удаляясь от звездолета, принятый на корабле первоначально зеленый цвет луча под действием *эффекта Доплера*¹⁹ будет смещаться во все более длинноволновую область, т. е. он будет становиться все более и более красным. Кроме того, есть дополнительный сдвиг в красную область, обусловленный борьбой луча с силой гравитационного тяготения дыры. Вычисляя скорость Арнольда, Карес должна внести поправку на это *гравитационное красное смещение*²⁰.

Итак, эксперимент начинается. Арнольд форсирует уход с орбиты на траекторию падения. Как только он начинает падать, Карес регистрирует время прихода лазерного сигнала. По прошествии 10 секунд декодированный лазерный сигнал сообщает, что все системы работают хорошо и что робот уже пролетел расстояние 2630 километров. По цвету лазерного света Карес вычисляет, что теперь он падает

¹⁹ См. Врезку 2.3.

²⁰ Главы 2 и 3.

со скоростью 530 километров в секунду. Когда часы отсчитали 20 секунд, скорость удвоилась до 1060 километров в секунду, а пройденное расстояние учетверилось до 10500 километров. Часы продолжают идти. По истечении 60 секунд скорость возросла до 9700 километров в секунду, а расстояние до 135000 километров, что составляет пять шестых расстояния до горизонта.

Теперь вы должны быть внимательны. Последующие несколько секунд будут решающими, и поэтому Карес включает высокоскоростную записывающую систему, чтобы собрать все детали поступающих данных. На 61-й секунде Арнольд докладывает, что все системы функционируют нормально, горизонт находится на расстоянии 14000 километров под ним, и он падает на него со скоростью 13000 километров в секунду. По истечении 61,7 секунды все еще идет хорошо, осталось еще 1700 километров, скорость 39000 километров в секунду или около одной десятой скорости света, но цвет лазера начинает быстро меняться. И в следующую одну десятую секунды вы с удивлением наблюдаете, как частота лазера проносится через весь спектр электромагнитного излучения: от зеленого к красному, затем к инфракрасному, к СВЧ и к радиоволнам. Через 61,8 секунды после начала падения все закончено. Лазерный луч полностью пропал. Арнольд достиг скорости света и исчез у горизонта. И в эту последнюю десятую долю секунды, как раз перед тем, как луч мелькнул последний раз, довольный Арнольд докладывал о том, что «все системы работают, все системы работают...».

Когда ваше возбуждение утихает, вы приступаете к изучению записанных данных. Там вы находите все детали изменения во времени длины волны лазерного излучения. Вы видите, что когда Арнольд падал, длина волны лазерного сигнала возрастала сначала очень медленно, а потом все быстрее и быстрее. Но, удивительно, после того как длина волны учетверилась, скорость ее удвоения стала почти постоянной: после этого длина волны удваивалась каждые 0,0014 секунды. После 33 «удвоений» (0,0046 секунды) длина волны достигла 4 километров — предела возможностей вашей регистрационной системы. Вероятно, длина волны продолжала удваиваться и дальше. Поскольку для того чтобы длина волны стала бесконечной, нужно, чтобы прошло бесконечное число удвоений, чрезвычайно слабые, чрезвычайно длинноволновые сигналы все еще могут идти от горизонта!

Означает ли это, что Арнольд еще не пересек горизонт и никогда не сможет его пересечь? Совсем нет. Те последние, вечно удваивающиеся сигналы бесконечно долго выкарабкиваются из гравитацион-

ных объятий дыры. Арнольд пролетел через горизонт, двигаясь со скоростью света, уже много минут тому назад. Оставшиеся слабые сигналы продолжают доходить, поскольку их время распространения очень велико. Это реликты прошлого²¹.

После многих часов исследования данных падения Арнольда и после долгого сна для восстановления сил вы переходите к следующей ступени исследований. На этот раз вы будете сами зондировать окрестность горизонта, но будете делать это более тщательно, чем Арнольд.

Прощавшись с командой, вы забираетесь в исследовательскую капсулу вашего корабля и выходите в ней на круговую орбиту рядом со звездолетом. Затем вы осторожно запускаете ракетные двигатели, чтобы немного замедлить свое орбитальное движение. Это немного сокращает центробежную силу, которая поддерживает капсулу, и гравитация дыры затягивает вас на несколько меньшую круговую орбиту. Когда вы опять запускаете осторожно двигатели, ваша круговая орбита опять немного сокращается. Ваша цель состоит в том, чтобы, используя эту мягкую, безопасную сходящуюся спираль, достигнуть круговой орбиты как раз над горизонтом, орбиту в 1,0001 раза большую, чем сам горизонт. Там вы сможете изучить многие свойства горизонта, избежав его фатальных объятий.

Однако по мере того, как орбита медленно сокращается, начинается происходить что-то странное. Уже при длине окружности в 100000 километров вы начинаете это чувствовать. Плавая внутри капсулы при положении тела ногами по направлению к черной дыре, а головой к звездам, вы чувствуете слабое усилие, приложенное к ногам в сторону дыры и такое же усилие, приложенное к вашей голове; вас мягко растягивает как тянучку. Вы понимаете, что причина — это гравитация дыры. Ваши ноги ближе к дыре, чем ваша голова, поэтому дыра тянет их сильнее, чем вашу голову. Конечно, точно так же обстоит дело, и когда вы стоите на Земле, но разница в расстоянии головы и ног от центра Земли в этом случае ничтожна, меньше чем одна миллионная, так что вы никогда ее не заметите. Наоборот, когда вы плаваете в своей капсуле по окружности в 100000 километров, разница «голова — ноги» составляет одну восьмую ускорения свободного падения на Земле ($1/8$ g). В середине вашего тела центробежная сила орбитального движения в точности сравнивается с гравитацией дыры. Получается, что гравитация как будто отсутствует, и вы плаваете свободно. Но действующая на ноги более сильная

²¹ Глава 6.

ПРОЛОГ

гравитационная сила тянет вниз с дополнительным ускорением $1/16\text{ g}$, а на голову действует более слабая гравитационная сила, позволяющая центробежной силе толкать вас вверх с дополнительным ускорением в $1/16\text{ g}$.

Развеселившись, вы продолжаете двигаться по нисходящей спирали; но вскоре ваша веселость сменяется тревогой. По мере того как орбита уменьшается, силы, действующие на голову и ноги, возрастают. На длине окружности в 80000 километров разница составляет $1/4\text{ g}$, на 50000 километров — это уже как сила тяжести на Земле; на 30000 километрах оно равно 4 g . Сжимая зубы от боли, поскольку голова и ноги растягиваются в противоположные стороны, вы спускаетесь до 20000 километров при 15 g растягивающей силы. Больше вам не выдержать! Вы пытаетесь решить эту проблему, свернувшись клубком, так чтобы ноги и голова были ближе, а разница в силах меньше, но растягивающие силы настолько велики, что они не позволяют вам свернуться и распрямляют ваше тело вдоль радиуса дыры. Если орбита капсулы еще уменьшится, ваше тело будет разорвано! Надежда достичь окрестности горизонта пропала.

Расстроенный и измученный, вы останавливаете спуск капсулы, поворачиваете ее и начинаете осторожно и мягко форсировать свой путь назад, увеличивая высоту орбиты, и возвращаетесь в чрево звездолета.

Войдя в капитанскую кабину, вы отводите душу на главном компьютере корабля, который называется ЗАРЯ. «Тише, тише!» — успокаивает компьютер (используя слова древнего русского языка). «Я знаю, что вы расстроены, но это действительно ваша вина. Вам же говорили об этих «головоножных» силах во время занятий. Помните? Это те же самые силы, которые создают приливы океанов на Земле»²².

Вы припоминаете, что океан на той стороне Земли, которая ближе к Луне, притягивается ее гравитацией сильнее и выпячивается по направлению к Луне. Вода океана с противоположной стороны Земли притягивается слабее, и поэтому тоже собирается в выпуклость, но направленную от Луны. В результате получается два разных океанических горба; которые вследствие вращения Земли проявляются в виде двух приливов, происходящих каждые двадцать четыре часа. Именно из-за этих приливов, вспоминаете вы, эта «головоножная» гравитационная сила, о которой вы забыли, называется *приливной силой*. Вы также припоминаете, что общая теория относительности Эйнштейна описывает эту приливную силу как следствие искривле-

²² Глава 2.

ния пространства и свертывания времени, или на языке Эйнштейна, *искривление пространства-времени*²³. Приливные силы и искривление пространства-времени идут рука об руку: одно всегда сопровождает другое, хотя в случае океанских приливов искривление пространства-времени так незначительно, что измерить его можно только сверхчувствительными приборами.

А как же Арнольд? Почему же у него был такой жизнерадостный иммунитет по отношению к приливным силам дыры? По двум причинам, объясняет ЗАРЯ: во-первых, потому что он намного меньше вас, высотой только в 10 сантиметров, и приливная сила, которая равна разнице между гравитационными силами в области головы и ног, была, соответственно, меньше; и во-вторых, потому что он был сделан из сверхпрочного титанового сплава, который мог противостоять растягивающей силе гораздо лучше, чем ваши ткани и кости.

Потом вы с ужасом осознаете, что когда Арнольд проносился через горизонт по направлению к сингулярности, он должен был почувствовать увеличение приливной силы до такой степени, когда даже его сверхпрочное титановое тело уже не смогло бы ей противостоять. Менее чем через 0,0002 секунды после пересечения горизонта его разрушающееся, растягиваемое тело должно было приблизиться к сингулярности в центре дыры. Там, как подсказывают ваши знания общей теории относительности, полученные на Земле, приливные силы вовлекли останки Арнольда в хаотический танец, растягивая его то в одном, то в другом направлении, все быстрее и быстрее, все сильнее и сильнее, до тех пор, пока даже отдельные атомы его вещества не изменятся до неузнаваемости. Фактически, это и есть одна из сущностей сингулярности. Это место, где хаотически осциллирующая кривизна пространства-времени порождает огромные, хаотические приливные силы²⁴.

Размышляя над историей исследования черных дыр, вы вспоминаете, что в 1965 г. британский физик Роджер Пенроуз использовал описание законов физики с помощью общей теории относительности, чтобы доказать, что внутри каждой черной дыры должна находиться сингулярность, а в 1969 г. российская тройка: Лифшиц, Халатников и Белинский, тоже на основе общей теории относительности, сделали вывод, что вблизи сингулярности приливные силы должны испытывать хаотические осцилляции, подобно силам, которые прикладывает к тянучке автомат по ее изготовлению, растяги-

²³ Глава 2.

²⁴ Глава 13.

вающий ее в разных направлениях²⁵. Это были золотые годы теоретических исследований черных дыр, 1960-е и 1970-е! Но поскольку физики той золотой поры еще не полностью освоили решение уравнений общей теории относительности Эйнштейна, одно из ключевых свойств поведения черных дыр ускользнуло от их внимания. Они смогли только предположить, что всякий раз при схлопывании звезды с образованием сингулярности одновременно создается и окружающий ее горизонт, прячущий сингулярность из вида, — сингулярность никогда не может быть создана «голой» так, чтобы оказаться на виду у Вселенной. Пенроуз назвал это явление «соглашение о космической цензуре», поскольку, если это так, то любая экспериментальная информация о сингулярности будет подвержена цензуре: никто никогда не сможет поставить прямой эксперимент по проверке теории сингулярности, не поплатившись жизнью за возможность попадания в черную дыру, и даже не сможет передать свои результаты другим как памятник своим усилиям.

Хотя в 2023 г. Дейм Абигаль Лиман наконец-то разрешил проблеме существования космической цензуры, для вас сейчас это неважно. Единственные сингулярности, зафиксированные в атласах вашего корабля, это те, которые находятся внутри черных дыр, и вы не желаете платить цену своей жизни за их исследование.

К счастью, вблизи горизонта черной дыры, но снаружи есть еще достаточно много явлений, которые можно изучать. Вы намерены прежде всего исследовать эти явления и доложить о результатах Всемирному географическому обществу, однако вы не можете экспериментировать вблизи горизонта Аида. Приливные силы здесь слишком велики. Поэтому вы хотите исследовать черную дыру с меньшими приливными силами.

ЗАРЯ напоминает, что согласно предсказаниям общей теории относительности с ростом массы черной дыры приливные силы над ее горизонтом становятся слабее. Этот кажущийся парадокс имеет простое объяснение: приливная сила пропорциональна массе дыры, деленной на куб длины ее окружности: с ростом массы длина окружности горизонта растет линейно, а приливная сила вблизи горизонта уменьшается. Для дыры, имеющей массу миллион солнечных масс, т.е. в 100000 раз более массивной, чем Аид, горизонт будет в 100000 раз больше, а приливная сила в 10 миллиардов (10^{10}) раз слабее. Это удобно — никакой боли! Итак, вы начинаете планировать следующий маршрут вашего путешествия: путешествие к ближайшей черной дыре

²⁵ Глава 13.

в миллион солнечных масс — дыре, названной Стрелец в атласе черных дыр Шехтера, которая расположена в центре нашей галактики Млечный Путь на расстоянии в 30100 световых лет от нас.

Через несколько дней ваша команда пересылает на Землю готовый детальный отчет ваших исследований Аида, включая изображения атомов, падающих на черную дыру, и вашего растягиваемого приливными силами тела. Чтобы покрыть расстояние в 26 световых лет до Земли, отчету потребуется 26 лет, после чего он будет с триумфом опубликован Всемирным географическим обществом.

В сообщении команда описывает ваш план путешествия к центру Млечного Пути: двигатели корабля будут все время работать с ускорением $1g$, и команда будет находиться на корабле в условиях комфортной гравитации, равной земной. Корабль будет ускоряться по направлению к центру галактики в течение половины путешествия, затем он повернется на 180° градусов и будет замедляться с ускорением в $1g$ в течение второй половины пути. Весь путь — расстояние в 30100 световых лет потребует 30102 года, если его измерять по земному времени, по корабельным же часам путь займет всего 20 лет. В соответствии с законами специальной теории относительности Эйнштейна²⁶, высокая скорость вашего корабля приведет к тому, что время на корабле «сожмется»; и это *сжатие времени* заставит звездолет вести себя подобно машине времени, переносящей вас в далекое будущее Земли, а вы лишь немного состаритесь²⁷.

Вы объясняете Всемирному географическому обществу, что ваше следующее сообщение придет из некоторой области центра галактики, после того как вы обнаружите дыру Стрелец в миллион солнечных масс. Если члены Общества хотят получить ваше сообщение, им придется погрузиться в анабиоз на 60186 лет ($30102 - 26 = 30076$ лет с момента получения вашего сообщения и до момента достижения вами центра галактики плюс 30110 лет, которые требуются, чтобы ваше следующее сообщение из центра галактики достигло Земли).

Стрелец

После 20-летнего по часам звездолета путешествия ваш звездолет замедляется в центре Млечного Пути. Вдалеке вы видите плотное газопылевое облако, устремляющееся внутрь огромной черной дыры. Чтобы перевести корабль на свободную круговую орбиту вблизи го-

²⁶ Глава 1.

²⁷ Там же.

горизонта, Карес регулирует тягу двигателей. Измерив длину окружности и период вращения и подставив результаты в формулу Ньютона, вы определяете массу дыры. Она равна 1 миллиону масс Солнца, как и заявлено в Атласе черных дыр Шехтера. Поскольку завихрения у притягиваемых дырой газа и пыли нет, вы делаете вывод, что дыра сильно не вращается, ее горизонт должен быть сферическим, а его длина окружности равна 18,5 миллионам километров, что в восемь раз больше орбиты Луны вокруг Земли.

После дальнейшего тщательного исследования втягивающегося газа вы готовитесь к спуску на горизонт. Для безопасности Карес устанавливает лазерную связь между спускаемой капсулой и главным компьютером звездолета ЗАРЯ. Затем вы вылетаете из люка звездолета, разворачиваете капсулу так, чтобы дюзы указывали в направлении кругового орбитального движения, включаете двигатели и начинаете медленно тормозить, переходя в плавной спирали с одной круговой орбиты на другую.

Все идет по плану, пока вы не достигаете орбиты длиной в 55 миллионов километров — равной как раз трем окружностям горизонта. Тогда капсула вместо плавного спуска по спирали вдруг делает самоубийственный рывок к горизонту. В панике вы разворачиваете капсулу и с большим трудом выходите на более высокую орбиту, чуть большую 55 миллионов километров.

— Что случилось, черт побери!? — спрашиваете вы ЗАРЮ по лазерной связи.

— Тише, тише! — успокаивает она, — Вы рассчитали орбиту, используя описание законов гравитации Ньютона. Но ньютоновское описание — только приближение к настоящим законам гравитации, которые управляют Вселенной²⁸. Это приближение прекрасно действует вдали от горизонта, но плохо поблизости от него. Гораздо более точным является описание Эйнштейна на основе общей теории относительности, которое с огромной точностью согласуется с истинными законами гравитации вблизи горизонта и предсказывает, что около него гравитационное тяготение становится сильнее, чем по закону Ньютона. Чтобы оставаться на круговой орбите, на которой усиленная гравитация уравнивается центробежной силой, вы должны увеличить вашу центробежную силу, а это означает, что должна увеличиться ваша орбитальная скорость вокруг дыры. После прохождения орбиты в три окружности горизонта, вы должны перевернуть капсулу и не тормозить, а ускорять вращение. Потому после

²⁸ Глава 2.

пересечения тройной орбиты гравитация пересилила вашу центробежную силу и швырнула вас к центру.

«Будь проклята эта ЗАРЯ!» — ругаетесь вы про себя. «Она всегда отвечает на мои вопросы, но никогда не сообщит о критической ситуации заранее. Она никогда не предупредит меня, когда я собираюсь действовать неверно!» Вы знаете, конечно, причину. Человеческая жизнь потеряла бы свою «изюминку» и разнообразие, если бы компьютерам разрешалось предостерегать от совершения ошибок. В 2032 г. Всемирный Совет принял закон об обязательной установке во все компьютеры блока Гобсона, запрещающего такие предупреждения, вы разворачиваете капсулу и начинаете осторожно чередовать: ускорение, снижение по спирали, свободный дрейф, ускорение, снижение по спирали, дрейф, ускорение, снижение, дрейф..., что приводит к уменьшению окружности орбиты с трех окружностей горизонта до 2,5; 2,0; 1,6; 1,55; 1,51; 1,505; 1,501; ...

Какое разочарование! Чем больше раз вы разгоняетесь и чем быстрее ваше результирующее движение по круговой орбите, тем меньше становится ваша орбита; но когда скорость дрейфа приближается к скорости света, орбита приближается к окружности, равной 1,5 окружности горизонта. Поскольку вы не можете двигаться быстрее света, нет никакой надежды, что этим способом можно подойти ближе к горизонту.

Вы опять обращаетесь к ЗАРЕ за помощью, и она в очередной раз успокаивает вас и объясняет: внутри окружности в 1,5 горизонта вообще нет круговых орбит. Гравитационное тяготение там такое сильное, что его не может уравновесить никакая центробежная сила, даже если это вращение со скоростью света. Если вы хотите подойти ближе, говорит ЗАРЯ, вы должны сойти с круговой орбиты и начать падать на горизонт, притормаживая, чтобы предотвратить катастрофическое падение. Сила двигателей вашей капсулы будет компенсировать силы гравитации дыры, пока вы будете медленно спускаться и затем висеть над горизонтом, как астронавты с помощью ракетных двигателей парили над поверхностью Луны.

Теперь, узнав о некоторых предосторожностях, вы спрашиваете ЗАРЮ совета по поводу последствий такой сильной тяги ракетных двигателей. Вы объясняете, что вы хотите парить на такой высоте, которая соответствует 1,0001 окружности горизонта, где проявляется большинство эффектов, наблюдаемых на горизонте, но откуда вы можете потом уйти. Если я буду поддерживать там капсулу двигателями с постоянной тягой, какой величине ускорения она будет соответствовать? «150 миллионов земных ускорений», — мягко отвечает ЗАРЯ.

С чувством глубокого разочарования вы разгоняетесь и по спирали уходите в люк вашего звездного корабля.

После долгого сна и последующего пятичасового расчета по формулам общей теории относительности применительно к черным дырам, трехчасового штудирования Атласа черных дыр Шехтера и часовой консультации с командой вы формулируете план следующей части путешествия.

Потом команда передаст Всемирному географическому обществу, оптимистически предполагая, что оно все еще существует, отчет о ваших экспериментах со Стрельцом. В конце сообщения излагается ваш новый план.

Расчеты показали, что чем больше дыра, тем меньшая тяга требуется ракете для удерживания ее на окружности в 1,0001 горизонта. Для болезненной, но терпимой тяги в 10 земных g масса дыры должна быть в 15 триллионов (15×10^{12}) солнечных масс. Самая близкая из таких дыр называется Гаргантюа, находится она на расстоянии 100000 (10^5) световых лет от нашей галактики (Млечный Путь) и в 100 миллионах (10^8) световых лет от кластера галактик Девы, вокруг которого вращается Млечный Путь. Фактически она находится вблизи квазара 3C273, в 2 миллиардах (2×10^9) световых лет от Млечного Пути, что составляет 10% расстояния до края наблюдаемой части Вселенной.

План, который передала ваша команда, состоит в путешествии к Гаргантюа. При использовании обычного ускорения в 1 g в первой половине пути и такого же замедления для второй половины ваше путешествие займет 2 миллиарда лет по земному времени, но благодаря зависящему от скорости сокращению времени только 42 года по часам звездолета. Если члены Всемирного географического общества не хотят 4 миллиарда лет находиться в состоянии глубокого анабиоза (2 миллиарда лет уйдет на достижение вашим звездолетом окрестностей Гаргантюа и 2 миллиарда на то, чтобы сообщение от него достигло Земли), они не смогут получить ваше следующее сообщение.

Гаргантюа

Через сорок два года по часам звездолета вы замедляетесь в окрестности Гаргантюа. Над вашей головой висит квазар 3C273 с двумя бьющими из центра блестящими голубыми струями²⁹; под ним находится черная бездна — Гаргантюа. Выйдя на орбиту вокруг

²⁹ Глава 9.

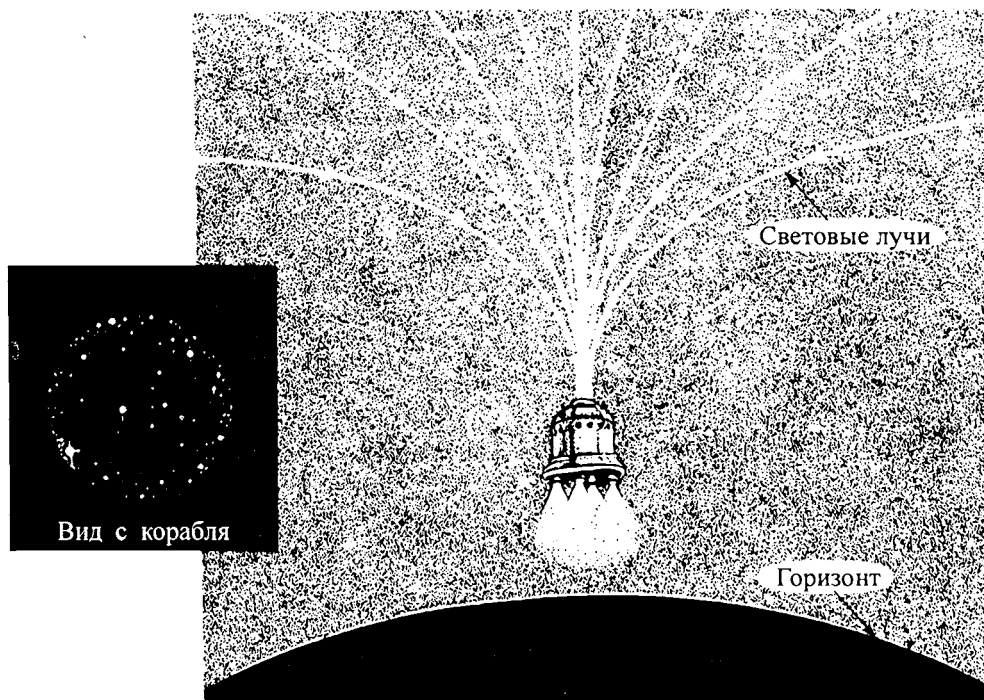
Гаргантюа и проведя обычные измерения, вы убеждаетесь, что действительно его масса равна 15 триллионам солнечных масс и что вращается он очень медленно. Из этих данных вы вычисляете, что длина окружности его горизонта составляет 29 световых лет. Наконец, рассчитываете, что это дыра, окрестность которой вы сможете исследовать, испытывая допустимые приливные силы и ускорения! Вы настолько уверены в безопасности, что решаете опустить к горизонту вместо капсулы весь звездолет.

Однако прежде чем начать спуск, вы приказываете команде сделать фотографии гигантского квазара над вами, триллионов звезд, окружающих Гаргантюа, и миллиардов галактик, мерцающих на небе. Они также фотографируют черный диск Гаргантюа под вами, который по размеру примерно соответствует диску Солнца на Земле. На первый взгляд, кажется, что он загораживает свет всех звезд и галактик, расположенных позади. Но приглядевшись, вы обнаруживаете, что гравитационное поле дыры действует как линза³⁰, отклоняя свет звезд и галактик вблизи края горизонта и фокусируя его в тонкое яркое кольцо по краю черного диска. На этом кольце вы видите несколько изображений от каждой загороженной звезды: одно изображение образуется световыми лучами, которые отклонились вблизи левого края дыры, другое — лучами, отклоненными от правого края, третье — лучами, которые, прежде чем направиться в вашу сторону, сделали полный оборот вокруг дыры, четвертое — лучами, которые дважды обожали дыру, и т.д. В результате получилась очень сложная кольцеобразная структура, которую сфотографировала для детального будущего изучения ваша команда.

Фотографирование закончено, вы приказываете Карес начать спуск звездолета. Но вам придется набраться терпения: дыра настолько велика, что спуск с последовательными ускорениями и замедлениями с $1g$ для достижения цели — орбиты в 1,0001 окружности горизонта, потребует 13 лет по времени звездолета.

Пока происходит спуск, команда регистрирует с помощью аппаратуры изменения неба вокруг звездолета. Наиболее заметное изменение — постепенное увеличение диска черной дыры под кораблем. Вы ожидаете, что он перестанет расти, когда закроет все небо под вами как черный пол, а небо над вами останется таким же ясным, как на Земле. Но нет — черный диск продолжает расти, заворачиваясь по сторонам вашего звездолета, и закрывает постепенное все пространство за исключением яркого круглого отверстия сверху, через которое

³⁰ Глава 8.



П.4. Звездный корабль, зависший над горизонтом черной дыры, и траектории, по которым свет доходит до него из дальних галактик (светлые лучи). Гравитация дыры отклоняет лучи света вниз («эффект гравитационной линзы»). Этот эффект и объясняет, почему люди на корабле видят свет сконцентрированным в яркое круглое пятно над ними

видна окружающая Вселенная (рис. П.4). Это происходит так, как будто вы попали в пещеру и удаляетесь все дальше и дальше от входа, который кажется все меньшим и меньшим светлым пятном.

В нарастающей панике вы просите помощи у «ЗАРИ»:

— Неужели Карес ошиблась при расчете траектории? Мы что, прошли через горизонт? Мы обречены?

— Тише, тише! — успокаивает она. — Мы в безопасности, мы все еще выше горизонта. Темнота закрыла большую часть неба только из-за мощного эффекта линзы, обусловленного гравитацией дыры. Посмотри туда, где мой указатель, почти точно над вами — там находится галактика 3C295. Прежде чем вы начали опускаться, она была в горизонтальном положении, 90° от зенита. Но теперь, вблизи горизонта Гаргантюа, гравитация дыры настолько сильно воздействует на почти горизонтальные лучи света, идущие от 3C295, что они, изгибаясь, превращаются в почти вертикальные. В результате кажется, что 3C295 находится вверх.

Теперь вы продолжаете спуск более уверенно. На мониторе показывается пройденное звездолетом по направлению к центру дыры

расстояние и длина окружности вашей орбиты вокруг дыры. На ранних стадиях спуска на каждый километр пройденного радиуса длина окружности уменьшалась на 6,283185307... километров. Отношение уменьшения длины окружности к уменьшению радиуса было равно точно 2π , как и предсказывает стандартная формула Евклида для окружностей. Но теперь, когда ваш корабль приближается к горизонту, отношение уменьшения радиуса становится много меньше, чем 2π : 5,960752960 для 10 окружностей горизонта; 4,442882938 для 2 окружностей; 1,894451650 для 1,1 окружности горизонта; 0,625200306 для 1,01 окружности. Такие отклонения от евклидовой геометрии, изучаемой в школе, возможны только в искривленном пространстве — вы видите кривизну пространства, которая предсказана общей теорией относительности Эйнштейна и которая должна сопровождать приливные силы дыры³¹. На конечной стадии спуска звездолета, чтобы замедлить его падение, Карес еще усиливает тягу двигателей. Наконец, корабль зависает на длине окружности в 1,0001 горизонта, используя 10 g ускорение для противостояния мощной гравитационной тяге дыры. На последнем километре радиального спуска длина окружности уменьшилась всего на 0,062828712 километра.

Еле ворочая руками, преодолевая болезненное 10 g ускорение, команда разворачивает телескопические камеры и начинает долгое и детальное фотографирование. За исключением слабого излучения вокруг, вызванного столкновениями атомов падающего газа, единственными электромагнитными волнами, которые можно сфотографировать, являются те, что приходят из яркого пятна над вами. Пятно уменьшилось всего до 3 градуса в диаметре, что в 6 раз больше диаметра диска Солнца, каким мы его видим на Земле. Но в это пятно стянуто изображение всех звезд, которые вращаются вокруг Гаргантюа и всех галактик Вселенной. Точно в центре находятся галактики, которые действительно находятся прямо над вами. На расстоянии в пятьдесят пять процентов от центра пятна до его края находятся изображения галактик, которые, как 3C295, если бы не эффект линзы, были бы видны на горизонте, в 90° от зенита. На расстоянии в 35 процентов до края пятна находятся изображения галактик, которые, как вы знаете, в действительности находятся на противоположной стороне дыры, прямо под вами. В 30 процентах от края пятна находится второе изображение каждой галактики, а еще в 2 процентах от края — третье!

Также необычно то, что цвета всех звезд и галактик кажутся неправильными. Галактика, о которой вы точно знаете, что она имеет

³¹ Главы 2 и 3.

зеленый цвет, светится теперь в мягком рентгеновском диапазоне: гравитация Гаргантюа, направляя к вам излучение галактики, делает его более высокоэнергетичным, уменьшая длину волны с 5×10^{-7} метра (зеленый) до 5×10^{-9} метра (рентгеновские лучи). Подобным же образом внешний диск квазара 3C273, который как вы знаете, излучает инфракрасный свет с длиной волны 5×10^{-5} метра, выглядит теперь зеленым с длиной волны 5×10^{-7} метра.

После тщательной регистрации всех особенностей пятна, вы обращаете внимание на свой звездолет. Вы подозреваете, что здесь, так близко к горизонту дыры, законы физики будут как-то изменяться, и эти изменения могут влиять и на вашу физиологию. Но нет. Вы смотрите на вашего первого помощника, Карес — она выглядит нормально. Второй помощник Брет тоже в норме. Вы дотрагиваетесь до них и не чувствуете изменений. Вы пьете стакан воды и, если не считать эффектов, связанных с большим десятикратным ускорением свободного падения, вода проходит нормально. Карес включает аргонный лазер, появляется, как обычно, зеленый луч. Брет посылает импульсы рубинового лазера и измеряет время, которое требуется световому импульсу для прохождения пути от лазера до зеркала и обратно. Из этих измерений он вычисляет скорость света. Результат в точности такой же, что и в лаборатории на Земле: 299792 километров в секунду.

На звездолете все в порядке, все абсолютно так же, как если бы корабль покоился на поверхности массивной планеты с гравитацией в 10 g. Если бы не причудливое пятно прямо над вами и все поглощающая пустота вокруг, вы бы не узнали, что находитесь очень близко к горизонту черной дыры, а не в безопасности на поверхности планеты. Ну, или почти не узнали. Дыра искривляет пространство-время внутри вашего звездолета так же, как и снаружи, и с помощью достаточно точных измерений вы можете определить эту кривизну, например, измерить силу приливного растяжения между вашей головой и ногами. Но поскольку кривизна исключительно важна в масштабе горизонта длиной в 300 триллионов километров, ее влияние в масштабе вашего однокилометрового звездолета ничтожно. Приливная сила, порождаемая кривизной, между верхом и низом звездолета равна одной сотой от триллионной части земной гравитации (10^{-14} g), а между головой и ногами еще в тысячу раз ее меньше!

Чтобы продолжить изучение этого замечательно нормального состояния, Брет выпускает из корабля капсулу с аппаратурой для измерения скорости света, состоящей из импульсного лазера и зеркала. Пока капсула движется к горизонту, этот прибор измеряет

скорость, с которой световые импульсы проходят от лазера в носовой части капсулы до ее хвостовой части и обратно. Компьютер в капсуле передает по лазерному лучу на корабль: «299792 километров в секунду; 299792, 299792, 299792...». Цвет входящего лазерного пучка смещается от зеленого к красному, затем к инфракрасному, потом к микроволнам и радиоволнам, по мере того как капсула приближается к горизонту, а сообщение по-прежнему то же самое: «299792, 299792, 299792...». Затем лазерный луч исчезает. Капсула прошла горизонт, но ни разу за время падения не наблюдалось никаких изменений в скорости света внутри ее, не было также никаких изменений в законах физики, которые управляют работой электронных систем капсулы.

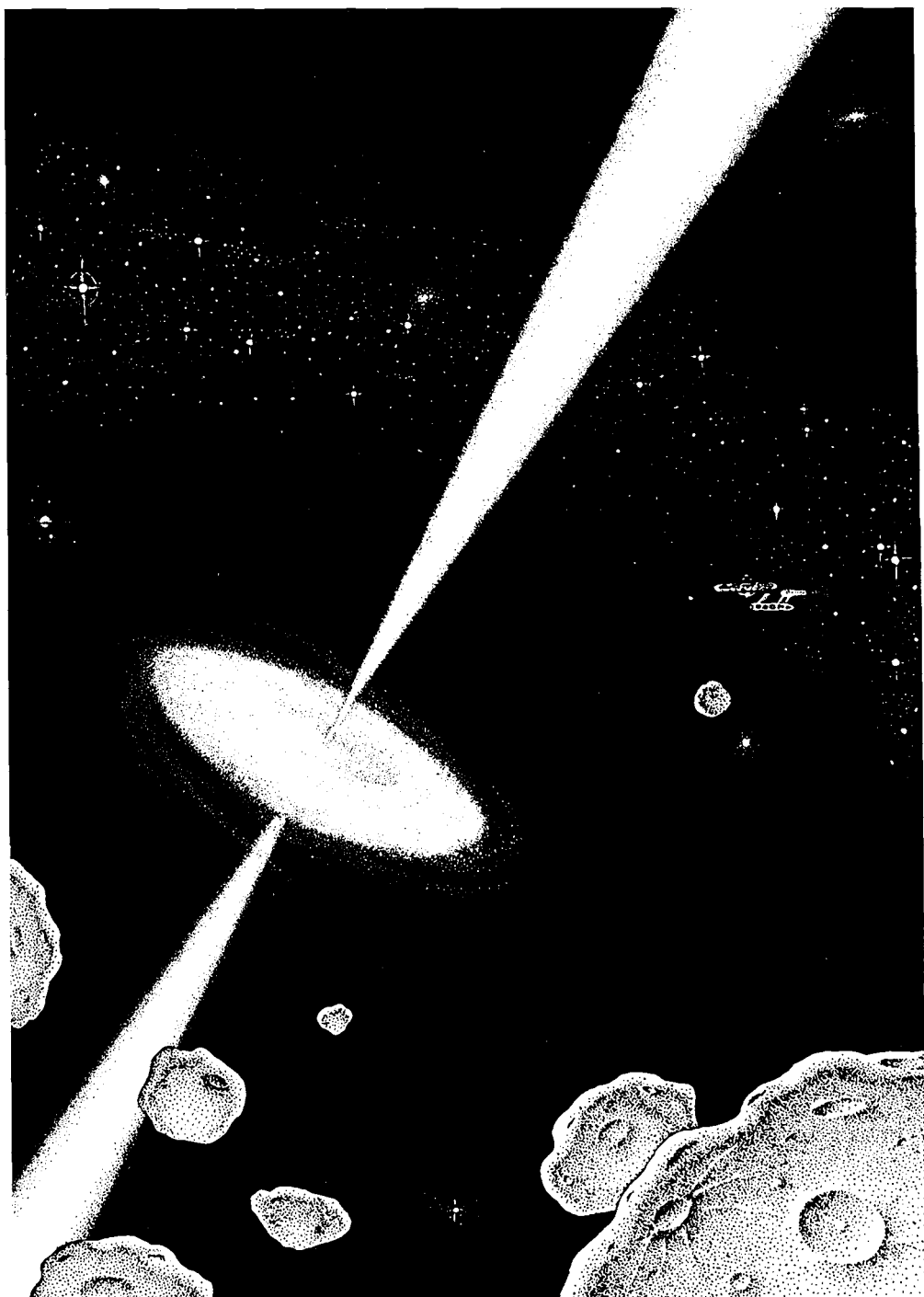
Эти экспериментальные результаты приносят вам большое удовлетворение. В начале XX века Альберт Эйнштейн провозгласил, исходя, в основном, из философских соображений, что локальные законы физики (законы в малых пространствах, там где можно пренебречь искривлением пространства-времени) должны быть те же самые, что и в остальной Вселенной. Это утверждение является фундаментальным принципом физики — *принципом эквивалентности*³². В последующие столетия принцип эквивалентности часто подвергался экспериментальной проверке, но никогда ранее его не проверяли так основательно, как в ваших экспериментах здесь, вблизи горизонта Гаргантюа.

Вы и ваша команда устали от борьбы с 10-кратной гравитацией и начинаете подготовку к заключительной части путешествия, возвращению к нашей галактике, к Млечному Пути. Команда, конечно, пошлет отчет о ваших исследованиях Гаргантюа в начале обратного пути, но, поскольку звездолет сам будет двигаться почти со скоростью света, сообщение достигнет Млечного Пути, обогнав корабль менее чем на год по часам Земли.

Пока ваш звездолет уходит от Гаргантюа, команда проделявает аккуратные телескопические исследования квазара 3C273, расположенного над вами³³ (рис. П.5). Его струи — тонкие всплески горячего газа, вырывающиеся из ядра квазара, — огромны: 3 миллиона световых лет длиной. Наведя телескопы на ядро, команда видит источник мощи этих струй: плотный, горячий бублик из газа размером менее, чем в один световой год, с черной дырой в центре. Бублик, который астрофизики называют «диск аккреции», вращается вокруг черной звезды. Измеряя период его вращения, вы получаете массу дыры:

³² Глава 2.

³³ Глава 9.



П.5. Квazar 3C273. Черная дыра в два миллиарда солнечных масс, окруженная бубликом газа («диск аккреции») и двумя гигантскими струями, выстреливающими вдоль ее оси вращения

2×10^9 солнечных масс, в 7500 раз меньше, чем Гаргантюа, но гораздо больше массы любой черной дыры в Млечном Пути. Поток газа, затягиваемый гравитацией дыры, устремляется из бублика к горизонту. Когда газ приближается к поверхности горизонта, он ведет себя иначе, чем вы видели на других дырах, он образует завихрение вокруг дыры как в торнадо. Эта дыра должно быть быстро вращается! Ось волчка легко идентифицировать: это ось, вокруг которой образуются газовые вихри. Две струи, как вы замечаете, выстреливают как раз вдоль оси волчка. Они образуются как раз над северным и южным полюсами горизонта и берут энергию из вращательного движения дыры и бублика³⁴, похоже на то, как смерч засасывают с земли пыль.

Разница между Гаргантюа и 3C273 кажется удивительной: почему Гаргантюа, с его в тысячу раз большими массой и размером, не обладает таким круглым бубликом газа и гигантскими струями квазара? После телескопических исследований Брет находит ответ: раз в несколько месяцев звезда на орбите центральной дыры 3C273 подходит близко к горизонту и разрывается приливными силами дыры. Остатки звезды, массой примерно в 1 солнечную, разбрызгиваются в окрестности черной дыры. Постепенно внутреннее трение загоняет разбрызгивающийся газ внутрь бублика. Этот свежий газ компенсирует газ, которым бублик постоянно снабжает дыру и струи. Таким образом, бублик и струи поддерживают свои запасы газа и продолжают ярко светить.

Брет объясняет, что звезды могут близко подойти и к Гаргантюа. Но поскольку Гаргантюа намного больше 3C273, его приливные силы над горизонтом слишком слабы, чтобы разорвать звезду. Гаргантюа проглатывает звезды целиком, не разбрызгивая их внутренности в окружающий бублик. А без бублика Гаргантюа не может создать струи и другие особенности квазара.

Пока звездолет продолжает вырываться из гравитационных объятий Гаргантюа, вы обдумываете план возврата домой. К тому времени, как корабль достигнет Млечного Пути, Земля станет на 4 миллиарда лет старше по сравнению со временем, когда вы ее покинули. Перемены в человеческом обществе должны быть такими разительными, что вам уже не хочется возвращаться. Вместо этого вы и ваша команда решаете колонизировать пространство вокруг вращающейся черной дыры.

Вы полагаете, что так же как энергия вращения дыры в 3C273 питает струи квазара, энергия вращения меньшей дыры может быть использована как источник энергии для человеческой цивилизации.

³⁴ Главы 9 и 11.

Вам не хотелось бы прибыть к какой-нибудь выбранной дыре и обнаружить, что другие существа уже построили вокруг нее свою цивилизацию. Поэтому вместо того чтобы направить звездолет к уже существующей быстро вращающейся дыре, вы направляетесь к таким звездным скоплениям, в которых быстро вращающиеся дыры должны появиться вскоре после вашего прибытия.

В туманности Ориона в Млечном Пути как раз, когда вы покидали Землю, существовала *двойная звездная система*, состоящая из двух об-
рашающихся вокруг друг друга звезд с массами в 30 солнечных. ЗАРЯ посчитала, что в то время как вы летели к Гаргантюа, каждая из этих звезд должна была взорваться, с образованием не вращающейся дыры массой в 24 солнечных (6 солнечных масс газа было выброшено во время схлопывания). Эти две дыры, каждая из которых имеет массу в 24 солнечных, должны теперь вращаться вокруг друг друга как *двойная черная дыра*, и при вращении они должны излучать волны приливных сил (волны «искривления пространства-времени»), которые называются *гравитационными волнами*³⁵. Эти гравитационные волны должны толкать двойную дыру так же, как вылетающая пуля вызывает отдачу стреляющего ружья. Эта «отдача гравитационной волны» стягивает орбиты дыр в медленно, но неумолимо стягивающуюся спираль. Слегка корректируя ускорение вашего звездолета, вы можете добиться того, что время вашего подлета совпадет с последней стадией стягивания спирали, и через несколько дней после вашего прибытия вы сможете увидеть, как горизонты черных дыр наматываются один на другой, все плотнее и плотнее, быстрее и быстрее, пока не сольются в один, вращающийся большой горизонт.

Из-за того что две родительские дыры не вращаются, ни одна из них не может служить источником энергии для вашего поселения. Однако новорожденная, быстро вращающаяся дыра подходит для этого идеально!

Дом

После 42-летнего путешествия ваш звездолет, наконец, замедляется в туманности Ориона, где, как предсказала ЗАРЯ, должны быть две черные дыры. Вот они, там, где и было предсказано! Измеряя орбитальное движение межзвездных атомов при падении на дыры, вы подтверждаете, что их горизонты не вращаются, и что вес каждой из них составляет 24 солнечных массы, согласно предсказанию ЗАРИ.

³⁵ Глава 10.

Каждый горизонт имеет длину окружности в 440 километров, а расстояние между ними равно 50000 километров. Черные дыры обращаются вокруг друг друга один раз за 13 секунд. Подставив эти числа в формулы общей теории относительности для излучения гравитационных волн, вы получаете, что эти две дыры сольются в одну через 7 дней. Вам как раз хватит времени, чтобы команда приготовила аппаратуру для регистрации всех деталей происходящего. Следя за яркими кольцами сфокусированного звездного света, который окружает черные диски черных дыр, команда может легко следить за их движением.

Вам хочется быть поближе к событию, чтобы все хорошо видеть, но достаточно далеко, чтобы быть на безопасном расстоянии от приливных сил дыр. Вы решаете, что орбита звездолета, в десять раз большая орбиты, по которой дыры обращаются вокруг друг друга, будет хорошим выбором — диаметр этой орбиты равен 300000 километров, а длина окружности равна 940000 километров. Карес совершает маневр и выводит звездолет на заданную орбиту, команда начинает видеонаблюдение.

В течение последующих шести дней две дыры постепенно сближаются друг с другом и ускоряют свое орбитальное движение. За день перед слиянием расстояние между ними сократилось от 30000 километров до 18000, а их орбитальный период упал с 13 до 6,3 секунды. За час до слияния они находятся на расстоянии 8400 километров друг от друга, а их орбитальный период равен 1,9 секунды. До слияния остается одна минута: расстояние между ними стало равно 3000 километров, а период уменьшился до 0,41 секунды. Десять секунд до слияния: расстояние 1900 километров, период 0,21 секунды.

Затем в последние десять секунд ваш корабль и ваши тела вдруг начинают вибрировать. Сначала слабо, а потом все сильнее и сильнее. Как будто гигантская пара рук схватила вас за голову и ноги и поочередно сдавливает и растягивает вас все сильнее и сильнее, быстрее и быстрее. А потом еще более неожиданно, чем все это начиналось, тряска прекращается. Все успокаивается.

— Что это было? — шепчете вы ЗАРЕ дрожащим голосом.

— Тише, тише! — успокаивает она, — Это была ондуляционная приливная сила гравитационных волн, появившихся при слиянии дыр. Вы привыкли к таким слабым гравитационным волнам, что их могут зарегистрировать только очень чувствительные приборы, но здесь, вблизи сингулярности, они были необычайно сильны, настолько, что если бы наш звездолет попал на в 30 раз меньшую орбиту, его бы разорвало этими волнами. Но сейчас мы в безопас-

ности. Слияние завершилось, волны ушли дальше во Вселенную, неся далеким астрономам описание симфонии слияния³⁶.

Направляя один из корабельных телескопов на источник гравитации под вами, вы обнаруживаете, что ЗАРЯ, как всегда, права: слияние закончилось. Там, где раньше было две дыры, теперь осталась только одна и, насколько вы можете судить по завихрению падающих атомов, она быстро вращается. Эта дыра будет идеальным генератором энергии для вашей команды и тысяч поколений потомков.

Измеряя орбиту звездного корабля, Карес получает, что масса оставшейся дыры составляет 45 солнечных масс. Поскольку родительские дыры имели массу 48 солнечных масс, 3 солнечных массы должны были превратиться в энергию и унести гравитационными волнами. Неудивительно, что вас так потрянуло!

Пока вы настраиваете остальные телескопы на черную дыру, неожиданно мимо звездолета, щедро разбрасывая во всем направлениях сверкающие искры, проносится маленький объект и затем взрывается, оставив пробоину в борту вашего корабля. Ваша хорошо тренированная команда и роботы спешат к своим боевым местам, а вы судорожно обшариваете пространство в поисках атакующего вражеского корабля. Тогда, отвечая на призыв о помощи, ЗАРЯ успокаивает всех по громкоговорящей системе корабля:

— Тише, тише! На нас никто не нападает, это была ненормальная первичная черная дыра, которая испарялась, а потом схлопнулась³⁷.

— Что-что?! — кричите вы.

— Первичная черная дыра, испарявшаяся, а затем уничтоженная своим схлопыванием, — повторяет ЗАРЯ.

Вы требуете объяснений.

— Что это значит, *первичная*? Что ты подразумеваешь под словами *испарявшаяся и слопнувшаяся*? Это бессмысленно. Предметы могут попадать в черную дыру, но ничто не может выйти оттуда; она не может «испаряться». И потом, черная дыра живет вечно: она все время растет и никогда не уменьшается. Черная дыра не может «схлопнуться» и разрушиться. Это абсурд!

Как всегда терпеливо ЗАРЯ начинает просвещать вас:

— Большие объекты, такие как люди, звезды и черные дыры, образованные схлопыванием звезды, управляются *классическими* законами физики, законами теории относительности Эйнштейна и т.д. Напротив, мелкие объекты, например, атомы, молекулы и черные

³⁶ Глава 10.

³⁷ Глава 12.

дыры, меньшие, чем атом, управляются совершенно другим набором законов, законами *квантовой* физики³⁸. И хотя классические законы запрещают черной звезде нормальных размеров испаряться, уменьшаться, схлопываться или разрушаться, законы квантовой физики диктуют иное. Они требуют, чтобы любая черная дыра атомных размеров постепенно испарялась и уменьшалась до тех пор, пока не достигнет критического размера длины окружности, примерно такого, как ядро атома. Тогда дыра, которая, несмотря на свои крошечные размеры, весит миллиард тонн, разрушается с мощным схлопыванием. Схлопывание преобразует всю массу дыры в миллиард тонн в энергию взрыва, это в триллион раз больше энергии, которая выделяется при самом мощном ядерном взрыве из тех, которые проводили на Земле в XX веке. Как раз такой взрыв поблизости и повредил наш корабль.

— Но не стоит беспокоиться о последующих схлопываниях, — продолжает ЗАРЯ, — такие события случаются исключительно редко, поскольку крошечные черные дыры чрезвычайно редки. Единственный момент, когда такие крошечные дыры могли появиться, был во Вселенной во время Большого взрыва, пятнадцать миллиардов лет тому назад. Именно поэтому их называют *первичными* дырами. Большой взрыв породил только небольшое количество таких первичных черных дыр, и с момента своего рождения они медленно испарялись и уменьшались. Однажды в некоторый момент одна из них достигла минимального размера и схлопнулась³⁹. Это была абсолютная случайность, исключительно маловероятное событие, что такая дыра схлопнулась поблизости от нашего корабля, и абсолютно невероятно, что наш корабль когда-нибудь еще раз встретит другую такую же дыру.

Успокоенный, вы приказываете своей команде приступить к ремонту звездолета, а сами с помощниками настраиваете телескопы для изучения быстро вращающейся под вами черной дыры в 45 солнечных масс.

Вращение дыры очевидно не только благодаря завихрению падающих атомов, но и из-за формы черного пятна, окруженного ярким ободком, который виден на небе под вами: черное пятно выглядит как расплюснутая тыква, у экватора она выпячивается, а на полюсах уплощена. Утолщение и уплощение создаются благодаря центробежной силе вращения черной дыры⁴⁰. Но утолщение не симметрично: с правого края, который удаляется во вращении от вас, выпячивание

³⁸ Главы 4–6, 10, 12–14.

³⁹ Глава 12.

⁴⁰ Глава 7.

диска выглядит больше, чем с левого. ЗАРЯ объясняет, что это происходит потому, что горизонт ловит лучи звездного света гораздо лучше, если они направляются к вам вдоль правой стороны, против направления вращения, чем с левой стороны, где они идут по направлению вращения.

Измерив форму пятна и сравнив результат с формулами общей теории относительности, Брет находит, что угловой момент вращения дыры составляет 96 процентов максимального для дыры такой массы. И зная этот угловой момент и массу дыры в 45 солнечных, вы вычисляете другие свойства дыры, включая скорость вращения ее горизонта — 270 раз в секунду и длину окружности ее экватора — 533 километра.

Вращение дыры интригует. Никогда ранее вам не доводилось так близко наблюдать вращающуюся черную дыру. С угрызениями совести вы вызываете робота-добровольца для исследования окрестности горизонта и передачи на корабль полученных экспериментальных данных. Вы обстоятельно инструктируете робота по имени Колоб: «Спуститесь на десять метров над горизонтом, запустите свои двигатели, чтобы удержаться, располагаясь прямо под звездолетом. Используйте двигатели, чтобы противостоять как гравитационному тяготению, так и завихрению пространства».

Жадный до приключений Колоб покидает звездолет и, устремившись вниз, сначала осторожно запускает свои двигатели, а затем все больше их разгоняет, чтобы преодолеть завихрение пространства, и остаться прямо под кораблем. Сначала Колоб не встречает никаких проблем. Но когда он достигает окружности длиной в 833 километров, на 56 процентов больше горизонта, его лазерный луч приносит послание: «Я не могу преодолеть завихрение, я не могу, я не могу!» И как камень, захваченный смерчем, он затягивается в круговое обращение вокруг дыры⁴¹.

«Не волнуйтесь, — передаете вы. — Старайтесь, как можете, сопротивляться завихрению и продолжайте спускаться, пока вы не будете в 10 метрах над горизонтом».

Колоб подчиняется. По мере своего спуска он захватывается во все более быстрое вращение. В конце концов, когда он заканчивает свой спуск и висит в десяти метрах над горизонтом, он кружится вокруг дыры, почти привязанный к горизонту со скоростью 270 оборотов в секунду. Как бы он не пытался противостоять этому движению, он не может. Завихрение пространства не дает ему остановиться.

⁴¹ Глава 7.

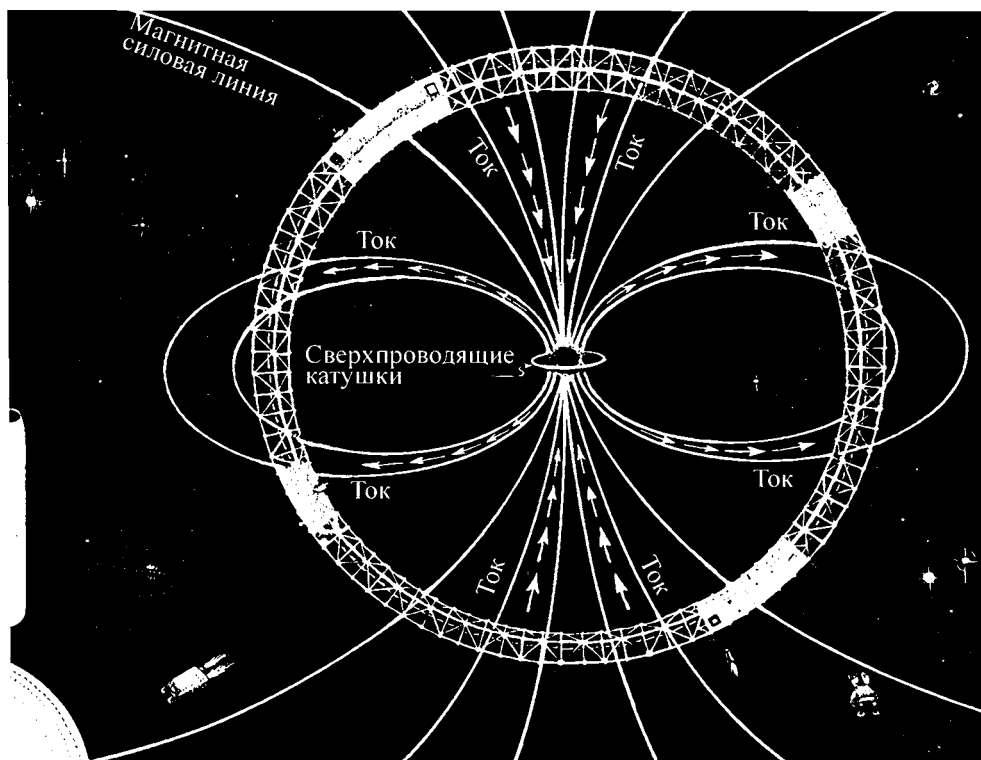
«Развернись в противоположном направлении, — приказываете вы. — Если не получается кружиться медленнее, чем 270 раз в секунду, попробуем кружиться быстрее».

Колоб честно пытается. Он разгоняется, оставаясь в 10 метрах над горизонтом, пытаясь увеличить скорость обращения. Но хотя он ощущает обычное ускорение своих двигателей, вы видите, что его движение не меняется. Он по-прежнему обращается со скоростью 270 оборотов в секунду. А потом прежде чем вы успеваете передать новые инструкции, топливо у него кончается, и он начинает камнем падать вниз. Его лазерный луч связи пробегает весь электромагнитный спектр от зеленого до красного, инфракрасного, радиоволн и пропадает, хотя никакого изменения в круговом движении не заметно. Он ушел вниз, в дыру, падая на жесткую сингулярность, которую вы никогда не увидите.

После трех недель траура, экспериментов и телескопических исследований команда начинает готовиться к будущему. Доставив материал с далеких планет, вы строите балочное кольцо вокруг дыры. Кольцо имеет длину окружности в 5 миллионов километров, толщину в 552 километра и ширину в 4000 километров. Оно вращается с нужной скоростью — два оборота в час, так чтобы уравновесить центробежные силы гравитационной силой в центральном слое кольца, на расстоянии 276 километров от его внутренней и внешней поверхности. Размеры выбраны очень тщательно, так, чтобы те люди, которые предпочитают жить в условиях гравитации, равной гравитации на Земле, могли построить свои дома вблизи внутренней или наружной стороны кольца, в то время как те, кто предпочитает более слабое тяготение, могли бы жить ближе к его центру. Эта разница в гравитации возникает частично благодаря центробежной силе вращающегося кольца, а частично благодаря приливным силам дыры или, говоря на языке Эйнштейна, из-за искривления пространства-времени.

Электрическая энергия, которая нагревает и освещает это кольцо, извлекается из черной дыры: двадцать процентов массы дыры находится в форме энергии, которая запасена в вихре пространства вблизи горизонта с наружной стороны⁴². Эта энергия в 100000 раз больше энергии, которую в виде тепла и света испустило Солнце за весь период своего существования. И поскольку эта энергия находится за пределами горизонта, она может быть извлечена. Неважно, что извлечение энергии в мире кольца имеет максимальную эффектив-

⁴² Главы 7 и 11.



П.6. Город на балочном кольце вокруг вращающейся черной дыры, и электромагнитная система, с помощью которой город извлекает энергию из вращения дыры

ность только 50%, все равно этот источник обеспечивает в 5000 раз больше энергии, чем Солнце.

Энергетический генератор работает по тому же принципу, что и некоторые квазары⁴³. Ваша команда провела через горизонт дыры магнитное поле и удерживает его на дыре, несмотря на неустойчивость с помощью гигантских сверхпроводящих катушек (рис. П.6). При вращении горизонта он вовлекает как в смерче в вихревое движение окружающее пространство, которое, в свою очередь, взаимодействует с пронизывающим его магнитным полем и образует гигантский генератор электрической энергии. Силовые линии магнитного поля работают как линии передачи энергии. Электрический ток выходит из экватора дыры (в виде потока электронов) вверх и вдоль линий магнитного поля направляется к миру кольца. Затем он вытекает из кольца вдоль другого набора силовых линий магнитного поля и опускается вниз на северный и южный полюса дыры (в виде нисходящего потока позитронов). Подбирая силу магнитного поля, населе-

⁴³ Главы 9 и 11.

ние мира может регулировать поток мощности: создавая слабое поле и потребляя мало энергии в ранние годы нового мира и увеличивая поля и расход энергии позже. Постепенно, по мере извлечения энергии, дыра замедляет свое вращение, но, чтобы исчерпать гигантские запасы энергии дыры, потребуется вечность.

Ваша команда и бесчисленные поколения ее потомков могут назвать этот искусственный мир «домом» и использовать его как базу для будущих исследований Вселенной. Но все же это не для вас. Вы тоскуете по Земле и по друзьям, которые остались там, по друзьям, которые должны уже были умереть 4 миллиарда лет тому назад. Ваша тоска настолько глубока, что вы решаетесь рискнуть последней четвертью своего нормального 200-летнего срока жизни и, преодолевая опасности, предпринять, возможно, безрассудную попытку вернуться в идиллическую эпоху вашей юности.

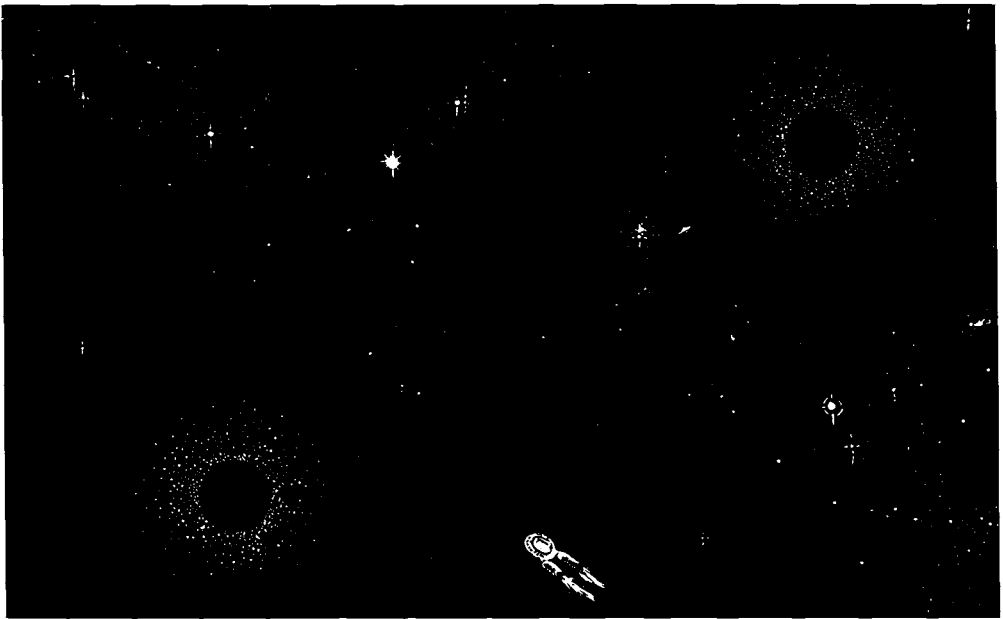
Путешествовать во времени в будущее, как показало ваше путешествие среди черных дыр, довольно просто. Но это не относится к путешествию в прошлое. В действительности, такое путешествие может быть абсолютно запрещено с точки зрения законов фундаментальной физики. Однако ЗАРЯ, вспомнив теоретизирования, относящиеся еще к XX веку, рассказала вам, что путешествие вспять все же возможно с помощью гипотетической свертки пространства, называемой *червоточиной*⁴⁴. Эта свертка пространства состоит из двух «входных» дыр (входных устьев червоточины), которые выглядят как черные дыры без горизонта и которые могут далеко отстоять друг от друга во Вселенной (рис. П.7).

Все что проходит через одно входное устье, попадает в очень короткую трубку (*горловину червоточины*), которая ведет к другому входному устью. Эту трубку нельзя увидеть из нашей Вселенной, потому что она располагается в *гиперпространстве*, а не в нормальном пространстве. ЗАРЯ объясняет, что время идет в червоточине, вероятно, не так, как в нашей Вселенной. Пересекая червоточину в одном направлении, скажем от левого входного устья к правому, можно переместиться назад во времени нашей Вселенной, и, в то же время, двигаясь в обратном направлении, можно перенестись во времени вперед. Такая червоточина будет сверткой не только пространства, но и времени.

Законы квантовой гравитации требуют — утверждает ЗАРЯ, — чтобы существовали чрезвычайно крошечные червоточины такого типа⁴⁵. Эти квантовые червоточины должны быть такими крошечны-

⁴⁴ Глава 14.

⁴⁵ Главы 13 и 14.



П.7. Два входных устья гипотетической червоточины. Войдя в любое из них, вы выйдете из другого, пролетев через короткую трубку (горловину червоточины), которая проходит не в нашей Вселенной, а в гиперпространстве

ми, размером всего 10^{-33} сантиметра, а время их существования настолько быстротечно — 10^{-43} секунды, что их невозможно использовать для путешествия во времени. Они должны внезапно появляться и исчезать в нашем мире совершенно случайным и непредсказуемым образом — здесь, там, везде. Совершенно случайно зародившаяся червоточина может иметь одно входное устье вблизи сегодняшнего дня этого мира кольца, а другое — вблизи Земли 4 миллиарда лет тому назад, когда вы отправились в путешествие. ЗАРЯ предлагает попробовать поймать такую червоточину в момент ее появления, растянуть ее, как дети надувают шары, и поддержать открытой, пока вы пройдете через нее домой, в пору своей юности.

Но ЗАРЯ предупреждает вас о большой опасности. Физики спорили, хотя это и не было никогда доказано, что в момент расширения, когда червоточина превращается в машину времени, она должна самоуничтожиться в гигантской вспышке. Таким образом, Вселенная должна защищаться от парадоксов путешествий во времени, например, от парадокса человека, вернувшегося в прошлое и убившего свою мать до момента своего зачатия, предотвращая, таким образом, саму возможность убить свою мать⁴⁶.

⁴⁶ Глава 14.

Если предположение физиков неверно, то ЗАРЯ сможет достаточно расширить и удержать в течение нескольких секунд устье червоточины, чтобы вы смогли пройти через нее. Ожидая поблизости, пока она расширяет устье червоточины, и затем войдя в ее горловину, вы за долю секунды вашего собственного времени прибудете домой на Землю в эпоху вашей юности 4 миллиарда лет тому назад. Но если машина времени самоуничтожится, вы погибнете вместе с ней. Использовать ли этот шанс — решать вам...

* * *

Сказка, которую я вам рассказал, похожа на научную фантастику. Действительно, частично это так: я никоим образом не могу вам гарантировать, что около звезды Вега существует черная дыра в 10 солнечных масс, или в центре Млечного Пути — дыра в миллион солнечных масс, или то, что вообще где-то во Вселенной есть дыра в 15 триллионов солнечных масс. Все это чисто умозрительные, но возможные фантазии. Не могу также гарантировать, что человечеству когда-либо удастся разработать технику межгалактических или даже межзвездных путешествий, или сконструировать кольцевые миры, расположенные на балочных конструкциях вокруг дыры. Все это тоже умозрительная фантастика.

С другой стороны, я могу гарантировать с большой, но не абсолютной уверенностью, что черные дыры существуют в нашей Вселенной и имеют именно те свойства, которые я описал в своей сказке. Если вы зависнете в разгоняющемся звездном корабле как раз над горизонтом дыры в 15 триллионов солнечных масс, я могу гарантировать, что законы физики будут такими же, что и на Земле, и когда вы взглянете на небеса вокруг себя, вы увидите всю Вселенную, которая светится как сверкающий маленький световой диск. Я гарантирую, что если вы пошлете робота-испытателя вниз к горизонту вращающейся звезды, как бы он не разгонялся, он никогда не сможет двигаться вперед или назад с иной скоростью, чем скорость вращения самой дыры (270 вращений в секунду в моем примере). Я гарантирую, что быстро вращающаяся звезда запасает 29 процентов своей массы в виде энергии вращения, и если найдется умник, он сможет извлечь эту энергию и использовать ее.

Как же я могу уверенно гарантировать все это? Прежде всего я никогда не видел черной дыры. Их не видел никто. Астрономы нашли

только косвенные доказательства существования черных дыр⁴⁷, но нет никаких данных наблюдения их детальных свойств, о которых сообщалось выше. Как же я могу быть столь смелым, чтобы так много всего гарантировать? По одной простой причине. Так же как законы физики предсказывают вид океанских приливов на Земле, время и высоту каждого сильного и каждого слабого прилива, так же эти законы, если мы их правильно понимаем, предсказывают свойства черных дыр, причем предсказывают однозначно. Из ньютоновского описания законов физики с помощью математических расчетов можно получать последовательность земных приливов для 1999 или 2010 г., подобным же образом из общей теории относительности Эйнштейна можно получить с помощью математических расчетов все, что касается свойств черных дыр на горизонте и снаружи его.

А почему я верю, что описание фундаментальных законов физики с помощью общей теории относительности Эйнштейна является очень точным? В конце концов, мы ведь знаем, что ньютоновское описание вблизи черной дыры не является точным.

Успешные описания фундаментальных законов уже содержат в себе вполне определенные указания на те случаи, когда они перестают работать⁴⁸. Ньютоновское описание само говорит нам, что, вероятно, оно не работает вблизи черной дыры (хотя то, что это следует из ньютоновского описания, мы поняли только в XX веке). Подобным же образом общая теория относительности Эйнштейна содержит уверенность в самой себе для областей вне черной дыры, на горизонте дыры и внутри дыры на всем расстоянии почти (но не совсем) до сингулярности в ее центре. Это одно обстоятельство, которое придает мне уверенность в предсказаниях общей теории относительности. Другим фактом является то, что хотя предсказания общей теории относительности о черных дырах пока еще не были непосредственно проверены, было множество высокоточных проверок проявлений других ее особенностей на Земле, в Солнечной системе и в двойных системах, содержащих компактные экзотические звезды, называемые пульсарами. Общая теория относительности прошла через все испытания с развевающимися знаменами.

В течение последних тридцати лет я участвовал в изысканиях теоретической физики, которые и дали наше современное представление о черных дырах, а также в исследованиях по проверке предсказаний астрономическими наблюдениями. И пусть мой личный

⁴⁸ Последний параграф главы 1.

вклад был скромн, но вместе с моими коллегами физиками и астрономами я наслаждался атмосферой поиска и изумлялся зарождающемуся новому пониманию. Эта книга — попытка передать это мое чувство восхищения и изумления читателям, которые не являются специалистами в физике и астрономии.

РЕАЛЬНОСТЬ ПРОСТРАНСТВА И ВРЕМЕНИ

глава, в которой Эйнштейн разрушает абсолютное пространство и время Ньютона

Профессору Вильгельму Оствальду,
Лейпцигский университет,
Лейпциг, Германия

13 апреля 1901

Высокочитимый господин Профессор!

Пожалуйста, простите отца, который позволил себе обратиться к Вам, высокочитимый господин Профессор, в интересах своего сына.

Я начну с того, что моему сыну Альберту 22 года, что он учился в Цюрихском политехническом колледже 4 года и сдал этим летом дипломные экзамены по физике и математике на «отлично». С тех пор он безуспешно пытается получить должность ассистента, что позволило бы ему продолжить его образование в области теоретической и экспериментальной физики. Такую возможность, честно говоря, он заслуживает благодаря своим способностям. Смеем заверить Вас, что он — необыкновенно трудолюбивый, прилежный и упорный, страстно любит свою науку.

Таким образом, мой сын чувствует себя совершенно несчастным и с каждым днем укрепляется в мысли, что лишен возможности заниматься любимым делом и никому не нужен. К тому же его тяготит мысль, что он обременяет нас, людей скромного достатка.

Поскольку именно Вас, высокочитимый господин Профессор, мой сын, по-видимому, уважает и почитает больше, чем любого другого преподавателя, занимающегося сейчас физикой, именно к Вам я решаюсь обратиться, покорнейше прося прочесть его статью, опубликованную в *Annalen für Physik*, и написать ему, по возможности, несколько слов одобрения, чтобы вдохновить его жить и работать далее.

Если, кроме того, Вы сможете предоставить ему должность ассистента этой или следующей осенью, моя благодарность не будет знать границ.

Я еще раз прошу Вас простить меня за то, что я дерзнул написать Вам, смею только заметить, что мой сын ничего не знает о моем поступке.

Остаюсь искренне Ваш, высокочитимый господин Профессор,

Герман Эйнштейн

Это действительно был для Альберта Эйнштейна период депрессии. Он не имел работы в течение восьми месяцев, с тех пор как окончил Цюрихский политехнический колледж в 21 год, и чувствовал себя неудачником.

В политехническом колледже (обычно называемом «ЕТН», по первым буквам немецкого названия) Эйнштейн обучался у нескольких физиков и математиков, имевших мировую известность, но не слишком ладил с ними. На рубеже веков научный мир состоял в основном из Профессоров (с большой буквы), требовавших и предполагавших почтения к себе, чему Эйнштейн не особенно следовал. Он с детства восставал против авторитетов, постоянно задавая неудобные вопросы и ничего не принимая на веру без самостоятельной проверки. «Бездумное поклонение авторитетам есть злейший враг истины», — утверждал он. Наиболее известный из двух его профессоров в ЕТН Генрих Вебер жаловался с раздражением: «Ты умный мальчик, Эйнштейн, очень умный мальчик, но у тебя один большой недостаток: ты не даешь возможности ничего тебе рассказать». Другой его преподаватель, профессор физики Жан Перне, даже спрашивал Альберта, не лучше ли ему вместо физики заняться изучением медицины, права или филологии. «Ты можешь поступать, как хочешь, — говорил Перне. — Я лишь предупреждаю тебя в твоих же собственных интересах».

Ситуацию усугубляло не слишком серьезное отношение Эйнштейна к лекциям. «Они просто должны запихать все это в наши головы перед экзаменами, хотим мы того или нет», — говорил он позднее. Его профессор математики, Герман Минковский, о котором мы много будем говорить в главе 2, был настолько недоволен отношением Эйнштейна к занятиям, что называл его лентяем.

Но лентяем Эйнштейн не был. Он просто подходил к лекциям избирательно: некоторые курсы посещал полностью, другие игнорировал, предпочитая заниматься самостоятельно, выбирая предметы по своему усмотрению и размышляя. Размышления увлекали его, приносили радость и удовлетворение; он сам учил себя «новой» физике, той физике, о которой Герман Вебер вообще не упоминал в своих лекциях.

Абсолютное пространство и время Ньютона и эфир

«Старая» физика — та, о которой Эйнштейн мог узнать от Вебера, представляла собой большую совокупность знаний, которую я буду называть *ньютоновской* физикой, не потому, что вся она при-

1. РЕАЛЬНОСТЬ ПРОСТРАНСТВА И ВРЕМЕНИ

надлежала Исааку Ньютону (это, конечно, не так), а потому, что именно Ньютон заложил в XVII столетии ее фундамент.

В конце XIX века все разнообразие явлений физической Вселенной прекрасно объяснялось простым набором *ньютоновских физических законов*. Например, все явления, связанные с гравитацией, можно было объяснить с помощью *ньютоновских законов движения и тяготения*:

- Любое тело движется равномерно и прямолинейно, если на него не действуют силы.
- Если на тело действует сила, его скорость меняется с ускорением, пропорциональным этой силе и обратно пропорциональным массе тела.
- Между любыми двумя телами во Вселенной действует гравитационная сила, которая пропорциональна произведению их масс и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними.

Применяя математические выкладки¹ к этим трем законам, физики XIX столетия могли объяснить орбиты планет вокруг Солнца, орбиты спутников вокруг планет, максимумы и минимумы океанских приливов, падение камней. Они даже могли определить массу Солнца и Земли. Аналогично, используя набор законов электромагнетизма, физики могли объяснить молнию, магниты, радиоволны, а также распространение, преломление и отражение света.

Удача и слава сопутствовали тем, кто сумел использовать законы ньютоновской физики в технике. Манипулируя законами термодинамики, Джеймс Ватт показал, как простейший паровой двигатель, изобретенный ранее, превратить в практичное устройство, получившее его имя. Внимательно изучая работы Джозефа Генри о законах электричества и магнетизма, Сэмюель Морзе создал коммерческую версию телеграфа.

Изобретатели и физики вместе гордились полнотой своего понимания. Казалось, все на Земле и в небесах подчиняется ньютоновским физическим законам, а власть этих законов давала людям власть над окружающим их миром и, возможно, однажды должна была дать им власть над всей Вселенной.

* * *

Все старые, хорошо изученные ньютоновские законы и их применение в технике Эйнштейн мог изучить на лекциях Генриха Вебе-

¹ Читатели, желающие понять, что значит применять математические выкладки к законам физики, могут найти обсуждение этого вопроса в разделе «Примечания» в конце книги.

ра, и изучить хорошо. Действительно, в течение нескольких первых лет в ЕТН Эйнштейн был в восторге от Вебера. Единственной женщиной на его курсе в ЕТН, Милеве Марич (в которую он был влюблен), он писал в феврале 1898 г.: «Вебер читает мастерски. Я с нетерпением предвкушаю каждую новую лекцию».

Но на четвертом курсе Эйнштейн почувствовал растущее неудовлетворение. Вебер преподавал только *старую* физику. Он полностью игнорировал некоторые из наиболее важных достижений последних десятилетий, включая открытие Джеймсом Кларком Максвеллом нового изящного набора уравнений электромагнетизма, из которого можно было вывести *все* электромагнитные явления: поведение магнитов, электрических разрядов, электрических цепей, радиоволны и свет. Эйнштейн вынужден был сам изучать единую теорию электромагнетизма Максвелла, читая новейшие книги, написанные физиками в других университетах, и можно предположить, что он не замедлил сообщить об этом Веберу. Его отношения с Вебером испортились.

В ретроспективе ясно, что из того, что Вебер игнорировал в своих лекциях, наиболее важным были появившиеся свидетельства трещин в фундаменте ньютоновской физики, фундаменте, кирпичами и цементом которого были концепции абсолютного пространства и абсолютного времени.

Абсолютное пространство Ньютона было тем самым пространством, с которым мы имеем дело в повседневной жизни, пространством, имеющим три измерения: восток-запад, север-юг, верх-низ. Из повседневного опыта, очевидно, что существует одно и только одно такое пространство. Это пространство, в котором находятся все люди, Солнце, все планеты и звезды. Все мы движемся через это пространство по различным путям и с разными скоростями, но, независимо от нашего движения, пространство одинаково для всех нас. Это пространство дает нам ощущение длины, ширины и высоты, и, независимо от нашего движения, все мы должны получать одинаковые результаты при измерении длины, ширины и высоты одного и того же объекта, если только все мы измеряем их достаточно точно.

Абсолютное время Ньютона — это наше обычное время, время, которое неумолимо движется вперед, вызывая наше старение, время, которое можно измерять высококачественными часами или вращением Земли и движением планет. Это время, течение которого одинаково для всего человечества, для Солнца, для планет и звезд. Согласно Ньютону, период обращения планеты или продолжительность речи политика должны быть одинаковы для любого из нас, независимо от нашего движения, если только все мы пользуемся для измерения достаточно точными часами.

1. РЕАЛЬНОСТЬ ПРОСТРАНСТВА И ВРЕМЕНИ

Если бы ньютоновская концепция абсолютного пространства и времени вдруг оказалась разрушена, рухнула бы и вся система физических законов Ньютона. К счастью, год за годом, десятилетие за десятилетием, век за веком основные концепции Ньютона оставались неизблемыми, и на их основе один триумф следовал за другим во всех областях науки, от астрономии до электричества и термодинамики. До 1881 г., когда Альберт Майкельсон начал измерять скорость распространения света, не было даже намека на малейшую трещину в этом фундаменте.

Казалось очевидным, и законы Ньютона требовали этого, что если кто-то измеряет скорость света (или чего-то еще), то результат должен зависеть от того, как он сам движется. Если наблюдатель покоится в абсолютном пространстве, то он должен увидеть, что свет движется с одинаковой скоростью во всех направлениях. И наоборот, если наблюдатель сам движется сквозь абсолютное пространство, скажем, на запад, то должен увидеть, что свет, распространяющийся с востока на запад, замедляется, а свет, распространяющийся с запада на восток, ускоряется, так же как пассажир поезда, идущего на запад, видит, что птицы, летящие на запад, летят медленнее, а птицы, летящие на восток, — быстрее.

Для птиц скорость их движения устанавливает воздух. Отталкиваясь крыльями от воздуха, птицы одного вида движутся с одинаковой максимальной скоростью сквозь воздух, независимо от направления полета. Аналогично и для света, согласно ньютоновской физике, должна существовать субстанция, называемая *эфиром*, которая устанавливает его скорость распространения. Отталкиваясь электрическим и магнитным полем от эфира, свет должен распространяться всегда с одной и той же универсальной скоростью через эфир, независимо от направления. И поскольку эфир (согласно концепции Ньютона) покоится в абсолютном пространстве, покоящийся наблюдатель получит одинаковую скорость света для всех направлений, в то время как движущийся наблюдатель получит различные скорости света.

Учтем теперь, что Земля движется через абсолютное пространство, хотя бы потому, что она вращается вокруг Солнца. Она движется в одном направлении в январе и в противоположном шесть месяцев спустя, в июне. Соответственно, мы на Земле можем измерить разницу в скорости света в различных направлениях, и эта разница должна изменяться в течение года, хотя изменение это и очень невелико (примерно на 0,01%), поскольку по сравнению со светом Земля движется очень медленно.

Проверка этого предсказания была отличной задачей для физиков-экспериментаторов. Двадцативосьмилетний американец Альберт Майкельсон попытался решить ее в 1881 г., используя созданный им прибор (называемый теперь «интерферометр Майкельсона»²), обладающий рекордной точностью. Но несмотря на все усилия, Майкельсон не смог обнаружить никаких признаков того, что скорость света меняется с направлением. Скорость света оказалась одинаковой *всегда и во всех направлениях*, как в его первой серии экспериментов, которые он провел в Потсдаме (Германия) в 1881 г., так и в последующей серии, которую Майкельсон провел в Кливленде (США, штат Огайо) вместе с химиком Эдвардом Морли в 1887 г. и которая отличалась гораздо большей точностью. Реакция самого Майкельсона на этот результат была сочетанием эйфории от сделанного открытия и беспокойства по поводу возможных следствий. Генрих Вебер, как и большинство физиков того времени, вообще отнесся к его результатам скептически.

Это было объяснимо. Интересные эксперименты обычно невероятно сложны — настолько сложны, что независимо от того, насколько тщательно они проводятся, ошибочный результат все равно возможен. Незначительное отклонение в работе установки, ничтожное неучтенное изменение ее температуры или колебание пола под ней может повлиять на конечный результат. Поэтому неудивительно, что и сейчас, так же как в конце XIX века, физики сталкиваются с тем, что результаты чрезвычайно сложных экспериментов порою противоречат друг другу или устоявшимся представлениям об устройстве Вселенной и ее физических законах. Свежим примером могут служить опыты, в которых, якобы, была обнаружена «пятая сила» (взаимодействие, которое не описывает современная, чрезвычайно успешная физическая теория), и другие опыты, показавшие, что такой силы нет. Проводились также эксперименты, в которых, как было заявлено, наблюдался «холодный термоядерный синтез» (явление, запрещенное обычными законами, если только физики правильно понимают эти законы), хотя другие эксперименты показывали, что этого не происходит. Почти всегда результаты, противоречащие устоявшимся представлениям, ошибочны. Тем не менее, иногда они все же оказываются верными и тогда становятся началом переворота в нашем понимании природы.

Одной из отличительных черт выдающегося физика является способность чувствовать, каким результатам можно доверять, а ка-

² Глава 10.

1. РЕАЛЬНОСТЬ ПРОСТРАНСТВА И ВРЕМЕНИ

ким — нет, и на какие именно эксперименты следует обратить внимание. Техника будет совершенствоваться, любые эксперименты будут повторяться снова и снова, и истина неизбежно выяснится. Однако тот, кто хочет внести свой вклад в развитие науки и связать свое имя с великими открытиями, должен как можно раньше распознавать, какие результаты заслуживают доверия.

Несколько выдающихся физиков конца XIX века проверяли работы Майкельсона и пришли к выводу, что и конструкция установки, и сами измерения были сделаны чрезвычайно тщательно. Чутье говорило им, что это эксперимент высочайшего класса. Может быть, решили они, что-то действительно неверно в самой основе ньютоновской физики. В отличие от них, Генрих Вебер и большинство остальных физиков были уверены в том, что со временем дальнейшие исследования поставят все на свои места, и ньютоновская физика восторжествует, как это уже много раз случалось. Раз так, не стоит даже упоминать эти опыты в университетских лекциях и морочить студентам головы.

Ирландский физик Джордж Ф. Фицджеральд был первым, кто по достоинству оценил результаты Майкельсона—Морли и стал анализировать их следствия. Сравнивая их с результатами других экспериментов, он пришел к неожиданному выводу, что ошибочным является понимание физиками того, что такое «длина» и, соответственно, что-то может быть неверным в ньютоновской концепции абсолютного пространства. В короткой статье, опубликованной в американском журнале *Science* в 1889 г., он, в частности, писал:

Я с огромным интересом прочитал о прекрасных, высокоточных измерениях Майкельсона и Морли... Их результат кажется противоречащим результатам других экспериментов... Я полагаю, практически единственным предположением, которое способно снять это противоречие, является то, что длина материальных тел меняется в зависимости от того, как они движутся через эфир [через абсолютное пространство], на величину, зависящую от квадрата отношения скорости их движения к скорости света.

Ничтожное (на пять миллиардных долей) уменьшение размера в направлении движения Земли действительно могло объяснить нулевой результат опытов Майкельсона—Морли. Но признать наличие такого эффекта означало отказаться от существовавшего у физиков понимания поведения материи: среди известных сил не было такой, которая могла бы вызвать сжатие предметов в направлении их движения, даже на такую маленькую величину. Согласно существовавшему представлению о свойствах пространства и молекулярных сил

внутри твердых тел, равномерно движущееся твердое тело всегда должно сохранять свою форму и размеры по отношению к абсолютному пространству, не зависимо от того, как быстро оно движется.

Хендрик Лоренц в Амстердаме тоже поверил результатам опытов Майкельсона—Морли. Кроме того, он принял всерьез предположение Фицджеральда о том, что движущиеся предметы сокращаются. Фицджеральд, узнав об этом, написал Лоренцу письмо с выражением благодарности, поскольку, как он писал, «я сам слегка посмеивался над своими взглядами». В поисках лучшего понимания Лоренц и, независимо, Анри Пуанкаре в Париже (Франция), а также Джозеф Лармор в Кембридже (Англия) заметили одну особенность в законах электромагнетизма, которая замечательно согласовывалась с идеей Фицджеральда о сокращении движущихся тел.

Если записать уравнения Максвелла для электрических и магнитных полей, измеренных наблюдателем, покоящимся в абсолютном пространстве, они принимают особенно простой и красивый вид. В частности, из одного из уравнений следует, что магнитные силовые линии не имеют начала и конца, т. е. всегда являются замкнутыми (см. рис. 1.1а,б). С другой стороны, если записать те же уравнения, но для полей, измеряемых движущимся наблюдателем, они становятся гораздо более сложными и невыразительными. Например, получалось, что большинство магнитных силовых линий должны оставаться замкнутыми, но некоторые из них, вследствие этого движения, обрываются. Хуже того, если, например, экспериментатор начнет трясти магнит, то его силовые линии должны обрываться, затем срастаться, потом снова обрываться и так далее (см. рис. 1.1в).

Математическая теория, предложенная Лоренцом, Пуанкаре и Лармором, позволяла сделать уравнения электромагнетизма в системе движущегося наблюдателя красивыми, такими же, как и для наблюдателя, покоящегося в абсолютном пространстве. Магнитные силовые линии оставались замкнутыми при любых обстоятельствах. И для того чтобы придать уравнениям Максвелла простой и красивый вид, нужно было, вопреки принципам Ньютона, считать, что все движущиеся тела сокращаются в направлении своего движения на величину, в точности совпадающую с той, которая была нужна Фицджеральду для объяснения результатов Майкельсона—Морли!

Если бы фицджеральдовское сокращение было единственной «новой физикой», необходимой для того, чтобы сделать простоту и красоту законов электромагнетизма универсальной, Лоренц, Пуанкаре и Лармор с их интуитивной верой в то, что законы физики *должны быть красивыми*, возможно, отказались бы от принципов



В покое в абсолютном пространстве

На движущейся Земле
[на рисунке: Концы силовых линий]

- 1.1. Следствия одного из уравнений Максвелла, описывающих электромагнетизм, с точки зрения физики XIX века (ньютоновской физики). (а) Концепция магнитных силовых линий. Если положить стержневой магнит под лист бумаги, на котором рассыпаны металлические опилки, можно увидеть изображение силовых линий магнитного поля. Каждая линия выходит из северного полюса магнита, огибает его, входит в южный полюс и, проходя через магнит, замыкается. Таким образом, силовые линии — это замкнутые кривые, у которых нет начала и конца. С точки зрения математики утверждение о том, что магнитные силовые линии не имеют начал и концов — это одно из уравнений Максвелла в его простейшей и наиболее красивой форме. (б) Согласно ньютоновской физике, уравнение в такой форме справедливо вне зависимости от того, что наблюдатель делает с магнитом (например, даже если он трясет его изо всех сил) *до тех пор, пока сам наблюдатель покоится относительно абсолютного пространства*. Ни одна силовая линия не имеет начала или конца с точки зрения того, кто неподвижен. (в) С точки зрения наблюдателя на поверхности Земли, которая движется через абсолютное пространство, все выглядит гораздо сложнее. Даже если его магнит спокойно лежит на столе, некоторые силовые линии (примерно одна на сто миллионов) будут разорваны. Если наблюдатель будет трясти магнит, другая часть силовых линий (примерно одна из триллиона) будет разрываться и вновь замыкаться в процессе тряски. Хотя обрыв одной из ста миллионов и, тем более, из триллиона силовых линий — это слишком мало, чтобы такой эффект мог быть обнаружен в экспериментах XIX века, сам факт, что уравнения Максвелла предсказывают его, казался противостественным Лоренцу, Пуанкаре и Лармору

Ньютона и твердо поверили бы в существование такого сокращения. Но его было недостаточно. Чтобы сделать уравнения красивыми, надо было считать, что время для движущегося через пространство наблюдателя течет медленнее, чем для того, который находится в покое. Вышло, что движение «замедляет» время.

Здесь законы ньютоновской физики были недвусмысленны. Время должно быть абсолютно. Оно течет равномерно и неумолимо, с одинаковой скоростью для всех наблюдателей, независимо от их движения. Если ньютоновские законы верны, то движение не может вызвать замедление времени, так же как оно не может вызвать сокращение длины. К сожалению, точность часов, существовавших в конце

XIX века, была совершенно недостаточна для проверки. Перед лицом научного и технического триумфа ньютоновской физики, триумфа, который был основан на абсолютности пространства, Лоренц, Пуанкаре и Лармор отступили.

Эйнштейн, будучи студентом в Цюрихе, был еще не готов взяться за решение столь сложных проблем, но он уже начинал размышлять о них. Своей подруге Милеве Марич (роман с которой становился у него все серьезнее) он писал в августе 1899 г.: «Я все более и более убеждаюсь, что электродинамика движущихся тел в ее сегодняшнем виде неверна». В течение последующих шести лет, становясь все более зрелым физиком, он будет исследовать эту проблему и идти к пониманию реальности сокращения длины и замедления времени.

В отличие от Эйнштейна Вебер не интересовался столь сомнительными исследованиями. Он продолжал читать лекции о ньютоновской физике так, как будто все шло своим чередом и не существовало даже намека на трещины в ее фундаменте.

* * *

В конце своего обучения в ЕТН Эйнштейн наивно предполагал, что, поскольку он умен и не так уж плохо сдавал экзамены (средний балл 4,91 из 6,00), ему будет предложена должность ассистента-физика в ЕТН под руководством Вебера и что он, как это обычно случалось, сможет использовать эту должность как ступень лестницы в научный мир. Будучи ассистентом он мог бы начать самостоятельные научные исследования и через несколько лет получить степень доктора философии.

Но этого не случилось. Из четырех студентов, сдавших выпускной экзамен по объединенной физико-математической специальности в августе 1900 г., трое получили должности ассистентов-математиков в ЕТН, а четвертый — Эйнштейн не получил ничего. Вместо него Вебер взял в ассистенты двух студентов с инженерного факультета.

Эйнштейн продолжал свои попытки получить должность. В сентябре он пытался получить освободившееся место ассистента-математика в ЕТН, но ему отказали. Зимой он писал Вильгельму Оствальду в Лейпциг (Германия), Генриху Камерлинг-Оннесу в Лейден (Голландия). От них он вообще не удостоился ответа, хотя сейчас его письмо Камерлинг-Оннесу выставлено в музее Лейдена, а именно Оствальд десятью годами позже был первым, кто выдвинул Эйнштейна кандидатом на Нобелевскую премию. Даже письмо его отца, адресованное Оствальду, по-видимому, осталось без ответа.

1. РЕАЛЬНОСТЬ ПРОСТРАНСТВА И ВРЕМЕНИ

Энергичной и волевой Милеве Марич, отношения с которой быстро развивались, Эйнштейн писал 27 марта 1901 г.: «Я совершенно уверен, что во всем виноват Вебер. Бессмысленно писать кому-то еще из профессоров, поскольку они, конечно же, в какой-то момент обратятся к Веберу за информацией обо мне, и он даст очередную плохую рекомендацию». Своему близкому другу Марселю Гроссману он писал 14 апреля 1901 г.: «Я давно бы нашел должность ассистента, если бы не коварство Вебера. Но я не собираюсь опускать руки и терять чувство юмора. Бог создал осла и наделил его толстой шкурой».

Ослиная шкура очень пригодилась бы Эйнштейну в это время. Мало того, что он безрезультатно пытался найти работу, его родители были твердо настроены против его брака с Милевой, а выяснение отношений проходило очень бурно. Его мать писала о Милеве: «Из-за этой мисс Марич я пережила самые горькие часы в моей жизни. Если бы это было в моих силах, я сделала бы все, чтобы она исчезла с нашего горизонта. Я терпеть ее не могу». Милева о матери Эйнштейна писала следующее: «Эта леди, по-видимому, сделала целью своей жизни отравить существование не только мне, но и своему сыну. Я и не думала, что есть такие бессердечные и злые люди!»

Эйнштейн отчаянно стремился вырваться из финансовой зависимости от своих родителей, обрести душевный покой и возможность отдавать львиную долю своих сил физике. Возможно, следовало поискать что-то иное, кроме должности ассистента в университете. Полученное в ЕТН образование позволяло ему преподавать в *гимназии* (в старших классах), чем он и стал заниматься: в середине мая ему удалось получить временную работу в высшей технической школе в Винтертуре (Швейцария), где он замещал преподавателя математики, призванного на службу в армию.

Эйнштейн писал Альфреду Штерну, своему бывшему профессору истории в ЕТН: «Я вне себя от радости, поскольку сегодня я получил сообщение, что решение [о том, что меня принимают на работу преподавателем] принято. Я не имею ни малейшего представления, кто тот добродетель, который рекомендовал меня туда, поскольку, как мне говорили, меня нет в списке хороших учеников ни у кого из моих бывших учителей».

Работа в Винтертуре, за которой осенью 1901 г. последовала другая временная должность — преподавателя в высшей школе в Шаффхаузене (Швейцария) и, наконец, место «технического эксперта третьего класса» в Швейцарском патентном бюро в Берне, обеспечили ему независимость и стабильность.



Слева: Эйнштейн за своим столом в патентном бюро в Берне, Швейцария, около 1905 г.

Справа: Эйнштейн с женой Милевой и сыном Хансом Альбертом, около 1904 г. [Фото слева любезно предоставлено Архивом Альберта Эйнштейна Еврейского университета Иерусалима; правое — Швейцарским литературным архивом / Архивом Общества Эйнштейна]

Несмотря на продолжающиеся проблемы в его личной жизни (длительный разрыв с Милевой; рождение у них внебрачного ребенка в 1902 г., которого, судя по всему, они отдали на усыновление, возможно, для того, чтобы спасти карьеру Эйнштейна в пуританской Швейцарии; его женитьба на Милеве год спустя, вопреки воле его родителей), Эйнштейн сохранил бодрость духа и ясный ум. Он продолжал серьезно заниматься физикой. В 1901–1904 годах он продемонстрировал свои способности физика-теоретика исследованиями межмолекулярных сил в жидкостях, таких, как вода, и в металлах, а также работами, посвященными природе теплоты. Его новое понимание этих явлений, оказавшееся чрезвычайно важным, нашло отражение в серии из пяти статей, опубликованных в самом престижном журнале начала XX века *Annalen der Physik*.

Работа в патентном бюро в Берне хорошо подходила Эйнштейну. В его обязанности входило определять, может ли заявленное изобретение найти применение. Это было приятное занятие, обострявшее его чутье. В то же время эта работа оставляла свободными половину каждого рабочего дня и все выходные. Большую часть этого времени

1. РЕАЛЬНОСТЬ ПРОСТРАНСТВА И ВРЕМЕНИ

он проводил в изучении физики и размышлениях о ней, как правило, прямо посреди семейной суеты.

Его способность к сосредоточению вопреки любым отвлекающим факторам была описана студентом, который побывал у него дома через несколько лет после его брака с Милевой: «Он сидел в кабинете перед горой бумаг, покрытых математическими формулами. Продолжая вести записи правой рукой и держа своего младшего сына в левой, он отвечал на вопросы своего старшего сына Альберта, который играл рядом в кубики. Со словами «подождите минутку, я почти закончил», он на какое-то время оставил детей на мое попечение, а сам погрузился в работу».

В Берне Эйнштейн был изолирован от других физиков (хотя у него было несколько друзей, не занимающихся физикой, с которыми он обсуждал науку и философию). Для большинства физиков такая изоляция была бы губительной. Но отличие его интеллекта состояло в том, что он работал более плодотворно в одиночестве, чем в атмосфере научного сообщества.

Иногда все же общение помогало Эйнштейну — но не потому, что оно предполагало новые точки зрения или ценную информацию, а потому, что он сам, объясняя проблемы и парадоксы, лучше понимал их. Особенно помогал ему Микеланджело Бессо — итальянский инженер, который был сокурсником Эйнштейна в ЕТН и который работал вместе с ним в патентном бюро. Эйнштейн говорил о Бессо: «Лучшего слушателя я не смог бы найти во всей Европе».

Относительные пространство и время Эйнштейна и абсолютная скорость света

Особенно помог Микеланджело Бессо в мае 1905 г., когда Эйнштейн после нескольких лет, посвященных другим физическим проблемам, вернулся к электродинамике, уравнениям Максвелла и заманчивой гипотезе о сокращении длины и замедлении времени. В поисках смысла, заключенного в этой гипотезе, он наткнулся на барьер в сознании, преодолеть который ему помогло общение с Бессо. Позднее он вспоминал: «Это был замечательный день, когда я пришел к Бессо и сказал ему: “У меня есть одна проблема, в которой я никак не могу разобраться. Сегодня я пришел, чтобы вместе решить ее”. Мы долго беседовали, и внезапно я понял, в чем тут дело. На следующий день я снова пришел к Бессо и вместо приветствия сказал ему: “Спасибо! Я нашел правильное решение”».

Решение Эйнштейна состояло в следующем: *Нет ни абсолютного пространства, ни абсолютного времени. Ньютонковский фундамент, на котором была построена вся физика, треснул. А что касается эфира, то его просто не существует.*

Отрицая абсолютное пространство, Эйнштейн сделал совершенно бессмысленным само представление о «состоянии покоя в абсолютном пространстве». Невозможно обнаружить движение Земли через абсолютное пространство, заявил он, и именно поэтому результаты опытов Майкельсона—Морли таковы, каковы они есть. Скорость движения Земли можно измерить только *относительно других тел*, таких как Солнце или Луна, точно так же, как скорость поезда может быть измерена лишь относительно каких-то материальных объектов, например, земли или воздуха. Ни к Земле, ни к поезду, ни к чему-то другому не может быть применено понятие абсолютного движения; движение всегда относительно.

Отрицая абсолютное пространство, Эйнштейн также отверг утверждение, что все наблюдатели, независимо от своего движения, должны получать одинаковые результаты при измерении длины, ширины и высоты одного и того же стола, поезда и любого другого объекта. Наоборот, утверждал он, *длина, ширина и высота — это относительные понятия*. Их величины зависят от относительного движения измеряемого объекта и того, кто производит измерения.

Отрицая абсолютное пространство, Эйнштейн отрицал и то, что течение времени одинаково для всех, вне зависимости от того, кто как движется. *Время относительно*, заявил он. Для людей и предметов, движение которых отличается, оно также течет по-разному.

От таких утверждений появляется ощущение, что почва уходит из-под ног. Действительно, они не только подрывали основы всей ньютоновской физики, но и противоречили повседневному опыту, привычным представлениям о пространстве и времени.

Но Эйнштейн оказался не только разрушителем, но и созидателем. Взамен старого фундамента физики он построил новый, не менее прочный, который, как оказалось, гораздо точнее соответствует реальному устройству мира. Этот фундамент состоял из двух основных принципов.

- *Принцип абсолютности скорости света*: Независимо от своей природы пространство и время должны быть таковы, чтобы скорость света была абсолютно одинакова во всех направлениях и совершенно не зависела от движения тех, кто ее измеряет.

1. РЕАЛЬНОСТЬ ПРОСТРАНСТВА И ВРЕМЕНИ

Этот принцип означал, что результат экспериментов Майкельсона—Морли верен и, независимо от того, насколько точнее станет техника измерения скорости света в будущем, он останется прежним: скорость света постоянна.

- *Принцип относительности:* Законы физики любой природы должны быть одинаковы для любой системы и независимы от ее движения (в физике принято говорить: «в любой системе отсчета»).

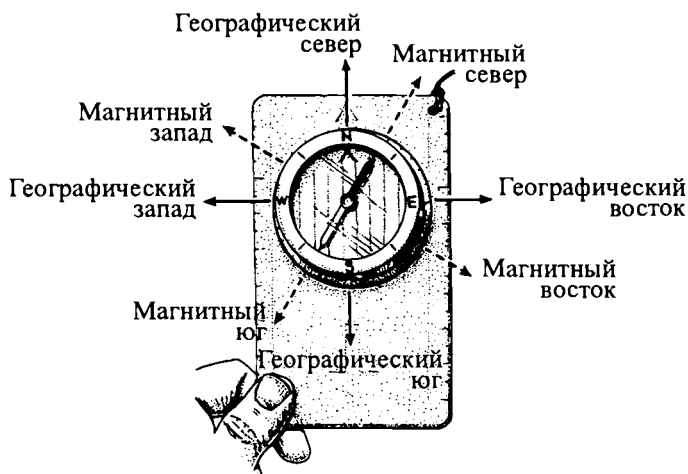
Этот принцип исключал возможность существования абсолютного пространства, поскольку, если бы законы физики были различны в различных системах отсчета (например, относительно Земли и относительно Солнца), физики могли бы выбрать «предпочтительную систему» (скажем, связанную с Солнцем) и определить относительно нее состояние «абсолютного покоя». Таким образом, понятие абсолютного пространства снова вкрадывалось бы в физику. Далее мы еще вернемся к этой проблеме.

Исходя из абсолютности скорости света, Эйнштейн вывел изящное заключение, иллюстрация которого приведена на Врезке 1.1, и суть его в том, что, если мы с Вами движемся друг относительно друга, то *то, что я называю пространством, оказывается смесью вашего пространства и вашего времени, а то, что вы считаете пространством, есть смесь моего пространства и моего времени.*

Это «перемешивание пространства и времени» аналогично перемешиванию направлений на Земле. Природа дает два способа определения направлений: один связан с осью вращения Земли, а другой — с ее магнитным полем.

В Пасадене (Калифорния) направление на магнитный северный полюс, определенное по стрелке магнитного компаса, сдвинуто к востоку от направления на географический северный полюс (направления вдоль оси вращения Земли) примерно на 20 градусов (см. рис. 1.2). Это означает, что для того чтобы плыть к магнитному северному полюсу, надо частично (на 80 процентов) плыть на север и частично (на 20 процентов) — на восток. В этом смысле *магнитный север есть смесь географического севера и географического востока*, аналогичным образом, географический север можно считать смесью магнитного севера и магнитного запада.

Для того чтобы понять, что такое перемешивание пространства и времени (*то, что я называю пространством, оказывается смесью вашего пространства и вашего времени, а то, что вы считаете пространством, есть смесь моего пространства и моего времени*), представьте себе, что у вас есть спортивный автомобиль. Вы мчитесь



1.2. Магнитный север можно считать смесью географического севера и географического востока, а географический север — смесью магнитного севера и магнитного запада

посреди ночи по бульвару Колорадо в Пасадене (Калифорния) с огромной скоростью, а я, полицейский, в это время дежурю на обочине. Вы установили на крышу машины конструкцию, на которой закреплены петарды, так что первая из них оказалась над капотом, а последняя — над багажником (см. рис. 1.3а). Вы подвели к петардам электрическое зажигание и хотите взорвать их одновременно в тот момент, когда будете проезжать мимо моего полицейского поста.

На рис. 1.3б приведена диаграмма, которая иллюстрирует ситуацию с вашей точки зрения. По вертикали откладывается время, измеряемое вами («ваше время»), а по горизонтали — расстояние, измеряемое вами вдоль вашей машины («ваше пространство»). Поскольку все петарды неподвижны в вашем пространстве (закреплены на вашей машине), следовательно, течение вашего времени оставляет в вашем пространстве их на одних и тех же расстояниях. Этому соответствуют штриховые линии на диаграмме, по одной для каждой петарды. Они тянутся вертикально, снизу вверх, не отклоняясь ни вправо, ни влево, и обрываются на одной высоте, которая соответствует моменту взрыва. Каждое такое событие (взрыв петарды) изображено звездочкой.

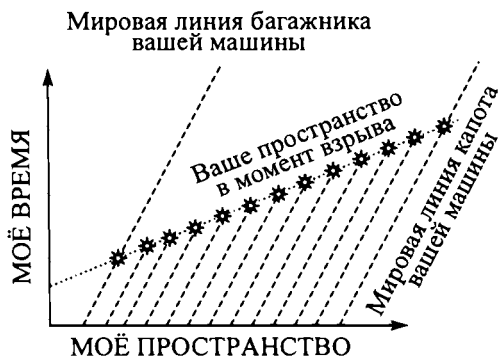
Такой рисунок, на котором горизонтальное направление изображает пространство, а вертикальное — время, называется *пространственно-временной диаграммой*. Штриховые линии на нем называются *мировыми линиями*, потому что они показывают, как петарды «путешествуют по миру» в процессе течения времени. Далее в этой книге мы будем часто пользоваться пространственно-временными диаграммами и мировыми линиями.



а



б



в

- 1.3. (а) Ваша спортивная машина несется по бульвару Колорадо с закрепленными на крыше петардами. (б) Пространственно-временная диаграмма движения и взрывов петард с вашей точки зрения (движущейся вместе с машиной). (в) Пространственно-временная диаграмма, показывающая то же движение и взрывы петард с моей точки зрения (покоящейся на полицейском посту)

Движение по горизонтали на этой диаграмме соответствует движению через пространство в фиксированный момент вашего времени. Поэтому можно считать, что любая горизонтальная линия изображает пространство, как его видите вы («ваше пространство») в некоторый момент времени. Например, пунктирная линия на рисунке — это ваше пространство в момент взрыва петард. Движение по вертикали на диаграмме соответствует движению по времени в фиксированной точке вашего пространства. Соответственно, удобно считать, что каждая вертикальная линия на пространственно-временной диаграмме (например, мировая линия петард) — это изображение течения вашего времени в некоторой точке вашего пространства.

Я, стоя на посту у обочины бульвара Колорадо, тоже рисую пространственно-временную диаграмму (рис. 1.3в) вашей машины, ваших петард и их взрывов, но эта диаграмма будет отличаться от вашей. Я буду откладывать время, измеренное мной, по вертикали, а расстояние вдоль бульвара Колорадо — по горизонтали. С течением времени каждая петарда перемещается вдоль бульвара Колорадо вместе с вашей машиной с большой скоростью, соответственно, мировая линия каждой петарды на диаграмме будет наклонена вправо: к

моменту своего взрыва петарда оказывается дальше от начала бульвара, чем в предыдущие моменты времени.

Далее, неожиданным следствием вывода об абсолютности скорости света, сделанного Эйнштейном, является то, что петарды взрываются *в разные моменты времени* с моей точки зрения, несмотря на то, что для вас это происходит одновременно. Для меня петарда над багажником вашей машины взрывается первой, а петарда над капотом — последней. Соответственно, пунктирная линия, которую мы назвали «вашим пространством в момент взрыва», оказалась наклоненной на моей пространственно-временной диаграмме (рис. 1.3в).

Из рис. 1.3в ясно, что для того чтобы перемещаться по вашему пространству, в ваш момент взрыва (вдоль пунктирной линии), я должен двигаться одновременно и по своему пространству, и по своему времени. В этом смысле ваше пространство есть смесь моего пространства и моего времени. Это полностью аналогично утверждению о том, что магнитный север — это смесь географического севера и географического востока (ср. рис. 1.3в и 1.2).

Вы можете заявить, что «смесь пространства и времени» есть ни что иное, как сложный, запутанный способ объяснения того, что одновременность или неодновременность событий зависит от того, как движется наблюдатель. Это верно, но физики, развивая теорию Эйнштейна, пришли к выводу, что такой способ описания является очень продуктивным. Он помог им разобраться в теории Эйнштейна (его новых законах физики) и, более того, вывести из нее такие потрясающие вещи, как черные дыры, червоточины, сингулярности, временные складки и машины времени.

Из абсолютности скорости света и принципа относительности Эйнштейн вывел другие примечательные свойства пространства и времени. Используя наш пример с гоночным автомобилем, можно сказать, что:

- Эйнштейн показал, что, если вы мчитесь на восток по бульвару Колорадо, я увижу, что ваше пространство и все, что в нем покоится (машина, петарды и вы сами), сжимается в направлении восток-запад, но не изменяется в направлениях север-юг и верх-низ. Это и есть сокращение длины, о котором догадался Фицджеральд, только теперь оно получило свое объяснение: это сокращение вызвано свойствами пространства и времени, а не какими-либо физическими силами, действующими на движущуюся материю.
- Аналогично, Эйнштейн показал, что, если вы мчитесь на восток, то для вас мое пространство и все, что покоится в нем

1. РЕАЛЬНОСТЬ ПРОСТРАНСТВА И ВРЕМЕНИ

(бульвар Колорадо, его обочина и я), сжимается в направлении восток-запад, но не изменяется в направлениях север-юг и верх-низ. То, что вы видите, что сжимаюсь я, а я вижу, что сжимаетесь вы, может показаться несколько странным, но на самом деле иначе и быть не может: принцип относительности требует, чтобы ваше движение относительно меня и мое относительно вас были полностью равноправны.

- Эйнштейн показал также, что, когда вы будете проезжать мимо меня, я увижу, что ваше время замедляется. Часы на панели вашего автомобиля будут тикать реже, чем на моей руке! Вы будете говорить медленнее, чем обычно, ваши волосы будут расти медленнее, вы будете стареть медленнее меня.

В соответствии с принципом относительности, проезжая мимо меня, вы заметите, что замедлилось течение *моего* времени. Вы увидите, что часы на моей руке тикают реже, чем те, что на панели вашего автомобиля. Для вас я буду говорить медленнее обычного, мои волосы будут медленнее расти, и стареть я буду медленнее вас.

Как могу я увидеть замедление вашего времени, когда вы видите замедление моего? Нет ли здесь логического противоречия? И почему вы видите, что сокращается мое пространство, а я вижу, что сокращается ваше? Разгадка кроется в том, что относительна одновременность. События, которые одновременны с вашей точки зрения, не будут одновременными для меня, и именно это расхождение приведет к тому, что различное течение времени и сокращение пространства в вашей и в моей системе отсчета будут находиться в полном логическом соответствии. Тем не менее, наглядная демонстрация этого соответствия потребовала бы еще несколько страниц, которые я собираюсь пропустить, отослав вас к Главе 3 книги Тейлора и Уилера (1992).

Почему же мы в своей повседневной жизни никогда не замечаем столь странного поведения пространства и времени? Причина этого в нашей медлительности. Скорости, с которыми мы движемся друг относительно друга, всегда намного меньше скорости света (299792 километров в секунду). Даже если ваша машина будет нестись по бульвару Колорадо со скоростью 150 километров в час, я увижу, что ваше время замедлилось (а пространство сжалось) лишь примерно на одну стотриллионную часть (1×10^{-14}), слишком мало, чтобы мы действительно могли это заметить. С другой стороны, если бы ваша машина могла двигаться со скоростью в 87% от скорости света, то я (используя, конечно, специальные, быстродействующие инструменты) обнаружил бы, что ваше время стало вдвое медленнее моего, а вы

наблюдали бы, что мое время течет в два раза медленнее вашего. Я видел бы, что ваша машина стала вдвое короче, а вы увидели бы, что вдвое короче стали предметы вокруг вашей машины. То, что пространство и время ведут себя именно таким образом, было многократно подтверждено различными экспериментами в конце XX века.

Врезка 1.1

Перемешивание пространства и времени: доказательство Эйнштейна

Принцип абсолютности скорости света, предложенный Эйнштейном, приводит к перемешиванию пространства и времени, или, другими словами, он приводит к тому, что одновременность становится относительной. Если вы



мчитесь по бульвару Колорадо на спортивной машине, то события, которые одновременны с вашей точки зрения (которые в вашем пространстве происходят в один и тот же момент времени), не будут одновременными для меня, стоящего на обочине. Я буду доказывать это, используя подписи на пространственно-временных диаграммах,



расположенных ниже. Это доказательство по сути такое же, как то, которое было придумано Эйнштейном в 1905 г.

Поставьте точно посередине на крышу вашей машины мигалку и включите ее. Будем считать, что она вспыхнула один раз, и свет от ее вспышки излучился вперед и назад. По-

скольку свет в обоих направлениях был излучен одновременно, распространялся с одинаковой скоростью (скорость света абсолютна), а измеренное вами расстояние от мигалки до переднего и заднего краев машины одинаково, то с вашей точки зрения свет достигнет их одновременно (верхняя диаграмма). Таким образом, два события: приход света к переднему и заднему краю машины (назовем их А и В соответственно) одновременны с вашей точки зрения и произошли в тот же момент, когда вами был зафиксирован взрыв петард (см. рис. 1.3).

Теперь давайте рассмотрим распространение света и события А и В с моей точки зрения. Взгляните на нижнюю диаграмму. С моей

точки зрения задний край вашей машины двигался вперед, навстречу свету от мигалки, и для меня они встретились раньше, чем для вас. Аналогично, передний край машины «убегал» от света, и с моей точки зрения свет достиг его позже, чем это увидели вы. Здесь принципиально то, что и для вас и для меня свет двигался с одной и той же скоростью, и эта скорость была одинакова во всех направлениях, т. е. важна абсолютность скорости света. Таким образом, я буду считать, что событие *Б* произошло раньше, чем *А*, и соответственно, увижу, что петарды над багажником вашей машины взрываются раньше, чем над капотом.

Обратите внимание, что положение взрывов на диаграмме (ваше пространство в один и тот же момент времени) такое же, как и на диаграмме на рис. 1.3. Это подтверждает факт перемешивания пространства и времени, о котором мы говорили.

Как удалось Эйнштейну прийти к столь неожиданному описанию пространства и времени?

Он не анализировал результаты экспериментов. Часы того времени были недостаточно точны, чтобы обнаружить замедление времени и расхождения, касающиеся одновременности, при доступных тогда скоростях не существовало и методов измерения длины, способных зафиксировать ее сокращение. Единственными опытами, имевшими отношение к данной проблеме, были эксперименты Майкельсона—Морли и им подобные, которые показывали, что скорость света на поверхности Земли может быть одинаковой во всех направлениях. Конечно же, этой информации было слишком мало, чтобы на ее основании полностью изменить свои представления о пространстве и времени! Более того, известно, что Эйнштейн не обращал особого внимания на эти опыты. Вместо этого он опирался на свое собственное, интуитивное представление о том, как природа *должна* быть устроена. После долгих размышлений ему стало очевидно, что скорость света должна быть универсальной константой, не зависящей от направления и движения чего-либо. Лишь в этом случае, понял он, уравнения Максвелла для электромагнетизма становятся универсальными, простыми и красивыми (и соответственно, «магнитные силовые линии всегда остаются замкнутыми»). Он был твердо убежден, что Мироздание должно быть основано на простых и красивых законах. Поэтому абсолютность скорости света он сделал новым принципом, на котором должна базироваться вся физика.

* * *

Этот принцип уже сам по себе гарантировал, что система физических законов Эйнштейна будет принципиально отличаться от нью-

тоновской. В ньютоновской физике, где пространство и время были абсолютны, скорость света должна быть относительной и зависеть от того, как движутся источник света и наблюдатель (вспомните пример с птицей и поездом), тогда как Эйнштейн, предположив, что скорость света абсолютна, пришел к выводу, что относительны пространство и время. Согласившись с относительностью пространства и времени, он, стремясь к простоте и красоте физических законов, пришел к своему принципу относительности: Не существует предпочтительного вида движения (например, покоя в абсолютном пространстве); для законов физики все виды движения одинаковы.

Для создания основ новой физики Эйнштейну оказались ненужными не только экспериментальные данные, но и идеи других физиков. Он вообще не обращал особого внимания на то, что делали другие ученые. Похоже, он вообще не читал ни одну из важных технических статей Хендрика Лоренца, Анри Пуанкаре, Джозефа Лармора и других, написанных в период с 1896 по 1905 гг. и посвященных пространству, времени и эфиру.

В этих статьях и Лоренц, и Пуанкаре, и Лармор, так же как и Эйнштейн, продвигались к пересмотру существовавших представлений о пространстве и времени, но для них это продвижение было блужданием в тумане, состоящем из заблуждений, навязанных им ньютоновской физикой. Эйнштейн, напротив, оказался способен отбросить эти заблуждения. Его убежденность в том, что природа любит простоту и красоту, его готовность следовать этому убеждению даже тогда, когда это подрывало основы ньютоновской физики, позволила ему, в отличие от остальных, мыслить ясными и четкими понятиями и привела его к созданию нового описания пространства и времени.

Принцип относительности будет играть важную роль далее в этой книге. Поэтому я хочу посвятить несколько страниц его подробному объяснению.

Для такого объяснения мне потребуется понятие *системы отсчета*. Система отсчета — это лаборатория, содержащая все измерительные приборы, которые могут потребоваться для проведения любых экспериментов. Эта лаборатория и все ее оборудование должны двигаться через Вселенную как одно целое, иными словами, все ее части должны двигаться одинаково. Основным является именно то, как движется система отсчета. Когда физики говорят о «различных системах отсчета», они имеют в виду системы отсчета, которые по-разному движутся, а вовсе не лаборатории с разным оборудованием.

Лаборатория и приборы системы отсчета не обязательно должны быть реальными. Они, естественно, могут быть воображаемыми, суще-

1. РЕАЛЬНОСТЬ ПРОСТРАНСТВА И ВРЕМЕНИ

ствующими лишь в сознании физика, который, например, задает вопрос: «Если бы я, находясь на борту космического корабля, летящего в поясе астероидов, стал измерять размер одного из них, что бы у меня получилось?». Этот физик просто представляет себе, что у него есть система отсчета (лаборатория), связанная с космическим кораблем, и что он использует приборы в этой лаборатории для проведения своих измерений.

Эйнштейн сформулировал свой принцип относительности не для произвольных систем отсчета, а для совершенно определенного класса систем: систем (лабораторий), на которые не действуют никакие внешние силы и которые, следовательно, движутся свободно (по инерции), сохраняя свое движение равномерным, таким, как оно было вначале. Такие системы Эйнштейн назвал инерциальными, поскольку их движение определяется исключительно их инерцией.

Система отсчета, связанная с взлетающей ракетой (лаборатория внутри этой ракеты), *не* является инерциальной, поскольку ее движение определяется как инерцией, так и реактивной тягой. Эта тяга приводит к тому, что движение ракеты не равномерно. Система отсчета, связанная с космическим челноком, который входит в земную атмосферу, также неинерциальна, поскольку трение между обшивкой челнока и молекулами воздуха тормозит челнок, делая и его движение неравномерным.

Самое главное, рядом с любым массивным телом, например, таким, как Земля, *все* системы отсчета оказываются под воздействием гравитационного тяготения. Экранировать систему отсчета (так же, как и любой другой предмет) от гравитационного тяготения невозможно. Таким образом, ограничиваясь лишь инерциальными системами отсчета, тогда, в 1905 г., Эйнштейн исключил из рассмотрения физические проблемы, в которых была важна гравитация¹; он рассматривал идеализированную модель Вселенной, в которой гравитации вообще не было. Предельные идеализации, подобные этой, чрезвычайно важны для прогресса в физике: вначале мы отбрасываем свойства Вселенной, которые слишком сложны для рассмотрения, и возвращаемся к ним, лишь полностью разобравшись с оставшимися более простыми. Эйнштейн завершил свое описание идеализированной Вселенной, лишенной гравитации, в 1905 г. После этого он взялся за более сложную

¹ Это значит, что с моей стороны было несколько некорректно использовать в качестве примера спортивный автомобиль, также находящийся под воздействием земного тяготения. Однако поскольку это тяготение направлено перпендикулярно направлению движения автомобиля (вниз), то, оказывается, что оно не влияет на эффекты, которые обсуждались в этом примере.

задачу: описание свойств пространства и времени в нашей реальной Вселенной, в которой есть гравитация. В результате он пришел к заключению, что гравитация искажает пространство и время.

Понимание того, что такое система отсчета, дает нам возможность более глубоко и точно сформулировать принцип относительности Эйнштейна: *Если какой-либо физический закон получен применительно к измерениям в одной инерциальной системе отсчета, то применительно к измерениям в любой другой инерциальной системе отсчета этот закон должен иметь точно такую же математическую и логическую форму.* Другими словами, с точки зрения законов физики все инерциальные системы отсчета (или все виды равномерного движения) одинаковы. Приведем в качестве примера два физических закона, чтобы сделать это более понятным:

- «Любое свободное тело (такое, на которое не действуют никакие силы), которое изначально находилось в состоянии покоя, будет всегда оставаться в покое. Любое свободное тело, которое в инерциальной системе отсчета изначально двигалось, будет продолжать двигаться прямолинейно с постоянной скоростью.» Поскольку у нас есть все основания считать, что данная релятивистская формулировка первого закона Ньютона справедлива, по крайней мере, в одной инерциальной системе отсчета, то, согласно принципу относительности, она должна быть справедлива во всех остальных таких системах, независимо от того, в каком месте Вселенной они находятся и как быстро они движутся.
- Уравнения Максвелла должны иметь одинаковую форму во всех системах отсчета. В ньютоновской физике найти такую форму не удавалось (и как следствие, магнитные силовые линии оказывались замкнутыми в одних системах отсчета и разорванными в других), что глубоко беспокоило Лоренца, Пуанкаре, Лармора и Эйнштейна. Для Эйнштейна было совершенно неприемлемо то, что эти уравнения были просты и красивы в системе отсчета, связанной с эфиром, но оказывались сложными и уродливыми в остальных, движущихся относительно эфира системах отсчета. Перестроив основы физики, Эйнштейн добился того, что уравнения Максвелла приобрели одинаковую, простую и красивую форму в любой системе отсчета (и магнитные силовые линии были всегда замкнуты) в соответствии с его принципом относительности.

Принцип относительности на самом деле является *метапринципом*, в том смысле, что это не отдельный физический закон, а общее

1. РЕАЛЬНОСТЬ ПРОСТРАНСТВА И ВРЕМЕНИ

правило, которому (как утверждал Эйнштейн) должны удовлетворять *все* законы физики, вне зависимости от того, какие это законы и от того, описывают ли они электричество и магнетизм, атомы и молекулы, паровые машины или спортивные автомобили. Значение этого *метапринципа* огромно. Именно им следует проверять все новые законы. Если новый закон проходит такую проверку (одинаков во всех системах отсчета) то, возможно, он действительно описывает какие-то свойства нашей Вселенной. Если же он не выдерживает такой проверки, то, согласно Эйнштейну, он неверен и должен быть отвергнут.

Весь наш опыт, приобретенный в течение ста лет, прошедших с 1905 г., подтверждает правоту Эйнштейна. Все новые законы, которые успешно описывают реальную Вселенную, полностью удовлетворяют принципу относительности Эйнштейна. Этот принцип стал во главе физических законов.

* * *

В мае 1905 г., после того, как беседа с Микеланджело Бессо позволила Эйнштейну преодолеть барьер в собственном сознании и отказаться от абсолютного пространства и времени, он всего за несколько недель сформулировал основные принципы новой физики и вывел следствия, касающиеся природы пространства, времени, электромагнетизма и поведения быстро движущихся объектов. Два следствия были особенно впечатляющими: во-первых, масса может преобразовываться в энергию (это стало основой для создания атомной бомбы; см. главу 6), во-вторых, инерция любого тела по мере приближения его скорости к скорости света растет так сильно, что какая бы сила на него ни действовала, оно никогда этой скорости не достигнет («ничто не может двигаться быстрее света»)⁴.

В конце июня Эйнштейн написал статью с описанием своих идей и их следствий и послал ее в *Annalen der Physik*. Статья носила несколько приземленный заголовок «К электродинамике движущихся тел». Но приземленной ее назвать было нельзя. Даже поверхностный взгляд показывал, что «технический эксперт третьего класса» швейцарского патентного бюро Эйнштейн предлагает совершенно новый фундамент для всей физики, предлагает метапринцип, которому должны подчиняться все будущие законы физики, что он полностью пересматривает представления о пространстве и времени и выводит

⁴ Пояснения см. в гл. 14.

из этого впечатляющие следствия. Эта теория вскоре стала известна как *специальная теория относительности* (специальной она была названа потому, что не учитывала влияние гравитации и корректно описывала Вселенную в тех «специальных» случаях, когда этим влиянием можно было пренебречь).

Статья Эйнштейна была получена в офисе *Annalen der Physik* в Лейпциге 30 июня 1905 г., отправлена на рецензию, признана приемлемой и опубликована.

В течение нескольких недель после ее выхода Эйнштейн жил ожиданием отклика от величайших физиков тех дней. Его точка зрения и результаты были столь революционны и к тому же имели так мало экспериментальных подтверждений, что он ожидал споров и жесткой критики. Вместо этого ответом было полное молчание. Наконец, несколько месяцев спустя пришло письмо из Берлина: Макс Планк желал получить пояснения по некоторым техническим вопросам. Эйнштейн был вне себя от радости: ему удалось привлечь внимание Планка, одного из самых знаменитых среди живых физиков. Еще больше Эйнштейна воодушевило то, что годом позже Планк начал использовать его принцип относительности как основной инструмент в своих собственных исследованиях. Одобрение Планка, постепенное одобрение других ведущих физиков и, в первую очередь, его собственная непоколебимая уверенность в собственной правоте пригодились Эйнштейну в последующие двенадцать лет, когда споры вокруг его теории, как он и ожидал, не утихали. Эти споры даже в 1922 г. были еще настолько сильны, что когда секретарь Шведской Академии наук уведомил его телеграммой о том, что он удостоен Нобелевской премии, в телеграмме было явно указано: работы, за которые он награждается, *не включают* теорию относительности.

Споры окончательно прекратились в тридцатых годах, когда развитие техники сделало возможной экспериментальную проверку предсказаний специальной теории относительности. Что касается нашего времени, то сомнениям уже просто не осталось места: каждый день 10^{17} электронов в ускорителях частиц в Стэнфорде, Церне и других местах разгоняются до скоростей, составляющих 0,999999995 скорости света, и их поведение при этих сверхвысоких скоростях находится в полном соответствии с релятивистскими законами физики Эйнштейна. Например, инерция электронов увеличивается по мере приближения их скорости к скорости света, не давая им превысить ее, а когда такие электроны сталкиваются с мишенью, они рожают быстро движущиеся частицы, называемые мю-мезонами, которые живут всего 2,22 микросекунды по своему собственному времени, но, в силу

1. РЕАЛЬНОСТЬ ПРОСТРАНСТВА И ВРЕМЕНИ

замедления времени, существуют более 100 микросекунд по часам лаборатории.

Характер физических законов

Означает ли успех специальной теории относительности Эйнштейна то, что мы должны полностью отказаться от законов Ньютона? Вовсе нет. Эти законы по-прежнему широко используются и в повседневной жизни, и в большинстве областей науки и техники. Мы не обращаем никакого внимания на замедление времени, когда планируем авиаперелет, а инженеры не учитывают сокращение длины при конструировании самолетов. Эти эффекты слишком слабы для того, чтобы их учитывать.

Конечно, при желании можно использовать законы Эйнштейна вместо законов Ньютона и в повседневной жизни. Их предсказания совпадают практически точно для всех физических явлений, поскольку в повседневности мы имеем дело лишь с относительными перемещениями со скоростями малыми по сравнению со скоростью света.

Предсказания Эйнштейна и Ньютона начинают сильно отличаться лишь при относительных скоростях, приближающихся к скорости света. Только в этом случае необходимо отказаться от законов Ньютона и строго следовать теории Эйнштейна.

Это пример проявления весьма общей схемы, схемы, с которой мы еще встретимся в последующих главах. Эта схема повторялась много раз в истории физики XX века: вначале один набор законов (в нашем случае законы Ньютона) становится общеупотребительным, поскольку он находится в прекрасном согласии с экспериментами. Но через какое-то время эксперименты становятся точнее и оказывается, что этот набор законов хорошо работает лишь в ограниченной области — *области применимости* (для ньютоновской физики это область малых по сравнению со скоростью света скоростей). Физики начинают бороться с помощью экспериментов и развития теории за понимание того, что происходит на границе области применимости и, в конце концов, формулируют новый набор законов, успешно работающий и внутри, и на границе, и за границами данной области. И этот процесс повторяется снова и снова. Мы встретимся с таким повторением в следующих главах: провал специальной теории относительности в случае, когда важную роль играет гравитация и замена ее *общей теорией относительности* (гл. 2); провал общей теории относительности при описании сингулярности внутри черной дыры и замена ее новой теорией, называемой *квантовой гравитацией* (гл. 13).

Примечательно, что при каждом переходе от старых законов к новым физикам (если они были достаточно проницательны) не требовались какие-либо экспериментальные указания на то, где перестают работать старые законы, где именно проходит граница их области применимости. Мы уже наблюдали это применительно к ньютоновской физике: уравнения Максвелла не гармонизировали с концепцией абсолютного пространства. В покоящейся системе отсчета (относительно эфира) уравнения Максвелла были просты и красивы, например, они предсказывали, что магнитные силовые линии всегда замкнуты. В движущейся системе отсчета они становились сложными и некрасивыми, получалось, что силовые линии иногда обрываются. Правда, это практически не влияло на их предсказания, если система отсчета двигалась по отношению к эфиру со скоростью много меньшей скорости света; в этом случае почти все магнитные силовые линии оставались замкнутыми. Лишь при скоростях, приближающихся к скорости света, следствия сложной и некрасивой формы становились доступными для экспериментальной проверки («оборванных» линий становилось много). Поэтому было логично предположить, даже без экспериментов Майкельсона—Морли, что область применимости ньютоновской физики ограничена скоростями, малыми по сравнению со скоростью света, и что ее законы могут нарушаться для тел, скорость которых приближается к световой.

Аналогично, в главе 2 мы увидим, как специальная теория относительности предсказывает собственный провал в присутствии гравитации, и в главе 13 узнаем, как общая теория относительности предсказывает свой провал вблизи сингулярностей.

Рассматривая эту последовательность (ньютоновская физика, специальная теория относительности, общая теория относительности) и схожие последовательности законов, описывающих строение материи и элементарных частиц, большинство физиков пришли к убеждению, что эти последовательности сходятся к набору абсолютных законов, действительно *управляющих* Вселенной. Эти законы делают Вселенную такой, какая она есть, и описывают все явления в ней: и появление морозных узоров на окнах, и ядерные реакции в недрах Солнца, и гравитационные волны, возникающие при столкновении черных дыр, и так далее.

Можно возразить, что каждый следующий набор законов «выглядит» слишком непохожим на предыдущий. (Например, абсолютное время в ньютоновской физике не имеет ничего общего с множеством собственных времен в специальной теории относительности.) О какой же сходимости можно тогда говорить? Ответ состоит в том, что

1. РЕАЛЬНОСТЬ ПРОСТРАНСТВА И ВРЕМЕНИ

необходимо четко различать предсказания, которые следуют из данного набора законов, и используемые им модели (то, как он «выглядит»). Я предполагаю сходимость именно в смысле предсказаний, поскольку только они имеют значение. Отличие моделей (одно абсолютное время в ньютоновской физике вместо многих собственных времен в теории относительности) не играет роли для того, что происходит в действительности. На самом деле можно полностью изменить «вид» законов, не меняя их предсказаний. Я буду обсуждать этот важный момент в главе 11, где приведу примеры и объясню, как их использовать для понимания истинной природы вещей.

Почему я предполагаю такую сходимость? Потому что все свидетельствует в ее пользу. Каждая новый набор законов имеет большую область применимости, чем предыдущая: ньютоновская физика работает всюду в повседневной жизни, но не применима для проектирования ускорителей частиц и описания экзотических объектов в далеком космосе, таких как пульсары, квазары и черные дыры; общая теория относительности Эйнштейна применима и к повседневной жизни, и к ускорителям, и вообще всюду во Вселенной за исключением внутренних областей черных дыр и Большого взрыва, в результате которого родилась наша Вселенная; может оказаться, что квантовая гравитация (которую мы еще не понимаем как следует) вообще работает везде и всюду.

В своем изложении я буду неявно предполагать, что окончательный набор физических законов (который пока нам неизвестен, но которым может оказаться квантовая гравитация) действительно существует, и ему действительно подчиняется все и везде во Вселенной. Эти законы делают Вселенную такой, какая она есть. Если бы я стремился быть предельно точным, я должен был бы сказать, что законы, с которыми мы имеем дело (например, общая теория относительности), — это «приближение» к истинным законам или их «приближенное описание». Однако обычно я буду это опускать, не делая различия между истинными законами и теми «приближенными», с которыми мы будем работать. В этих случаях я буду утверждать, например, что «законы общей теории относительности (а не истинные законы) заставляют черную дыру столь крепко удерживать свет, что он не может покинуть ее горизонт». Именно так мыслю я и мои коллеги, когда стараемся понять устройство Вселенной. Это плодотворный способ мышления, он помог новому, глубокому пониманию сжимающихся звезд, черных дыр, гравитационных волн и других явлений.

Эта точка зрения не совместима с бытующим представлением о том, что физики работают с *теориями*, которые пытаются описать

Вселенную, но сами придуманы людьми и не имеют реальной власти над Вселенной. Слово *теория* настолько сильно ассоциируется с предположениями и человеческими ухищрениями, что я буду стараться его не использовать⁵. Вместо этого я буду употреблять словосочетание *физический закон*, которое прочно ассоциируется с реальным управлением Вселенной. Именно физические законы делают наш мир таким, какой он есть.

⁵ В русском языке законы Эйнштейна называются «общая теория относительности» и «специальная теория относительности», тогда как в английском (“general relativity“, “special relativity”) эквивалент слова «теория» (“theory”) отсутствует. Мы сохраним принятые у нас названия, в остальных же случаях, следуя автору, употребления слова «теория» будем избегать. [Прим. пер.]

ИСКРИВЛЕНИЕ ПРОСТРАНСТВА И ВРЕМЕНИ

глава, в которой Герман Минковский объединяет пространство и время, а Эйнштейн их искривляет

Абсолютное пространство-время Минковского

Представление о пространстве и времени, которое я хочу раскрыть перед вами, уходит корнями в экспериментальную физику, и в этом его сила. Да, оно революционно. Отныне пространство и время по отдельности отступают на второй план, и лишь их единый континуум будет рассматриваться как независимая реальность.

Этимися словами Герман Минковский представил в сентябре 1908 г. новое открытие, касающееся природы пространства и времени.

Эйнштейн показал, что пространство и время «относительны». Размеры предметов и течение времени отличаются, если рассматривать их из различных систем отсчета. Мое время отличается от вашего, если я движусь относительно вас, мое пространство также отличается от вашего. Мое время — это смесь вашего времени и вашего пространства; мое пространство — это смесь вашего пространства и вашего времени.

Основываясь на работе Эйнштейна, Минковский пришел к выводу, что Вселенная представляет собой четырехмерную пространственно-временную структуру, и что эта структура является абсолютной, а не относительной, поскольку она одинаково выглядит во всех системах отсчета (правда, не совсем ясно, как «взглянуть» на нее). Лучше сказать, что она существует независимо от систем отсчета.

Идею, лежащую в основе открытия Минковского, хорошо иллюстрирует притча, позаимствованная мной из книги Тейлора и Уилера (1992 г.).

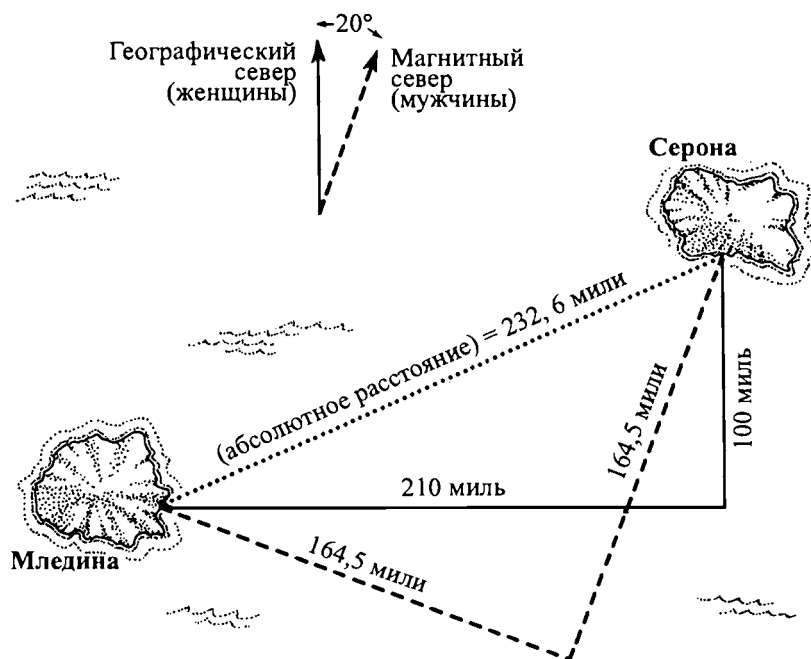
Давным-давно на острове Мледина посреди Восточного моря жил народ, у которого были очень странные традиции и табу. Каждый год в июне, когда наступал самый долгий день в году, все мужчины острова садились на громадный парусник и отправлялись на далекий священный остров Серона, где жила огромная ученая жаба. Всю ночь, как зачарованные, слушали они ее удивительные рассказы о звездах и галактиках, о пульсарах и квазарах. На следующий день мужчины возвращались на Мледину, преисполненные вдохновения, которое поддерживало их в течение всего следующего года.

И каждый год в декабре, когда начиналась самая долгая ночь, на священный остров Серона отправлялись женщины Мледины. И весь следующий день слушали они волшебную жабу, после чего возвращались домой и целый год жили под впечатлением ее рассказов.

Строжайшее табу запрещало женщинам Мледины говорить с кем-либо из мужчин о своем путешествии на Серону и о рассказах ученой жабы. Такое же табу было наложено на мужчин. Никто из них не имел права посвящать женщин в детали своего ежегодного плавания.

Летом 1905 г. радикально настроенный молодой человек по имени Альберт, который не признавал табу своих соплеменников, нашел и показал всем жителям Мледины, мужчинам и женщинам, две священные карты. По одной из них жрица острова направляла корабль во время женского плавания зимой, другую использовал священник, руководивший мужским походом летом. Какой позор испытали мужчины, когда их священная карта была выставлена на обозрение, какой стыд почувствовали женщины! Но еще больше были поражены они все, когда оказалось, что карты разные! Согласно картам женщины должны были следовать 210 миль на восток, затем 100 миль на север, в то время как мужчинам надлежало в восточном направлении пройти лишь 164,5 мили и затем ровно столько же в северном. Как могло быть такое? Ведь было известно, что и мужчины, и женщины должны получать вдохновение от одной и той же священной жабы, которая всегда находится на одном и том же острове Серона!

Большинство жителей Мледины вздохнули с облегчением, решив, что карты поддельные. Но один старый мудрец по имени Герман не согласился с этим. Три года искал он разгадку и, наконец, осенью 1908 г. понял причину различия карт. Дело было в том, что мужчины пользовались магнитным компасом, а женщины ориентировались по звездам (рис. 2.1). Мужчины считали направлением на север направление на северный магнитный полюс, а женщины —



2.1. Две карты пути от Мледины к Сероне, наложенные одна на другую и подписанные Германом с указанными направлениями на магнитный север, географический север и абсолютным расстоянием между островами

направление на точку, вокруг которой вращаются звезды (вследствие вращения земли вокруг своей оси), т. е. на географический север. Различие между этими двумя направлениями составляет 20 градусов. Когда мужчины, по их мнению, плыли на север, они на самом деле плыли на северо-восток. С точки зрения женщин, они двигались на 80 процентов на север и на 20 процентов на восток. В этом смысле «мужской» север — это смесь «женского» севера и востока, аналогично, «женский» север — это смесь «мужского» севера и запада.

Эта разгадка привела Германа к открытию формулы Пифагора: если у прямоугольного треугольника длины катетов возвести в квадрат, затем сложить и извлечь из суммы квадратный корень, получится длина гипотенузы.

В нашем случае гипотенуза — это прямая линия, соединяющая Мледину и Серону. Абсолютное расстояние (по прямой) между ними $\sqrt{210^2 + 100^2} = 232,6$ миль, если считать по карте, которой пользовались женщины (на ней катеты треугольника направлены на географический север и географический восток).

Хотя на карте, которая была у мужчин, катеты треугольника направлены на магнитный север и магнитный восток, абсолютное

расстояние между островами получается таким же: $\sqrt{164,5^2 + 164,5^2} = 232,6$ мили. Расстояния, которые надо проплыть на север и на восток, «относительны»: они зависят от того, как ориентированна карта. Но из любой пары относительных расстояний можно вычислить одно и то же абсолютное расстояние, которое соответствует кратчайшему расстоянию между островами.

История умалчивает о том, как народ Мледины, с его традициями и обычаями, отнесся к этому замечательному открытию.

* * *

Открытие Германа Минковского аналогично тому, которое сделал Герман с острова Мледины: предположим, что вы движетесь относительно меня (например, в вашей сверхбыстрой гоночной машине). Тогда:

- Так же, как магнитный север есть смесь географического севера и географического востока, мое время есть смесь вашего времени и вашего пространства.
- Так же, как магнитный восток есть смесь географического востока и географического юга, мое пространство есть смесь вашего пространства и вашего времени.
- Так же, как использование магнитных севера и востока или географических севера и востока — это просто выбор способа проведения измерений на одной и той же двумерной поверхности — поверхности Земли, выбор моих пространства и времени или ваших — это выбор способа проведения измерений на одной и той же четырехмерной «поверхности» или структуре, которую Минковский назвал *пространство-время*.
- Так же, как существует абсолютное расстояние, соответствующее кратчайшему пути от Мледины к Сероне на поверхности Земли, которое можно рассчитать по теореме Пифагора, используя как магнитную, так и географическую систему координат, между любыми двумя *событиями* в пространстве-времени существует абсолютный *интервал*, который можно вычислить, используя аналог формулы Пифагора для расстояний и времени, измеренных либо в моей системе отсчета, либо в вашей.

Именно аналог формулы Пифагора (я буду называть его формулой Минковского) привел Германа Минковского к его открытию абсолютного пространства-времени. Особенности этой формулы не существенны для того, о чем будет говориться далее, и мы не будем останавливаться на них (любопытные читатели, тем не менее,

2. ИСКРИВЛЕНИЕ ПРОСТРАНСТВА И ВРЕМЕНИ

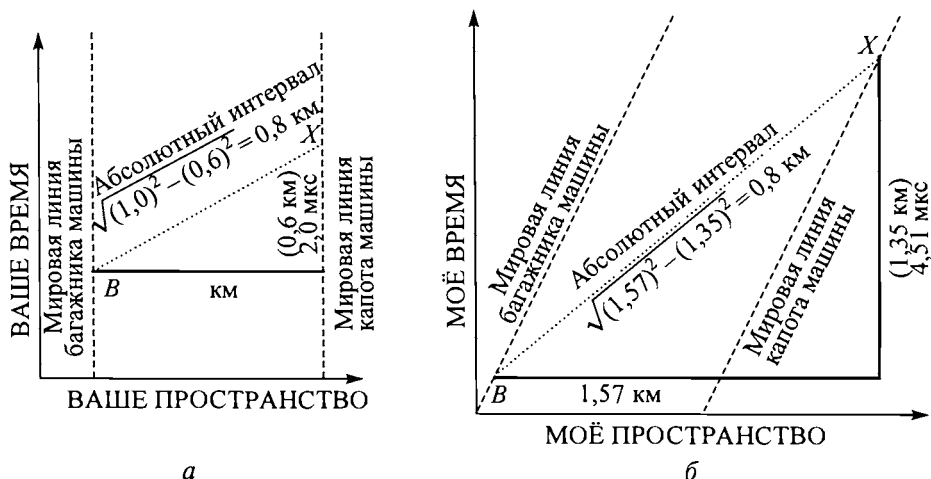
могут обратить внимание на Врезку 2.1). Главное то, что события в пространстве-времени аналогичны точкам в пространстве, и существует абсолютный интервал между любыми двумя событиями в пространстве-времени полностью аналогичный прямой линии между любыми двумя точками на плоском листе бумаги.

Врезка 2.1

Формула Минковского

Вы проносите мимо меня в мощной спортивной машине, длина которой 1 километр, со скоростью 162000 километров в секунду (54 процента от скорости света); вспомните рис. 1.3. Движение вашей машины изображено на следующих пространственно-временных диаграммах. Диаграмма *a* представляет вашу точку зрения, а *б* — мою. В тот момент, когда вы проезжаете мимо меня, ваша машина «стреляет» выхлопной трубой, из которой раздается хлопок и вылетает облако дыма; это событие обозначено буквой *B* на диаграммах. Двумя микросекундами (миллионными частями секунды) позднее (с вашей точки зрения) взрывается петарда на капоте вашей машины; это событие обозначено буквой *X*.

Поскольку пространство и время относительны (ваше пространство — это смесь моего пространства и времени), интервал времени между «выстрелом» (событие *B*) и взрывом петарды (событие *X*),



измеренный вами, будет отличаться от того, который получится у меня. Между этими событиями прошло либо 2,0 микросекунды вашего времени, либо 4,51 микросекунды моего. Аналогично, у нас будут различия относительно того, на каком расстоянии друг от друга эти события произошли. Оказывается, что в вашем пространстве между ними ровно 1 километр, а в моем — 1,57 километра. Несмотря на эти расхождения, и у вас и у меня получится, что «абсолютный интервал» между этими событиями (расстояние в пространстве-вре-

мени) равен 0,8 км (аналогично тому, как расстояние по прямой между Млединой и Сероной оказалось одинаковым по мужской и по женской карте).

Для вычисления абсолютных интервалов можно воспользоваться формулой Минковского: сначала надо перевести временные интервалы из секунд в километры, умножив их на скорость света (299792 километров в секунду); округленные величины — 0,6 км вашего времени или 1,35 км моего — приведены на диаграмме. Затем следует возвести расстояния и времена в квадрат, вычесть из квадрата расстояния квадрат временного интервала и извлечь из результата квадратный корень (это похоже на применение теоремы Пифагора для вычисления расстояния между островами, с той разницей, что в ней квадраты складываются). Как видно на диаграммах, несмотря на то, что расстояния и временные интервалы между B и X у нас с вами разные, абсолютные интервалы, полученные вами и мной, совпадают (0,8 км).

Знак «минус» в формуле Минковского (вместо «плюса» в формуле Пифагора) является отражением глубокого физического отличия временной координаты от координат пространственных, которое я не буду сейчас объяснять, чтобы не запутать вас. Желающие могут прочесть об этом более подробно в книге Тейлора и Уилера (1992 г.).

Универсальность этого интервала (т. е. его величина не зависит от того, какая система отсчета использована для его вычисления) показывает, что пространство-время является абсолютной реальностью; это четырехмерная структура, свойства которой не зависят от чьего-либо движения.

Как мы увидим в дальнейшем, гравитация может порождать кривизну (изгибы) этой абсолютной пространственно-временной структуры, и черные дыры, белые дыры, гравитационные волны и сингулярности состоят целиком и исключительно из этой структуры; все они суть различные виды искривлений пространства-времени.

Может показаться странным, что мы не воспринимаем пространство-время как единую, абсолютную структуру в нашей повседневной жизни. Это происходит из-за того, что мы живем в мире, где все движется медленно — и гоночные машины, и самолеты, и даже современные ракеты имеют очень малые скорости по сравнению со скоростью света. В результате пространство и время кажутся нам совершенно отдельными сущностями, мы не видим расхождений в расстояниях и временах, измеренных разными наблюдателями и, как следствие, не обращаем внимания на то, что пространство и время относительны и лишь четырехмерная пространственно-временная структура является абсолютной.

Как вы можете вспомнить, именно Минковский был тем самым преподавателем математики, который называл Эйнштейна в его сту-

2. ИСКРИВЛЕНИЕ ПРОСТРАНСТВА И ВРЕМЕНИ

денческие годы лентяем. В 1902 г. Минковский (русский по происхождению) оставил ЕТН и перебрался из Цюриха в Геттинген (Германия), где ему предложили более привлекательную профессию (наука тогда была такой же интернациональной, как и сейчас). В Геттингене Минковский познакомился со статьей Эйнштейна, которая произвела на него огромное впечатление. Именно она подтолкнула его к открытию в 1908 г. абсолютного четырехмерного пространства-времени.

На Эйнштейна открытие Минковского впечатления не произвело. Минковский просто переписал законы специальной теории относительности на новом, более математическом языке. Эйнштейн вообще считал, что математики часто затуманивают физические идеи, лежащие в основе законов. В то время как Минковский всячески подчеркивал элегантность его пространственно-временного представления, Эйнштейн шутил, что Геттингенские математики описывают теорию относительности на таком сложном языке, что физикам ее не понять.

Природа, как оказалось, сама решила подшутить над Эйнштейном. В 1912 г., после четырех лет поисков, он понял, что именно пространство-время Минковского необходимо для того, чтобы включить гравитацию в теорию относительности. К сожалению, сам Минковский не узнал об этом: он умер в 1909 г. от аппендицита в возрасте 45 лет.

Я вернусь к абсолютному пространству-времени Минковского позднее в этой главе. Но вначале давайте проследим, какие шаги предпринимал Эйнштейн, пытаясь объединить ньютоновские законы тяготения и специальную теорию относительности, до того, как он воздал должное открытию Минковского.

Закон тяготения Ньютона и попытки Эйнштейна связать его с теорией относительности

Ньютон рассматривал гравитацию как силу притяжения, которая возникает между любыми двумя объектами во Вселенной. Чем больше эти объекты и чем ближе они друг к другу, тем сильнее притяжение. Если быть точнее, сила притяжения пропорциональна произведению масс объектов и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними.

Появление этого закона стало настоящим прорывом в науке. В сочетании с ньютоновскими законами движения он объяснял орбиты, по которым планеты движутся вокруг Солнца, а спутники вокруг планет, причину возникновения океанских приливов и отливов,

давал ответ на вопрос, почему все предметы падают на землю. Этот закон дал возможность Ньютону и его соотечественникам определить массу Земли и Солнца¹.

В течение двух столетий, разделявших Ньютона и Эйнштейна, точность астрономических измерений повысилась многократно, что позволило подвергнуть теорию тяготения Ньютона еще более строгим испытаниям. Иногда результаты таких измерений казались противоречащими законам Ньютона, но затем неизбежно оказывалось, что либо сами измерения, либо их интерпретация ошибочны. Законы Ньютона одерживали победу вновь и вновь. Например, когда выяснилось, что движение планеты Уран (открытой в 1781 г.) противоречит предсказаниям ньютоновского закона тяготения, возникло подозрение, что это результат воздействия на Уран другой, еще не открытой планеты. Вычисления, сделанные У.Ж.Лeverье и основанные исключительно на законах Ньютона и наблюдениях за движением Урана, позволили предсказать, в какой точке небесной сферы эта планета должна находиться. В 1846 г. И.Г.Галле обнаружил эту планету, невидимую для невооруженного глаза, направив в эту точку свой телескоп. Эта новая планета, открытие которой стало триумфом ньютоновского закона гравитации, получила название Нептун.

В начале XX века оставалось лишь два очень слабых, но необъяснимых несоответствия астрономических наблюдений с законом тяготения Ньютона. Как оказалось, первое из них, касающееся особенностей орбиты Меркурия, действительно было результатом ошибочности закона тяготения Ньютона. Другое несоответствие — некоторая странность в движении Луны была просто результатом неверной интерпретации астрономических наблюдений. И, как это обычно бывает в случае чрезвычайно точных измерений, было очень сложно понять, заслуживают ли внимания результаты этих двух наблюдений, или хотя бы одно из них.

Эйнштейн чувствовал, что особенность движения Меркурия (аномальное смещение его перигелия, см. Врезку 2.2) — это реальность, а особенности движения Луны — нет. Но даже подозрение, что противоречие между наблюдениями и законом Ньютона действительно имеет место, было для Эйнштейна куда менее интересным и значимым, чем то, что этот закон нарушал недавно сформулированный им (Эйнштейном) принцип относительности («метапринцип», согласно которому все законы физики должны быть одинаковы во всех инерциальных системах отсчета). Поскольку Эйнштейн твердо

¹ Подробнее см. примечание к с. 55.

2. ИСКРИВЛЕНИЕ ПРОСТРАНСТВА И ВРЕМЕНИ

верил в свой принцип относительности, это означало для него, что закон гравитации Ньютона нуждается в изменении².

Врезка 2.2

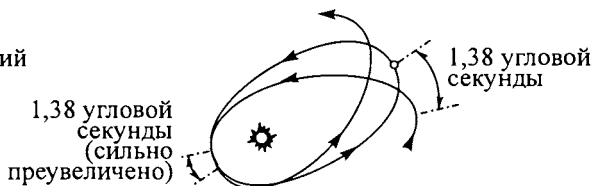
Смещение перигелия Меркурия

Согласно Кеплеру, орбита Меркурия должна представлять собой эллипс, в одном из фокусов которого находится Солнце (левая диаграмма, на которой эксцентриситет орбиты показан в увеличенном виде). Однако в конце XIX века астрономы обнаружили, что орбита Меркурия не совсем эллиптическая. После каждого оборота Меркурий оказывался сдвинутым относительно той точки, где он был во время предыдущего витка. Этот сдвиг можно описывать, используя величину смещения ближайшей к Солнцу точки на орбите Меркурия за один оборот (смещение его перигелия). Астрономы измерили эту величину, и она оказалась равна 1,38 угловой секунды.

ОРБИТА МЕРКУРИЯ ПО КЕПЛЕРУ



РЕАЛЬНАЯ ОРБИТА МЕРКУРИЯ



Вычисления с помощью законов Ньютона предсказывали смещение величиной 1,28 угловой секунды: оно было результатом притяжения Юпитера и других планет. Оставалась необъяснимой 0,1 угловой секунды — *аномальный сдвиг перигелия Меркурия*. Астрономы утверждали, что погрешность их измерений не превышает 0,01 угловой секунды, однако, если принять во внимание, как малы величины, о которых идет речь (0,01 угловой секунды — это угол, под которым человеческий волос виден с расстояния в 2 километра), легко понять, почему многие физики того времени относились к этим утверждениям с недоверием, и предполагали, что, в конце концов, законы Ньютона все равно окажутся верны.

² То, что ньютоновский закон тяготения нарушает принцип относительности Эйнштейна, вообще говоря, не очевидно, так как этот принцип был сформулирован применительно к инерциальным системам отсчета и, соответственно, не может быть использован при наличии гравитации (не существует способа экранировать систему отсчета от гравитации и, таким образом, дать ей возможность двигаться под влиянием только ее собственной инерции). Однако Эйнштейн был уверен, что существует способ распространить его принцип и на области, где есть гравитация («обобщить» его, включив в рассмотрение гравитационные эффекты), и именно этот, еще не оформившийся «обобщенный принцип относительности» и нарушался законом тяготения Ньютона.

Рассуждения Эйнштейна были просты: согласно Ньютону, сила гравитационного притяжения зависит от *расстояния* между притягиваемыми объектами (например, Солнцем и Меркурием), но, согласно теории относительности, это расстояние различно в различных системах отсчета. Так, теория относительности Эйнштейна предсказывала, что расстояние между Солнцем и Меркурием будет отличаться примерно на одну миллиардную часть, если измерять его с поверхности Солнца или с поверхности Меркурия соответственно. Если обе системы отсчета, связанная с Солнцем и связанная с Меркурием, одинаково хороши с точки зрения законов физики, какая же из них должна быть использована при определении того расстояния, которое входит в формулу Ньютона? Какую бы из них мы не выбрали, принцип относительности будет нарушен! Это противоречие убедило Эйнштейна в том, что закон тяготения Ньютона неточен.

Дерзость Эйнштейна была беспрецедентной. Отвергнув ньютоновские понятия об абсолютном пространстве и времени, при том, что для этого практически не было экспериментальных предпосылок, он собирался теперь отказаться от закона тяготения Ньютона, столь успешно применяемого, хотя экспериментальных свидетельств его некорректности было еще меньше! На самом деле, Эйнштейн руководствовался не результатами опытов, а собственным, глубочайшим интуитивным видением того, какими *должны* быть физические законы.

* * *

Эйнштейн начал поиски нового закона тяготения в 1907 г. Его первые шаги были связаны с работой над обзорной статьей о его специальной теории относительности и ее следствиях. Хотя в своем патентном бюро он числился всего лишь как «технический эксперт второго класса» (недавно повышенный с третьего), он уже был настолько признан среди ведущих физиков мира, что его пригласили написать такой обзор для ежегодного выпуска *Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik*. В процессе работы над обзором Эйнштейн открыл очень плодотворный метод научных исследований: оказалось, что необходимость изложить предмет в последовательной, законченной, «педагогической» форме заставляет автора по-новому взглянуть на него. Она заостряет внимание на всех «белых пятнах» и заставляет заполнять их.

В данном случае гравитация была огромным белым пятном; специальная теория относительности с ее инерциальными системами

2. ИСКРИВЛЕНИЕ ПРОСТРАНСТВА И ВРЕМЕНИ

отсчета, на которые не действовало тяготение, гравитацию попросту игнорировала. Поэтому, работая над обзором, Эйнштейн все время искал возможность включить гравитацию в теорию относительности. Как это часто бывает с людьми, увлеченными какой-либо проблемой, даже тогда, когда он не думал непосредственно об этой проблеме, она крутилась у него в подсознании. Озарение пришло ноябрьским днем 1907 г. Эйнштейн позднее писал: «Я сидел на стуле в патентном офисе в Берне, когда внезапная мысль пронзила меня — если человек находится в свободном падении, он не чувствует свой собственный вес!»

Сейчас такая мысль может прийти в голову и вам, и мне, но вряд ли мы с вами сделаем из нее далеко идущие выводы. Но Эйнштейн был не таким, как все. Каждую идею он доводил до логического завершения, выжимая из нее все до последней капли. И для него эта мысль стала шагом к совершенно новому взгляду на гравитацию. Позднее он говорил: «это была самая счастливая мысль в моей жизни».

Рассуждения, немедленно последовавшие за этой мыслью, были включены Эйнштейном в обзор. Если вы свободно падаете (например, прыгнув с обрыва), вы не только не будете чувствовать свой собственный вес, вам будет казаться, что возле вас гравитация вообще исчезла. Например, если вы выпустите из рук несколько камешков во время своего падения, эти камешки будут продолжать падать рядом с вами. Глядя только на эти камешки, вы не сможете отличить, падаете ли вы вместе с ними на Землю или находитесь в состоянии покоя вдали от Земли и других притягивающих тел. В самом деле, понял Эйнштейн, в вашем непосредственном окружении гравитация оказывается столь несущественной, практически не обнаружимой, что все законы физики в малой системе отсчета (лаборатории), которая падает вместе с вами, должны быть такими же, как если бы вы двигались свободно во вселенной без гравитации. Другими словами, ваша малая, свободно падающая система отсчета «эквивалентна» инерциальной системе отсчета в пространстве без гравитации, и все законы физики в этих системах будут одинаковыми; для них будет полностью справедлива теория относительности (позднее мы узнаем, почему свободно падающая система отсчета должна быть малой, а слово «малая» означает, что ее размеры много меньше, чем размеры Земли или, в общем случае, много меньше расстояний, на которых направление и величина гравитационных сил существенно изменяются).

В качестве примера эквивалентности между инерциальной системой отсчета в пространстве без гравитации и вашей малой свободно

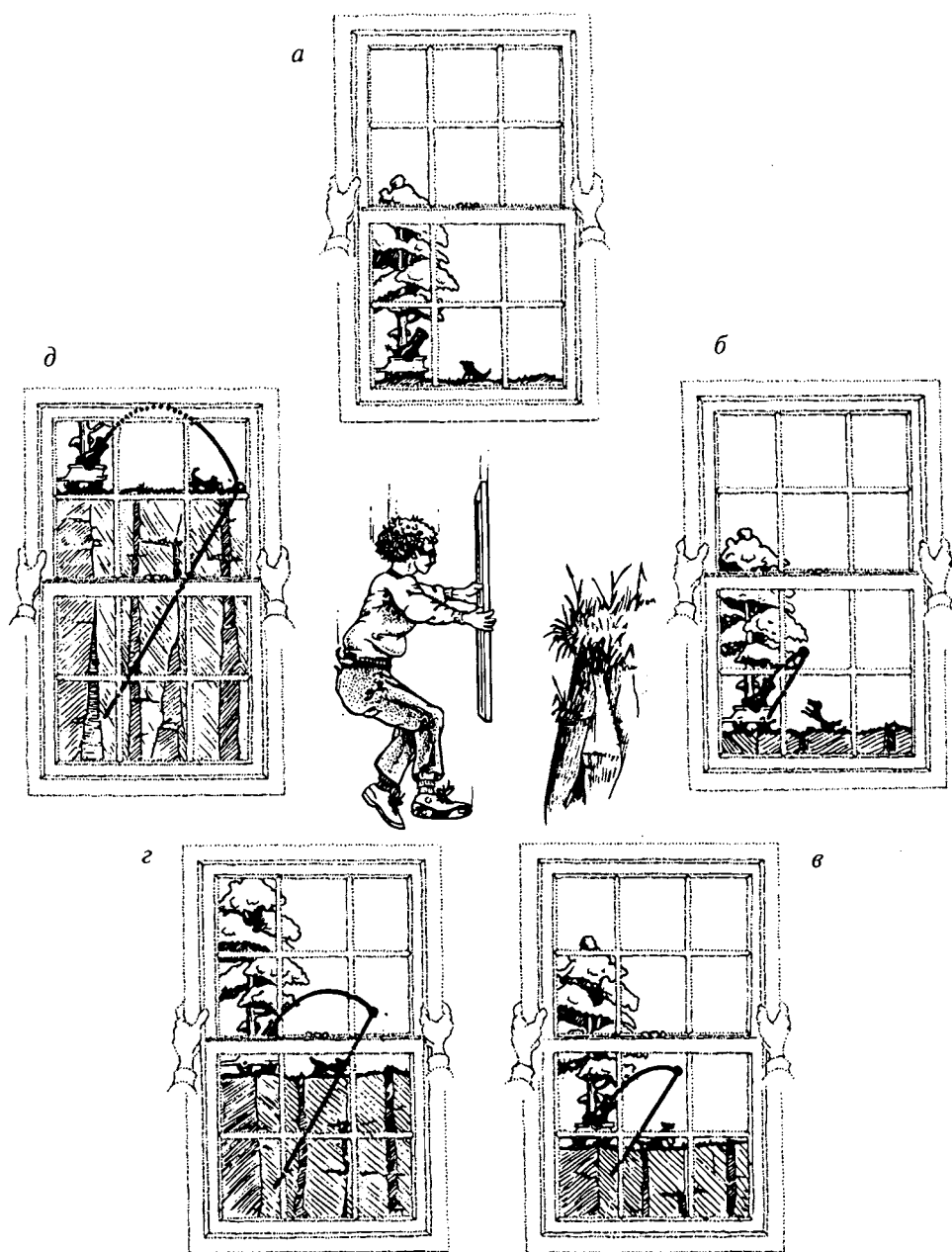
падающей системой рассмотрим закон специальной теории относительности, который описывает движение свободно движущегося предмета (пусть это будет пушечное ядро) во вселенной без гравитации. В любой инерциальной системе отсчета в этой идеализированной вселенной ядро должно двигаться по прямой линии с постоянной скоростью. Сравним это с движением ядра в нашей реальной, наделенной гравитацией, Вселенной: если ядро вылетело из пушки, стоящей на травянистом лугу, то с точки зрения собаки, сидящей на траве, оно опишет дугу и упадет обратно на Землю (см. рис. 2.2). Оно будет двигаться по параболе (сплошная линия) в системе отсчета этой собаки. Теперь давайте рассмотрим движение ядра в малой, свободно падающей системе отсчета. Проще всего это будет сделать, если луг находится у края обрыва. Тогда вы сможете прыгнуть с обрыва в тот момент, когда пушка выстрелит, и наблюдать за ядром в процессе своего падения.

Для того чтобы изобразить ваши наблюдения, представьте, что вы держите перед собой оконную раму с переплетом из двенадцати частей, и что вы смотрите на ядро через нее (центральная часть на рис. 2.2). Последовательность ваших наблюдений представлена на рисунках, расположенных по часовой стрелке (рис. 2.2 *a–d*). Глядя на нее, не обращайте внимания на собаку, пушку, дерево и обрыв: сосредоточьтесь на раме и ядре. Вы увидите, что по отношению к раме ядро движется по прямой с постоянной скоростью.

Таким образом, в системе отсчета собаки ядро подчиняется законам Ньютона: оно движется по параболе. В вашей малой свободно падающей системе отсчета оно подчиняется законам специальной теории относительности: оно движется вдоль прямой линии с постоянной скоростью. Эйнштейн назвал это *принципом эквивалентности*.

В любой малой свободно падающей системе отсчета где-либо в нашей реальной Вселенной, где есть гравитация, законы физики должны быть такими же, какими они являются в инерциальной системе отсчета в идеализированной вселенной без гравитации.

Этот принцип утверждает, что при наличии гравитации малая свободно падающая система отсчета эквивалентна инерциальной системе отсчета в отсутствие гравитации. Эйнштейн понял, что этот принцип имеет чрезвычайно важное следствие: оно означает, что, если мы просто будем называть «инерциальными» не только инерциальные, но и все малые свободно падающие системы отсчета в нашей реальной, гравитирующей Вселенной (в частности, малую лабораторию, которая падает вместе с вами с обрыва), то все, что специальная теория относительности говорит об инерциальных системах



2.2. В центре: Вы прыгаете с обрыва, держа перед собой оконную раму с переплетом из двенадцати частей. По кругу, начиная сверху: то, что вы увидите после выстрела пушки. Относительно падающей рамы траектория ядра — это прямая линия (пунктир); относительно собаки — это парабола (сплошная линия)

отсчета в идеализированной вселенной, автоматически станет справедливо и для нашей реальной Вселенной. Самое главное, будет выполняться *принцип относительности*: все малые свободно падающие системы отсчета в нашей реальной Вселенной, где есть тяготение, будут *эквивалентны*; ни одна из них не является предпочтительной с точки зрения законов физики. Более строго это должно звучать так:

Сформулируем какой-нибудь закон физики применительно к измерениям, сделанным в маленькой инерциальной (свободно падающей) системе отсчета. Тогда для измерений в любой другой маленькой инерциальной (свободно падающей) системе отсчета он будет иметь абсолютно такой же математический и логический вид. Это должно быть справедливо везде: летит ли такая система в межгалактическом пространстве, падает ли она с обрыва на Земле или проваливается сквозь горизонт черной дыры.

Дополнив таким образом свой принцип относительности, Эйнштейн сделал первый шаг к созданию новой системы законов гравитации: первый шаг от *специальной* теории относительности к *общей* теории относительности.

Наберись терпения, мой дорогой читатель. Эта глава, возможно, самая сложная в книге. Мой рассказ уже не будет содержать столько технических подробностей в следующей главе, когда мы будем изучать черные дыры.

Всего через несколько дней после того, как принцип относительности был сформулирован, Эйнштейн использовал его для того, чтобы сделать удивительное предсказание о *гравитационном замедлении времени*: *если наблюдатель находится вблизи массивного тела, то чем ближе он к этому телу, тем медленнее течет его время*. Например, в любом доме на Земле время на первом этаже течет медленнее, чем на втором. Правда, эта разница оказывается столь малой (3×10^{-16} , или 300 долей на миллиард миллиардов), что ее крайне сложно обнаружить. Однако (как мы увидим в следующей главе) вблизи черной дыры гравитационное замедление времени может быть колоссальным: если черная дыра имеет массу в 10 раз больше Солнца, на высоте в 1 сантиметр над ее горизонтом время будет течь в 6 миллионов раз медленнее, чем вдали от горизонта, а на самом горизонте оно вообще останавливается (неплохая возможность для путешествий во времени: если вы снизитесь до высоты в 1 сантиметр над горизонтом черной дыры, проведете там один год, а затем вернетесь на Землю, вы обнаружите, что на ней прошло 6 миллионов лет!).

Эйнштейн открыл гравитационное замедление времени путем достаточно сложных рассуждений, однако позднее он придумал простой и элегантный пример, который объясняет это замедление, кроме того, является иллюстрацией великолепной физической логики самого Эйнштейна. Этот пример представлен на Врезке 2.4, а эффект Доплера, на который там есть ссылка, объясняется на Врезке 2.3.

* * *

Начиная работать над обзорной статьей в 1907 г., Эйнштейн намеревался описать в ней теорию относительности для вселенной без гравитации. Однако в процессе работы он сделал 3 важных открытия, которые должны были помочь объединению гравитации со специальной теорией относительности: принцип эквивалентности, гравитационное замедление времени и возможность распространить принцип относительности на системы с гравитацией и, конечно, он включил их в статью. Наконец, в начале декабря, он отправил статью редактору *Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik* и направил все свои силы на разработку полного, релятивистского описания гравитации.

24 декабря Эйнштейн писал своему другу: «В настоящее время я занимаюсь теорией относительности применительно к законам гравитации... Я надеюсь объяснить аномальный сдвиг перигелия Меркурия,... хотя пока, похоже, мне это не удастся». В начале 1908 г., будучи разочарован отсутствием прогресса в этом направлении, Эйнштейн оставил его и занялся физикой атомов, молекул и их взаимодействием с излучением (физикой микромира), поскольку нерешенные проблемы в этой области в тот момент казались более интересными и разрешимыми³.

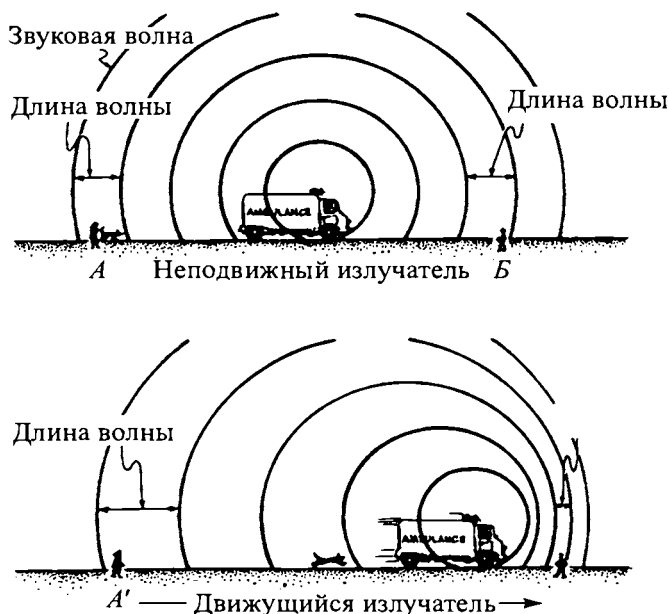
Врезка 2.3

Эффект Доплера

Всегда, когда передатчик, излучающий волны, и приемник приближаются друг к другу, приемник будет регистрировать сдвиг частоты вверх: длина волны и период колебаний будет становиться меньше. Если же приемник и передатчик удаляются друг от друга, то частота принимаемых колебаний будет уменьшаться — длина волны и период колебаний, измеренные приемником, будут больше. Это явление называется эффектом Доплера и является общим свойством волн любой природы: звуковых волн, волн на поверхности воды, электромагнитных волн и т. д.

³ См. главу 4 и, в особенности, Врезку 4.1.

Применительно к звуковым волнам эффект Доплера вам хорошо знаком. Вы наверняка обращали внимание на внезапное понижение звука, когда машина скорой помощи со включенной сиреной проно-



силась мимо вас или когда идущий на посадку самолет пролетал у вас прямо над головой. Легко понять происхождение этого сдвига частоты, из приведенных здесь рисунков.

То, что верно для волн, справедливо и для импульсов. Если источник излучает вспышки света (или какие-то другие импульсы) с постоянной частотой (через равные промежутки времени), то приемник, к которому этот источник приближается, будет принимать эти импульсы с более высокой частотой, чем частота, с которой они излучались (промежутки станут меньше).

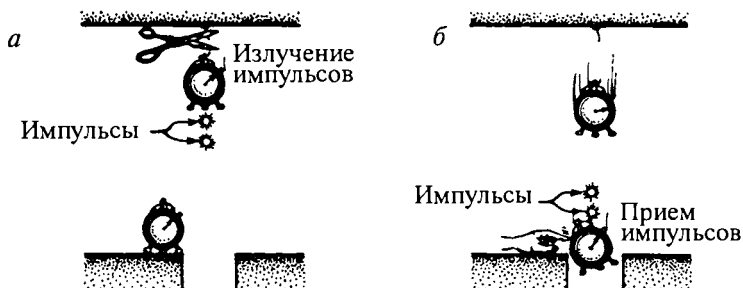
Врезка 2.4

Возьмем пару одинаковых часов. Одни часы положим на пол возле дырки в нем так, чтобы можно было их туда столкнуть, вторые подвесим к потолку за веревочку. Ход часов на полу будет задаваться течением времени возле пола, а ход часов, висящих на веревочке, — течением времени возле потолка.

Предположим, что висящие часы испускают очень короткий импульс света при каждом «тике» в направлении часов, лежащих на полу. Непосредственно перед тем, как висящие часы должны будут испустить свой первый импульс, перережем веревочку, чтобы они начали свободно падать. Если время между «тиками» очень мало, то к моменту второго «тика» (и испусканию второго импульса) они будут находиться почти на том же месте и их скорость будет все еще

близка к нулю (рисунок а). Это означает, что часы все еще чувствуют течение времени возле потолка, которое определяет интервал времени между импульсами.

За мгновение до того, как первый импульс света достигнет пола, столкнем нижние часы в дырку. Второй импульс придет почти сразу после первого, так что эти часы незначительно сместятся за время



между импульсами и будут почти неподвижны на уровне пола, поэтому они по-прежнему будут чувствовать течение времени возле пола.

При помощи такой модели Эйнштейн свел задачу сравнения того, как течет время возле потолка и возле пола, к задаче сравнения хода двух свободно падающих часов. Принцип эквивалентности позволял ему произвести такое сравнение при помощи законов специальной теории относительности.

Поскольку часы, которые были подвешены у потолка, начали свое падение раньше тех, что были на полу, их скорость всегда будет больше (см. рисунок б), т. е. часы всегда будут сближаться. Это значит, что часы у пола будут «видеть» световые импульсы, посланные часами у потолка, с меньшим интервалом между ними из-за эффекта Доплера (Врезка 2.3). Поскольку время между ними задавалось «тиками» часов, находящихся у потолка, это означает, что время около пола течет медленнее, чем около потолка; иными словами, гравитация замедляет течение времени.

В течение 1908 г. (игнорируя работы Минковского, в которых тот объединил пространство и время), а также последующих трех лет Эйнштейн занимался физикой микромира. В это время он оставляет патентное бюро в Берне и становится сначала доцентом в университете Цюриха, а затем полным профессором в Праге — культурном центре Австро-Венгерской империи.

Жизнь профессора оказалась нелегкой. Эйнштейна раздражала необходимость регулярно читать лекции, тема которых была далека от его исследований. Ему не удавалось ни мобилизовать себя на подготовку к таким лекциям, ни сделать их интересными, хотя разделы, близкие его сердцу, он читал блестяще. С другой стороны, теперь он был полноправным членом Европейского академического

сообщества. Несмотря на все трудности, его исследования в данной области продвигались чрезвычайно успешно, и впоследствии именно за их результаты он был удостоен Нобелевской премии (см. Врезку 4.1).

В середине 1911 г. интерес Эйнштейна к микрофизике стал угасать и он вновь обратился к гравитации, борьбе с которой ему предстояло посвятить все время до ноября 1915 г., когда им была сформулирована общая теория относительности.

Вначале внимание Эйнштейна было обращено на *приливные гравитационные силы*.

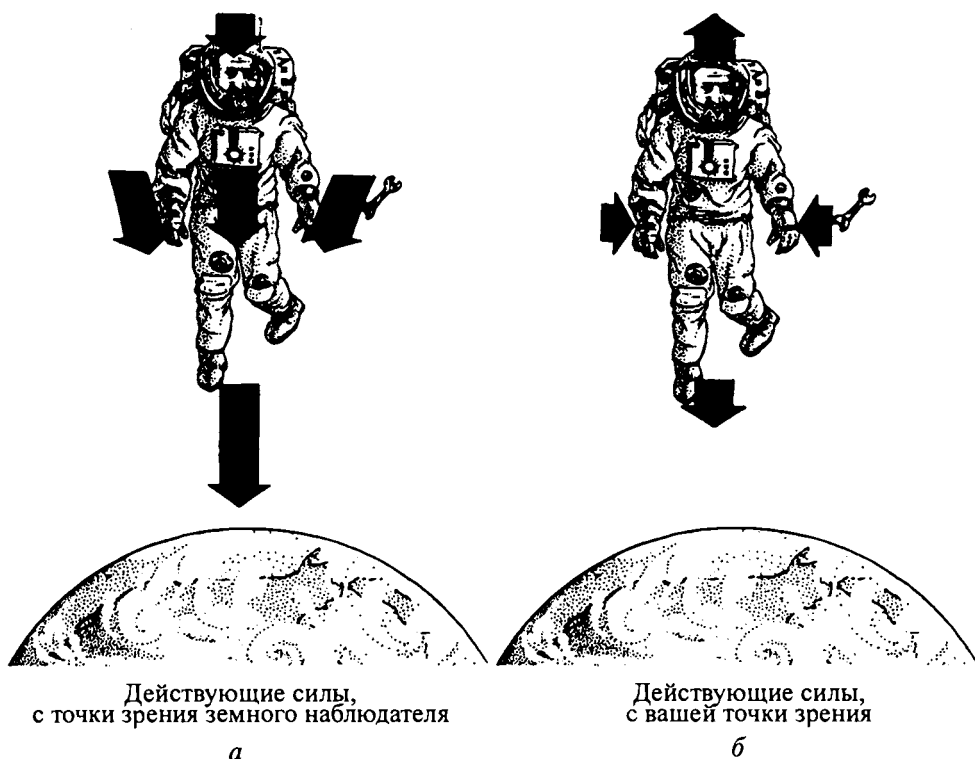
Приливные силы и кривизна пространства-времени

Представьте себе, что вы — космонавт, находитесь в открытом космосе над экватором и свободно падаете на Землю. Хотя, находясь в свободном падении, вы не будете чувствовать собственный вес, тем не менее, вы будете ощущать слабые, остаточные силы, связанные с земным притяжением. Они называются «приливными силами» и их происхождение легко понять, рассматривая гравитационное взаимодействие вначале, с точки зрения наблюдателя, находящегося на земле под вами, а затем, с вашей собственной точки зрения.

С точки зрения земного наблюдателя (рис. 2.3а), гравитационное притяжение, действующее на различные части вашего тела, несколько отличается. Поскольку ваши ноги ближе к Земле, чем ваша голова, сила, действующая на них, больше. Получается, что вас будет растягивать вдоль туловища. Кроме того, поскольку гравитационное притяжение всегда направлено к центру Земли, а это направление немного наклонено вправо у вашей левой руки и немного влево у правой, то оказывается, что вас будет сжимать с боков.

С вашей собственной точки зрения (рис. 2.3б), основной силы, направленной вниз, вообще нет, ведь вы находитесь в невесомости. Однако силы, которые растягивают ваше туловище вдоль и сжимают его с боков, остаются. Они вызваны различием гравитационного поля там, где находятся разные части вашего тела, от гравитационного поля в его центре, и не могут быть устранены свободным падением.

Силы, вызывающие продольное растяжение и поперечное сжатие, которые вы будете чувствовать, называются приливными, поскольку именно такие силы вызывают океанские приливы (в этом



2.3. Во время падения к Земле приливные силы будут растягивать вас вдоль туловища и сжимать с боков

случае Луну следует рассматривать в качестве притягивающего центра, а Землю в качестве свободно падающего на нее тела).

При выводе своего принципа эквивалентности Эйнштейн игнорировал приливные силы (вспомним ключевые места его утверждения: «В состоянии свободного падения вы не будете чувствовать свой собственный вес» и «вам будет казаться, во всех отношениях, что гравитация вблизи вас исчезла»). Эйнштейн оправдывал такой подход, считая, что вы (и ваша система отсчета) очень малы. Например, если представить, что вы размером с муравья или даже меньше, то части вашего тела будут находиться так близко друг к другу, что величина и направление гравитационного притяжения, действующего на них, будет практически одинаковой и, соответственно, приливные силы окажутся пренебрежимо малыми. С другой стороны, если вы колосс ростом в 5000 километров, то величина и направление земного притяжения для частей вашего тела будут очень сильно различаться, и вы почувствуете огромные растяжение и сжатие.

Такие рассуждения привели Эйнштейна к заключению, что в достаточно малой свободно падающей системе отсчета обнаружить

приливные силы невозможно, поэтому такая система даже в нашей гравитирующей Вселенной полностью эквивалентна инерциальной системе отсчета во вселенной без гравитации. Однако для больших систем отсчета это не верно. Поэтому в 1911 г. именно приливные силы казались Эйнштейну ключом к пониманию природы гравитации.

Таким образом, понятно, как с помощью ньютоновского закона тяготения объяснить возникновение приливных сил: они появляются из-за различия величины и направления гравитационного притяжения, действующего в разных местах. Но этот закон, в котором сила притяжения зависит от расстояния, не мог быть точным, поскольку он нарушал принцип относительности (не ясно, в какой системе отсчета должно измеряться это расстояние). Эйнштейн хотел сформулировать совершенно новый закон гравитации, такой, который был бы одновременно совместим с принципом относительности и объяснял бы возникновение приливных сил.

С середины 1911 г. до середины 1912 г. Эйнштейн пытался объяснить возникновение приливных сил, предполагая, что время «искривлено», а пространство нет. Такое весьма странное, на первый взгляд, предположение было естественным следствием эффекта гравитационного замедления времени: различие в течении времени у пола и у потолка в комнате на Земле можно назвать искривлением времени в гравитационном поле Земли. Возможно, рассуждал Эйнштейн, подобное искривление времени более сложной формы может быть причиной всех известных гравитационных эффектов, начиная от эллиптических траекторий планет и приливных сил и заканчивая аномальным сдвигом перигелия Меркурия.

Врезка 2.5

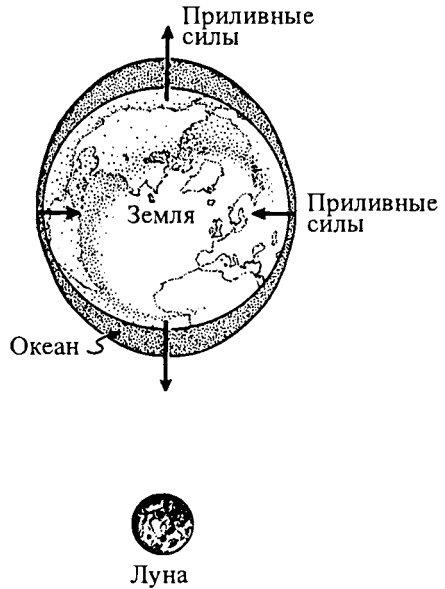
Возникновение океанских приливов

На той поверхности Земли, которая ближе к Луне, притяжение к ней сильнее, чем в центре Земли, поэтому океан там притягивается к Луне сильнее, чем Земля в целом, и в результате водная поверхность «вздувается», приближаясь к Луне. На той поверхности Земли, которая дальше от Луны, притяжение к ней слабее, чем в центре Земли, поэтому океан там притягивается к Луне слабее, соответственно, водная поверхность «вздувается», удаляясь от Луны. На левой стороне Земли сила притяжения к Луне, которая направлена к ее центру, имеет небольшую компоненту, направленную вправо, аналогично, на правую сторону Земли действует компонента лунного притяжения, направленная влево. Эти силы «выдавливают» воду из океанов. В результате из-за вращения Земли каждый день наблюдается два прилива и два отлива.

2. ИСКРИВЛЕНИЕ ПРОСТРАНСТВА И ВРЕМЕНИ

Если на вашем любимом океанском пляже приливы и отливы ведут себя несколько иначе, это может быть результатом двух следующих эффектов: во-первых, перемещение воды под действием приливных сил происходит с запаздыванием — необходимо время, чтобы вода вошла и вышла в заливы, бухты, фиорды, каналы и другие углубления в береговой линии. Во-вторых, существуют приливные силы, создаваемые Солнцем, которые примерно в два раза слабее лунных и по-другому направлены, поскольку (обычно) Луна и Солнце находятся в разных частях небосвода.

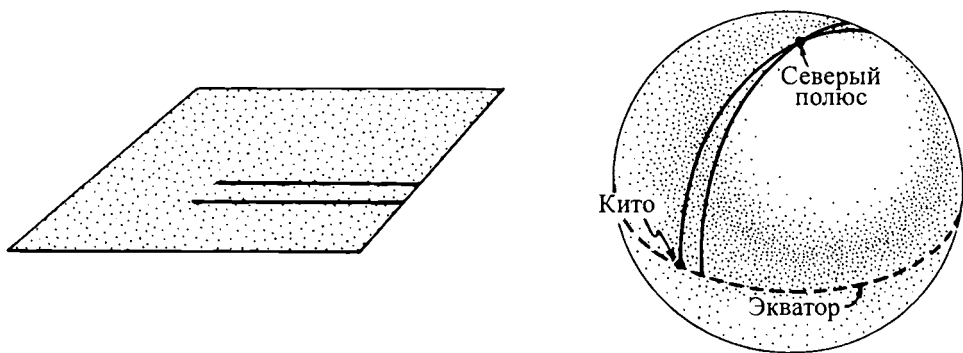
Приливы и отливы, наблюдаемые на Земле, являются результатом комбинации приливных сил, действующих со стороны Луны и со стороны Солнца.



Однако после двенадцати месяцев работы Эйнштейн вынужден был отказаться от этой интересной идеи. Причины были вескими: время относительно, ваше время — это смесь моего времени и моего пространства (если мы движемся друг относительно друга), поэтому, даже если у вас время искривлено, а пространство плоское, у меня будут искривлены и пространство, и время. То же самое можно сказать про все остальные движущиеся системы отсчета. Получается, что ваша, и только ваша система отсчета обладает плоским пространством, соответственно, с точки зрения физических законов, она принципиально отличается от всех остальных систем, а это противоречит принципу относительности.

Тем не менее, Эйнштейн чувствовал, что искривление времени — это ключ к решению проблемы, в таком случае, рассуждал он, предположим, что и время, и пространство искривлены во всех системах отсчета. Может быть, такая комбинированная кривизна объяснит приливные силы?

Однако такой подход поначалу показался обескураживающим. Во Вселенной может быть бесчисленное множество систем отсчета, движущихся по-разному, и следовательно, надо рассматривать бесконечное количество искривленных времен и пространств! К счастью, Эйнштейн понял, что Герман Минковский дал мощный инструмент,



- 2.4. Две прямые, параллельные изначально, никогда не пересекутся на плоской поверхности, такой, как лист бумаги, нарисованный слева, но могут пересечься на искривленной поверхности, так, как это происходит с меридианами на глобусе (рисунок справа)

позволяющий существенно упростить ситуацию: «Таким образом, пространство само по себе и время само по себе уходят в тень, и лишь их некоторая комбинация остается независимой реальностью». Существует лишь одно-единственное, уникальное четырехмерное пространство-время в нашей Вселенной; искривления различных пространств и времен должны быть представлены как кривизна единственного, абсолютного пространства-времени Минковского.

Эйнштейн пришел к такому заключению летом 1912 г. После четырех лет насмешек над идеей Минковского он вынужден был принять его абсолютное пространство-время и искривить его!

* * *

Что такое кривизна пространства-времени? Для простоты, рассмотрим сначала искривленную двумерную поверхность. На рис. 2.4 показаны две поверхности: плоская и искривленная. На плоской поверхности (примером которой может быть обычный лист бумаги) проведены две прямые параллельные линии, начинающиеся у одной стороны. Одним из постулатов евклидовой геометрии (названной так в честь создателя — древнегреческого математика Евклида) является то, что параллельные прямые на плоскости никогда не пересекаются. С помощью этого постулата можно проверять, является ли плоской поверхность, на которой нарисованы параллельные прямые: если можно найти хотя бы одну пару изначально параллельных прямых, которые пересекаются где-либо, то данное пространство не является плоским.

В качестве примера искривленного пространства на рис. 2.4 приведено изображение глобуса. Найдем на глобусе город Кито (столицу

2. ИСКРИВЛЕНИЕ ПРОСТРАНСТВА И ВРЕМЕНИ

Экватора), он расположен на экваторе. Проведем от него прямую линию, направленную на север. Эта линия пройдет по одной и той же долготе к северному полюсу.

Почему эту линию следует считать прямой? Этому есть два различных объяснения. Во-первых, это часть большого круга, и именно вдоль таких линий прокладывают маршруты самолетов, поскольку именно в этом случае они оказываются самыми короткими. Если провести любую другую линию между Кито и северным полюсом на глобусе, она будет длиннее.

Во-вторых, эта линия прямая в смысле рассуждений, которые мы использовали ранее, обсуждая пространство-время: если рассмотреть достаточно маленький участок, через который проходит наша линия, обнаружить на нем кривизну глобуса будет практически невозможно. В пределах этого участка часть большого круга будет прямой в обычном понимании этого слова, такой же, как прямая на плоском листе бумаги. Большой круг на глобусе является прямой линией в пределах любого маленького участка поверхности на своем пути.

Математики используют термин *геодезическая* для обозначения линий в искривленном пространстве, которые являются прямыми с этих двух точек зрения: представляют собой кратчайший путь и становятся прямыми в обычном смысле при рассмотрении в пределах малой окрестности.

Переместимся теперь на восток от Кито на нашем глобусе на несколько сантиметров и построим новую прямую линию (часть большого круга, геодезическую), которая на экваторе будет в точности параллельна проходящей через Кито. Так же, как и первая, эта линия пройдет через северный полюс. *Причиной, которая заставляет изначально параллельные прямые пересекаться, является кривизна нашего глобуса.*

* * *

После того как влияние искривления двумерной поверхности на ее свойства стало нам понятно, мы можем вернуться к четырехмерному пространству-времени.

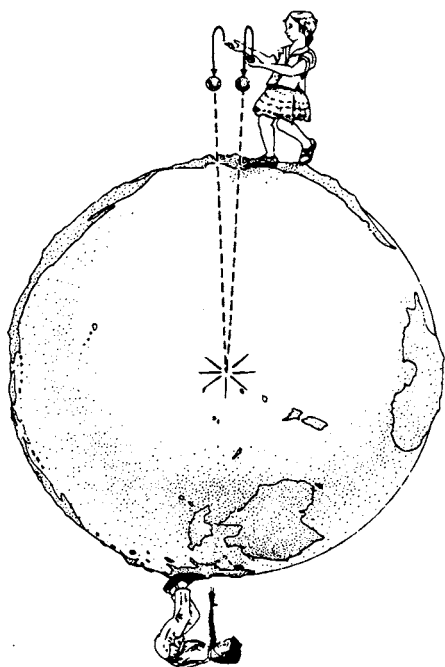
В идеализированной вселенной без гравитации нет ни искривлений пространства, ни искривлений времени; пространство-время в ней плоское. В такой вселенной, согласно законам специальной теории относительности Эйнштейна, свободно движущиеся частицы должны двигаться вдоль прямых линий. Относительно любой инерциальной системы отсчета у них должны быть постоянная скорость и

постоянное направление движения. Это — краеугольный камень специальной теории относительности. Далее, принцип эквивалентности Эйнштейна говорит, что в пределах маленькой инерциальной (свободно падающей) системы отсчета свободно движущиеся частицы в нашей реальной гравитирующей Вселенной также должны двигаться по прямой линии. Эта прямая линия в пределах маленькой инерциальной системы отсчета является полным аналогом прямолинейного поведения любой части большого круга на маленьком участке глобуса. Соответственно, так же как прямолинейность в пределах маленького участка на глобусе говорит о том, что линия является геодезической для его поверхности, прямолинейное движение частиц в маленькой области пространства-времени является свидетельством того, что эти частицы движутся по геодезическим в пространстве-времени. Это справедливо для любых частиц: *Любая свободно движущаяся частица (частица, на которую не действуют никакие силы, кроме гравитационных) будет двигаться вдоль геодезической линии в пространстве-времени.*

Как только Эйнштейн понял это, ему стало ясно, что приливные силы — это результат кривизны пространства-времени.

Чтобы понять почему, представьте себе следующий мысленный эксперимент (мой, не Эйнштейна). Стоя на льдине на северном полюсе вы держите два небольших шарика, по одному в каждой руке (см. рис. 2.5). Представьте теперь, что вы одновременно подбросили шарики так, чтобы они взлетели вверх по совершенно параллельным траекториям, и наблюдаете за тем, как они падают на Землю. В мысленных экспериментах, подобных этому, вы можете делать все, что захотите, если только это не нарушает законов физики. Давайте проследим, как шарики под действием гравитации падают не только до земной поверхности, но и дальше. Для этого будем считать, что шарики сделаны из материала, который проходит сквозь почву и камни без торможения вообще (маленькие черные дыры могли бы это), а вы и ваш друг на другой стороне Земли наблюдаете за их движением внутри Земли с помощью «лучевого» зрения.

Приливные силы будут прижимать падающие шарики друг к другу, так же, как они сжимают падающего космонавта (рис. 2.3). Величина этих сил такова, что шарики будут падать в точности к центру Земли, где они столкнутся друг с другом. Из этого мысленного эксперимента сам собой напрашивается вывод: каждый шарик движется по совершенно прямой линии (геодезической) через пространство-время. Вначале эти прямые параллельны, однако они пересекаются (шарики сталкиваются), что указывает нам на кривизну той области пространства-времени, где они находятся. Таким образом,



2.5. Два шарика, подброшенные по совершенно параллельным траекториям, столкнулись бы вблизи центра Земли, если бы могли пролететь сквозь нее

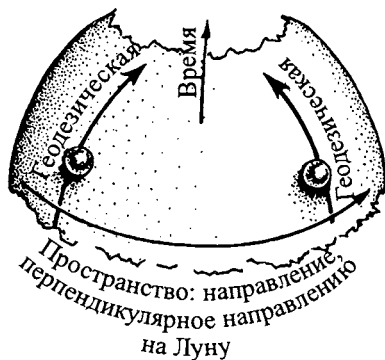
согласно Эйнштейну, именно кривизна пространства-времени приводит к тому, что параллельные геодезические пересекаются (а шарики — сталкиваются), подобно тому, как пересекаются параллельные прямые линии на глобусе (рис. 2.4), тогда как, с точки зрения Ньютона, пересечение — результат действия приливных сил.

Так же, как взгляды на природу пространства и времени оказались совершенно разными, совершенно разной оказалась с их точек зрения, причина сближения траекторий падающих тел. Эйнштейн назвал ее кривизной пространства-времени, Ньютон — приливными силами. Однако поскольку название не меняет сути происходящего, *возникновение приливных сил и кривизны пространства-времени должны быть одним и тем же явлением, описанным на разных языках.*

Человеку очень трудно представить себе искривленную поверхность, у которой больше двух измерений; наглядно изобразить искривленное четырехмерное пространство-время практически невозможно. Некоторое представление, однако, могут дать двумерные проекции пространства-времени. На рис. 2.6 представлены два примера, показывающие, как кривизна пространства-времени создает приливные растяжение и сжатие, вызывающие океанские приливы и отливы.



а



б

2.6. Два двумерных изображения искривленного пространства-времени вблизи Земли, создаваемого Луной. Это искривление приводит к приливному растяжению вдоль направления к Луне и растяжению поперек него. Эти растяжение и сжатие вызывают океанские приливы (см. Врезку 2.5)

На рис. 2.6а изображена часть пространства-времени вблизи Земли, включающая время и одну пространственную координату, в качестве которой выбрано направление к Луне. Луна искривляет пространство-время, и эта кривизна растягивает геодезические, как показано на рисунке. Соответственно, наблюдая за двумя свободно движущимися вдоль этих геодезических частицами, мы будем видеть, как они разлетаются, и будем интерпретировать это как результат действия приливных сил. Эти растягивающие силы (кривизна пространства-времени) будут действовать не только на свободно падающие частицы, но и на океаны, создавая выпуклости (см. рис. 2.5) на ближайшей к Луне части поверхности Земли и на противоположной ей. Эти две выпуклости будут пытаться следовать своим геодезическим в пространстве-времени (рис. 2.6а), для чего им следовало бы разлетаться друг от друга, однако земное тяготение (кривизна пространства-времени, создаваемая Землей; на рисунке не показана) препятствует этому, поэтому океаны лишь вздуваются, оставаясь на Земле.

На рис. 2.6б представлена другая часть пространства-времени вблизи Земли, включающая время и ту пространственную координату, которая перпендикулярна направлению на Луну. Искривление пространства-времени Луной приводит к тому, что геодезические в этом направлении прижимаются друг к другу. Соответственно, мы видим, что свободные частицы, движущиеся по геодезическим перпендикулярно направлению на Луну, сближаются, а океаны на Земле сжимаются в этом направлении. Приливное сжатие приводит к сдвигу океанов, показанному на Врезке 2.5.

* * *

Эйнштейн был профессором в Праге, когда летом 1912 г., он понял, что приливные силы и кривизна пространства-времени — одна и та же сущность. Это было замечательное открытие, хотя он и не был еще полностью в нем уверен, не представлял его себе в таком законченном виде, как я представляю его вам, и не мог с его помощью полностью объяснить гравитацию. Эйнштейн понял, что кривизна пространства-времени определяет движение свободных частиц, приливы и отливы океанов, но он не понимал еще, как образуется эта кривизна. Ему было ясно, что материя, из которой состоят Солнце, Луна и другие планеты, искривляет пространство-время. *Но как она это делает?* Поиск закона искривления стал основной целью Эйнштейна.

Через несколько недель после открытия искривления пространства-времени Эйнштейн переехал из Праги в Цюрих, где он должен был занять место профессора в своей альма-матер, ЕТН. После прибытия в Цюрих в августе 1912 г. Эйнштейн получил совет, который был ему необходим, от своего бывшего сокурсника, Марселя Гроссмана, занимавшего теперь здесь пост профессора математики. Эйнштейн поделился с ним своей идеей о том, что приливные силы есть результат кривизны пространства-времени, и спросил его, существует ли математический аппарат, с помощью которого можно было бы описать такую кривизну и получить законы, по которым материя искривляет пространство-время. Гроссман, который занимался другими проблемами геометрии, сказал вначале, что он не уверен в этом, однако после изучения литературы дал утвердительный ответ: да, нужные уравнения есть. Они были разработаны большей частью немецким математиком Бернхардом Риманом в шестидесятые годы XVII века, итальянцем Георгио Риччи в восьмидесятые и его студентом Туллио Леви-Чивита в девяностые годы того же века. Свой аппарат они называли «абсолютные дифференциальные вычисления» (позднее он получил название «тензорный анализ», а сейчас чаще называется «дифференциальной геометрией»). Однако, сказал Гроссман Эйнштейну, дифференциальная геометрия — ужасно сложная и запутанная вещь, в которую физикам лезть не следует. Увы, другого подхода к описанию законов искривления пространства-времени не было.

Под руководством Гроссмана Эйнштейн отправился в нелегкий путь по лабиринту дифференциальной геометрии. Гроссман учил Эйнштейна математике, Эйнштейн учил Гроссмана некоторым разделам физики. Позднее Эйнштейн цитировал Гроссмана, который

говорил: «Должен признать, что я почерпнул кое-что весьма важное из этих уроков. Раньше, когда я садился на стул и чувствовал тепло, оставшееся от кого-то, сидевшего на нем передо мной, я испытывал нервную дрожь, однако теперь физики убедили меня, что тепло есть нечто совершенно безличное».

Изучение дифференциальной геометрии было нелегким делом для Эйнштейна. Дух этой науки был чужд его физической интуиции, которую он считал столь естественной. В конце октября 1912 г. он писал Арнольду Зоммерфельду, выдающемуся немецкому физiku: «Сейчас я полностью поглощен проблемой гравитации, надеюсь, с помощью нашего математика (Гроссмана), который является моим другом, я смогу преодолеть все трудности. Очевидно одно: мне никогда в жизни не было так трудно, и сейчас я преисполнен уважения к математике, изящнейшие части которой я, по простоте душевной, считал до сих пор простым украшением! По сравнению с ними теория относительности в ее начальном виде [специальная теория относительности] — детская забава».

Эйнштейн и Гроссман вместе всю осень и зиму бились над решением задачи о том, как материя заставляет искривляться пространство-время, но, несмотря на все усилия, им не удавалось привести математические выкладки в соответствие с представлениями Эйнштейна. Закон кривизны ускользал от них.

Эйнштейн был уверен, что этот закон должен удовлетворять обобщенному (расширенному) варианту принципа относительности: он должен выглядеть одинаково во всех системах отсчета, как инерциальных (свободно падающих), так и не инерциальных. Закон искривления должен быть сформулирован не только безотносительно какой-либо конкретной системы отсчета, но и безотносительно какого-либо класса систем⁴. К сожалению, уравнения дифференциальной геометрии не давали ему такой возможности. Наконец, в конце зимы Эйнштейн и Гроссман сдались и опубликовали лучший закон искривления пространства-времени, который им удалось найти, — закон, который был определен для специального класса систем отсчета.

Эйнштейн, который был негибким оптимистом, вначале быстро убедил себя в том, что это не беда. Своему другу физiku Полю Эренфесту он писал в начале 1913 г.: «Что может быть прекрасней, чем эта необходимость конкретизации, следующая из [математических уравнений для законов сохранения энергии и импульса]?» Однако

⁴ Эйнштейн использовал для этого варианта специальный термин «общая ковариантность», хотя на самом деле это естественное расширение его принципа относительности.

2. ИСКРИВЛЕНИЕ ПРОСТРАНСТВА И ВРЕМЕНИ

после некоторых размышлений стал расценивать это как катастрофу. Лоренцу он писал в 1913 г.: «У меня по-прежнему нет твердой уверенности в том, что теория [“закон искривления”] верна [Поскольку она не удовлетворяет обобщенному принципу относительности], она противоречит своим собственным основам и подвешена в воздухе».

Пока Эйнштейн и Гроссман боролись с кривизной пространства-времени, другие европейские физики также пытались объединить законы гравитации со специальной теорией относительности. Это были Гуннар Нордстрём в Финляндии, Густав Май в Германии, Макс Абрагам в Италии, но никто из них не принял точку зрения Эйнштейна. Вместо того чтобы рассматривать гравитацию как кривизну пространства-времени, они рассматривали ее как силовое поле, подобное электромагнитному, которое должно существовать в плоском пространстве-времени Минковского. Это было неудивительно: математика, которой пользовались Эйнштейн и Гроссман, была ужасающе сложна, а в результате давала закон искривления, который нарушал заложенный в своей основе принцип.

Столкновения между сторонниками различных точек зрения не прекращались. Вот что писал Абрагам: «Те, кто, подобно автору, регулярно предостерегали остальных от эйфории [от принципа относительности], могут теперь с удовлетворением отметить тот факт, что его авторы сами убедились в его несостоятельности». Эйнштейн отвечал ему на это: «С моей точки зрения, нет никаких признаков провала принципа относительности. Сомнения в его правильности совершенно беспочвенны». В частной беседе он говорил, что теория гравитации Абрагама — это «великолепная лошадь, у которой не хватает трех ног». О своих разногласиях с другими физиками Эйнштейн писал своим друзьям в 1913–1914 гг.: «Я очень рад, что эта проблема, наконец, привлекла к себе внимание, которого она заслуживает. Я люблю споры, как Фигаро, задавая им тон». «Я доволен, что коллеги всерьез занялись теорией [созданной Гроссманом и мной], хотя бы и ради того, чтобы убить ее; конечно, по сравнению с ней, теория Нордстрёма выглядит куда более правдоподобной. Однако она, как и другие, основана на представлении о том, что пространство-время может быть только плоским [как у Минковского], что мне кажется необоснованным».

* * *

В апреле 1914 г. Эйнштейн получил должность профессора в Берлине, позволяющую не заниматься преподаванием и оставил ЕТН. Наконец-то, он мог заниматься своими исследованиями столько,

сколько ему хотелось, причем делать это бок о бок с выдающимися физиками: Максом Планком и Вальтером Нернстом. Несмотря на то что в июне 1914 г. началась первая мировая война, Эйнштейн продолжал свои поиски приемлемого описания того, как материя искривляет пространство-время, описания, не связанного с каким-либо специальным классом систем отсчета.

Берлин от Геттингена, места, где ранее работал Минковский, а сейчас жил один из величайших математиков всех времен Давид Гильберт, отделяли всего три часа на поезде. В 1914–1915 гг. Гильберт проявлял горячий интерес к физике. Идеи, опубликованные Эйнштейном, привели его в восторг, и в конце июня 1915 г. он пригласил Эйнштейна к себе в гости. Эйнштейн провел там около двух недель и прочитал шесть двухчасовых лекций Гильберту и его коллегам. Через несколько дней после возвращения он написал своему другу: «Я был очень рад, когда понял, что в Геттингене понимают мои работы вплоть до мельчайших деталей. От самого Гильберта я просто в восторге».

Несколько месяцев спустя Эйнштейн был более чем когда-либо разочарован законом искривления Эйнштейна–Гроссмана. Мало того, что этот закон не соответствовал его представлению о том, что закон гравитации должен быть одинаков во всех системах отсчета, более того, после сложнейших вычислений Эйнштейн не получил правильной величины для аномального сдвига перигелия Меркурия! Он надеялся, что его теория, в отличие от законов Ньютона, позволит правильно рассчитать этот сдвиг, что стало бы ее экспериментальным подтверждением. Вместо этого вычисления, основанные на законе Эйнштейна–Гроссмана, давали вдвое меньшую величину, чем та, которая наблюдалась экспериментально.

Пересматривая старые расчеты, сделанные вместе с Гроссманом, Эйнштейн обнаружил несколько серьезных ошибок. В течение всего октября он лихорадочно исправлял вычисления и 4 ноября на еженедельной пленарной сессии Прусской академии наук представил обновленный закон искривления, также зависящий от выбора системы отсчета, хотя и в меньшей степени.

По-прежнему не испытывая удовлетворения, Эйнштейн продолжал напряженно работать, нашел еще несколько ошибок и на следующей сессии 11 ноября представил очередной вариант своей теории, в котором, однако, остались и зависимость от выбора системы отсчета, и нарушение принципа относительности.

Смирившись с этим, Эйнштейн в течение следующей недели бился над получением таких следствий из своей теории, которые

2. ИСКРИВЛЕНИЕ ПРОСТРАНСТВА И ВРЕМЕНИ

могли бы быть проверенны астрономическими наблюдениями. В частности, он обнаружил, что, согласно ей, свет от звезды, проходя у самого края Солнца, должен отклоняться его гравитацией на угол в 1,7 угловой секунды (это предсказание могло быть проверено через четыре года посредством точных измерений во время солнечного затмения). И что было гораздо важнее для Эйнштейна, новый вариант закона давал правильную величину для смещения перигелия Меркурия! Он был вне себя от радости, возбуждение было так велико, что в течение трех дней он не мог работать. Свои новые результаты он с триумфом представил на очередном собрании академии 18 ноября.

Однако нарушение принципа относительности по-прежнему беспокоило его. На следующей неделе он вновь стал проверять свои вычисления и обнаружил еще одну ошибку — критическую. После этого все стало на свои места. Весь математический формализм был теперь совершенно независим от специальных систем отсчета, он имел одну и ту же форму во всех системах (см. Врезку 2.6) и, таким образом, удовлетворял принципу относительности. То, что Эйнштейн предвидел в 1914 г., полностью подтвердилось. Исправленный формализм давал такие же предсказания для величины смещения перигелия Меркурия, отклонения световых лучей и, кроме того, он включал в себя описание эффекта гравитационного замедления времени, предсказанного Эйнштейном в 1907 г. Все эти выводы вместе с окончательным вариантом общей теории относительности он представил Прусской академии 25 ноября.

Через три дня Эйнштейн писал своему другу Арнольду Зоммерфельду: «Последний месяц стал для меня одним из самых трудных и беспокойных в моей жизни, но также и одним из самых удачных». Вот цитата из январского письма Полю Эренфесту: «Представьте себе мой восторг, когда выяснилось, что мой новый закон искривления удовлетворяет принципу относительности и, кроме того, правильно предсказывает величину смещения перигелия Меркурия. В течение нескольких дней я был вне себя от радости». Позднее Эйнштейн описывал этот период следующими словами: «То, что я чувствовал в те годы, блуждая во тьме в поисках истины, которую чувствовал, страстно желал, но не мог выразить, то ошибаясь, то вновь обретая уверенность, вплоть до прорыва к ясному ее пониманию, может понять лишь тот, кто сам пережил нечто подобное».

* * *

Примечательно, что Эйнштейн не был первым, кто получил верную форму закона искривления пространства-времени. Первым ее

получил Гильберт. Осенью 1915 г., пока Эйнштейн с трудом подвигался к цели, делая одну математическую ошибку за другой, Гильберт размышлял о том, что рассказал ему Эйнштейн во время своего визита в Геттинген. Решение пришло к нему, когда он был в отпуске на острове Рюген в Балтийском море, и всего за несколько недель он получил ответ, сделав это не методом проб и ошибок, как Эйнштейн, а краткими и изящными математическими выкладками. Гильберт представил свои расчеты и окончательный вид закона искривления пространства-времени на собрании Королевской академии наук в Геттингене 20 ноября 1915 г., за 5 дней до того, как Эйнштейн представил тот же закон на собрании Прусской академии в Берлине.

Естественно, этот закон получил вскоре название *уравнение поля Эйнштейна* (а не Гильберта), с чем сам Гильберт был полностью согласен. Гильберт сделал последние шаги к этому открытию независимо и даже чуть раньше Эйнштейна, однако практически все, что им предшествовало, было сделано Эйнштейном: он догадался, что приливные силы есть следствие искривления пространства-времени, он предсказал, что закон этого искривления должен удовлетворять принципу относительности, он сам проделал 90 процентов пути к уравнению поля Эйнштейна. Можно утверждать, что без Эйнштейна релятивистский закон гравитации не был бы открыт еще в течение нескольких десятилетий.

Врезка 2.6

Уравнение поля Эйнштейна: закон искривления пространства-времени

Закон искривления пространства-времени Эйнштейна утверждает, что «масса и давление искривляют пространство-время». Рассмотрим это подробнее.

Выберем произвольную систему отсчета в некоторой точке пространства-времени. Будем изучать кривизну пространства-времени в этой системе, наблюдая за тем, как она (или приливные силы) сближает или удаляет друг от друга свободно движущиеся частицы в каждом из трех направлений выбранной системы отсчета: север-юг, восток-запад, верх-низ. Частицы будут двигаться по своим геодезическим (см. рис. 2.6), а скорость, с которой они сближаются или удаляются, будет пропорциональна кривизне вдоль направления между ними. Если они сближаются, как на рисунках *а* и *б*, кривизна считается положительной, если удаляются — отрицательной (рис. *в*).

Сложим кривизны во всех трех направлениях вместе. Уравнение Эйнштейна говорит, что суммарная кривизна пропорциональна плотности массы в окрестности частиц (умноженной на квадрат ско-

рости света для преобразования ее в плотность энергии; см. Врезку 5.2) плюс утроенное давление материи в этой окрестности.

Даже если мы с вами будем находиться в одном и том же месте в пространстве-времени (например, будем пролетать над Парижем в полдень 14 июля 1996 г.), в том случае, если мы будем двигаться друг



относительно друга, ваше пространство будет отличаться от моего; аналогично, плотность массы (например, плотность воздуха вокруг нас), измеренная вами, будет отличаться от той, что получится у меня; давление материи (например, давление воздуха) также окажется различным. Более того, окажется, что кривизна пространства-времени, согласно вашим измерениям, будет отличаться от моей. Однако и у вас, и у меня получится, что суммарная кривизна пропорциональна плотности плюс утроенное давление. В этом смысле уравнения поля Эйнштейна одинаковы во всех системах отсчета, они удовлетворяют принципу относительности Эйнштейна.

В большинстве случаев (например, повсюду в Солнечной системе) давление материи очень мало по сравнению с плотностью масс, умноженной на скорость света, и поэтому его вклад в кривизну пространства-времени пренебрежимо мал. *Пространство-время искривляется практически только массой.* Лишь в глубине нейтронных звезд (см. главу 5) и еще в некоторых экзотических местах вклад давления становится существенным.

При помощи уравнения поля Эйнштейн и другие физики не только объяснили отклонение лучей света Солнцем и все особенности движения планет по своим орбитам, включая загадочное смещение перигелия Меркурия, они также предсказали существование черных дыр (глава 3), гравитационных волн (глава 10), сингулярностей пространства-времени (глава 13) и, возможно, существование белых дыр и машин времени (глава 14). Остальная часть этой книги посвящена наследию гения Эйнштейна.

Просматривая научные публикации Эйнштейна (я вынужден был использовать для этого русский сборник его избранных трудов, изданный в 1965 г., поскольку немецкого языка я не знаю, а большинство его работ не были переведены на английский вплоть до 1993 года!), я столкнулся с разительной переменной стили его работ, произошедшей в 1912 г. До этого его статьи поражали своей элеган-

тностью, глубочайшей интуицией и умеренным использованием математики. Большую часть его рассуждений я и мои друзья в неизменном виде используем сейчас, в девяностые годы XX века, читая курсы лекций по теории относительности. Сделать их лучше не удалось никому. Начиная же с 1912 г. работы Эйнштейна наполняются сложными математическими выкладками, которые, впрочем, перемежаются глубоким анализом сути физических законов. Нет сомнения, что именно комбинация физической интуиции и математической культуры, которой из всех физиков, занимавшихся теорией гравитации в 1912–1915 гг., обладал только Эйнштейн, привела его к открытию релятивистских законов гравитации.

Однако Эйнштейну использование математических методов давалось с большим трудом. Как позднее говорил Гильберт: «В Геттингене любой мальчишка понимает четырехмерную геометрию лучше, чем Эйнштейн. И все же именно он сделал это [сформулировал релятивистские законы гравитации], а не кто-то из математиков». Он сделал это потому, что одной математики было недостаточно, было необходимо гениальное физическое предвидение Эйнштейна.

Конечно, Гильберт преувеличивал. Эйнштейн был очень неплохим математиком, хотя его математическая техника не шла ни в какое сравнение с его пониманием физики. В результате, его выкладки, сделанные после 1912 г., почти никогда не используются в оригинальном виде. Последователи научились делать их гораздо лучше. И по мере того, как теоретическая физика с годами быстро становилась все более и более математической, роль Эйнштейна становилась в ней все менее и менее заметной. Его факел подхватили другие.

ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ ОТКРЫТЫ И ОТВЕРГНУТЫ

глава, в которой законы искривленного пространства Эйнштейна предсказывают черные дыры, а сам Эйнштейн их отвергает

«Важным результатом этого исследования, — писал Эйнштейн в технической статье в 1939 г., — является объяснение того, почему «Швардшильдовские сингулярности» не существуют в физической реальности». Этими словами он категорически отрекся от своего собственного открытия: черных дыр, возможность существования которых предсказывала общая теория относительности.

К этому времени были известны лишь некоторые свойства черных дыр, полученные как следствия из законов Эйнштейна, и даже названия своего они еще не получили; их называли «Шварцшильдовские сингулярности». Тем не менее, уже было ясно, что любой объект, попавший в черную дыру, никогда не сможет вернуться обратно и даже не сможет послать оттуда никакого сигнала. Этого было достаточно, чтобы убедить Эйнштейна и большинство других физиков тех лет в том, что черные дыры — это совершенно противоестественные объекты, которым не место в реальном мире. Законы физики, считали они, должны каким-то образом защищать Вселенную от подобных монстров.

Что же такого узнали исследователи о черных дырах, что вызвало такое неприятие Эйнштейна? Сколь достоверным можно было считать их предсказание общей теорией относительности? Как мог Эйнштейн отвергать это предсказание и в то же время сохранять уверенность в правильности своих релятивистских законов? Ответы на эти вопросы следует искать в XVIII веке.

В течение XVIII века ученые, которых в то время называли натурфилософами (естественными философами), были уверены, что

гравитация подчиняется законам Ньютона, а свет представляет собой поток частиц (корпускул), которые испускаются источником с одной и той же, универсальной скоростью. Наблюдения за движением спутников Юпитера позволили установить, что эта скорость составляет примерно 300000 километров в секунду.

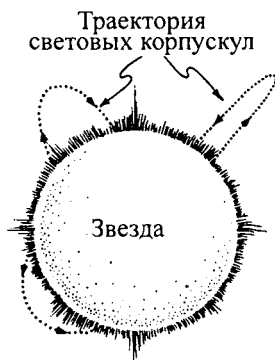
В 1783 г. британский натурфилософ Митчелл, объединив корпускулярную модель света с законами тяготения Ньютона, предсказал, как должны выглядеть очень компактные звезды. Он сделал это посредством мысленного эксперимента, описание которого я приведу в несколько измененном виде.

Подбросим частицу с поверхности звезды с некоторой начальной скоростью и предоставим ей возможность двигаться свободно. Если начальная скорость мала, притяжение звезды затормозит ее, остановит и заставит упасть на поверхность. Если же начальная скорость будет достаточно велика, притяжение затормозит ее, но не сможет остановить; частица улетит прочь от звезды. Минимальная скорость, которую надо сообщить частице для того, чтобы она покинула звезду, называется «скоростью отрыва». Для частицы, стартующей с поверхности Земли, эта скорость равна 11 километров в секунду; а для того чтобы она покинула поверхность Солнца, ее начальная скорость должна составлять 617 километров в секунду, или 0,2 % от скорости света.

Используя законы Ньютона, Митчелл мог рассчитывать скорость отрыва и знал, что она пропорциональна квадрату массы звезды, деленному на ее диаметр. Таким образом, при одной и той же массе, чем меньше диаметр звезды, тем больше должна быть скорость отрыва. Объяснение этому очень простое: чем меньше диаметр, тем ближе поверхность к центру звезды и, соответственно, работа, которую надо совершить против сил гравитационного притяжения, должна быть больше.

В таком случае, рассуждал Митчелл, должен существовать *критический диаметр*, для которого скорость отрыва равна скорости света. Если световые корпускулы притягиваются звездой так же, как и все остальные частицы, то свет не сможет покинуть звезду, диаметр которой меньше критического. Будучи испущенными с поверхности с обычной скоростью света, эти корпускулы сначала остановятся, а затем упадут обратно на поверхность (см. рис. 3.1).

Митчеллу не составляло труда рассчитать критический диаметр. Так, для звезды, масса которой равна солнечной, он должен был составлять 5,89 километра, для звезд большей массы эта величина пропорционально увеличивается.



3.1. Поведение света, испущенного звездой, диаметр которой меньше критического, согласно расчетам, сделанным Джоном Митчеллом в 1783 г. на основании корпускулярной модели света и закона тяготения Ньютона

С точки зрения законов физики, известных в XVIII веке, существование таких звезд ничему не противоречило. Поэтому Митчелл предположил, что во Вселенной может быть огромное количество таких темных звезд, невидимых с Земли, поскольку все испускаемые ими корпускулы неизбежно падают обратно. Эти *темные звезды* можно считать «черными дырами XVIII века».

Митчелл, который был ректором университета Торнхилл в английском городе Йоркшир, доложил о своем предсказании существования темных звезд на заседании Лондонского Королевского общества 27 ноября 1783 г. Этот доклад определенно стал сенсацией среди британских ученых. Через тринадцать лет французский философ Пьер Симон Лаплас опубликовал аналогичное предсказание в первом издании своей знаменитой работы *Система мира*, без ссылки на Митчелла. Это предсказание присутствовало и во втором издании (1799 г.), однако незадолго до выхода в свет третьего издания (1808 г.) Томас Юнг открыл явление интерференции света¹, что заставило натурфилософов отказаться от корпускулярной модели света в пользу волновой, разработанной Христианом Гюйгенсом. Было совершенно неясно, как притяжение звезды, описываемое законами Ньютона, действует на световые волны. Видимо, по этой причине Лаплас убрал концепцию темных звезд из третьего и последующих изданий своей книги.

* * *

Только после того как Эйнштейн сформулировал свои релятивистские законы гравитации в ноябре 1915 г., у физиков вновь появилась уверенность в том, что они понимают природу и света, и

¹ Глава 10.

тяготения настолько хорошо, что могут рассчитать, как притяжение звезды влияет на излучаемый ею свет. Теперь они снова могли вернуться к рассмотрению темных звезд (черных дыр) Митчелла и Лапласа.

Первый шаг сделал Карл Шварцшильд, один из самых выдающихся астрофизиков начала XX столетия. Шварцшильд служил в немецкой армии и воевал на русском фронте (шла Первая мировая война), когда прочитал в Известиях Прусской академии наук доклад Эйнштейна, посвященный общей теории относительности. Сразу после этого он задался вопросом: какие предсказания, касающиеся звезд, следуют из новых законов гравитации?

Поскольку анализ несферических или вращающихся звезд был математически слишком сложен, Шварцшильд решил ограничиться вначале невращающимися звездами, имеющими форму идеального шара, и получить решение для пространства вокруг звезды, оставив рассмотрение ее внутренней области на потом. Ему потребовалось всего несколько дней для того, чтобы, используя уравнение поля Эйнштейна, получить абсолютно точное решение для кривизны пространства-времени снаружи *любой* сферической, не вращающейся звезды. Его вычисления были элегантны, уравнения красивы, а форма пространства-времени, которую они описывали, получившая вскоре название *шварцшильдовской геометрии*, оказала колоссальное влияние на понимание гравитации и устройства Вселенной.

Шварцшильд послал Эйнштейну свою статью, содержащую эти расчеты, и Эйнштейн представил ее на собрании Прусской академии наук в Берлине 13 января 1916 г., а через несколько недель представил и вторую его статью, в которой было получено точное решение для кривизны пространства-времени *внутри* звезд. Увы, всего через четыре месяца научная карьера Шварцшильда трагически оборвалась: он умер от болезни, полученной на фронте, о чем Эйнштейн сообщил академии 19 июня.

* * *

Шварцшильдовская геометрия — это первый конкретный пример искривленного пространства-времени, с которым мы встречаемся в этой книге. По этой причине, а также потому, что именно с ее помощью можно определить свойства черных дыр, мы рассмотрим ее подробно.

Если бы мы в своей повседневной жизни представляли себе пространство и время как единый, абсолютный, четырехмерный



Карл Шварцшильд в своей мантии в Геттингене (Германия). [Предоставлено Визуальным архивом Эмилио Сегре Американского института физики]

континуум, было бы вполне логично описывать шварцшильдовскую геометрию на языке искривленного четырехмерного пространства-времени. Однако мы привыкли иметь дело по отдельности с трехмерным пространством и одномерным временем. Поэтому я предлагаю вам описание, в котором искривленное пространство-время будет разделено на искривленное пространство и искривленное время.

Поскольку пространство и время относительны (если мы движемся относительно друг друга, то мои пространство и время будут отличаться от ваших²), для такого разделения требуется определить систему отсчета. Для звезды будет естественно выбрать такую систему отсчета, в которой эта звезда покоится; назовем ее собственной системой отсчета этой звезды. Другими словами, разумнее вначале рассмотреть собственные пространство и время этой звезды.

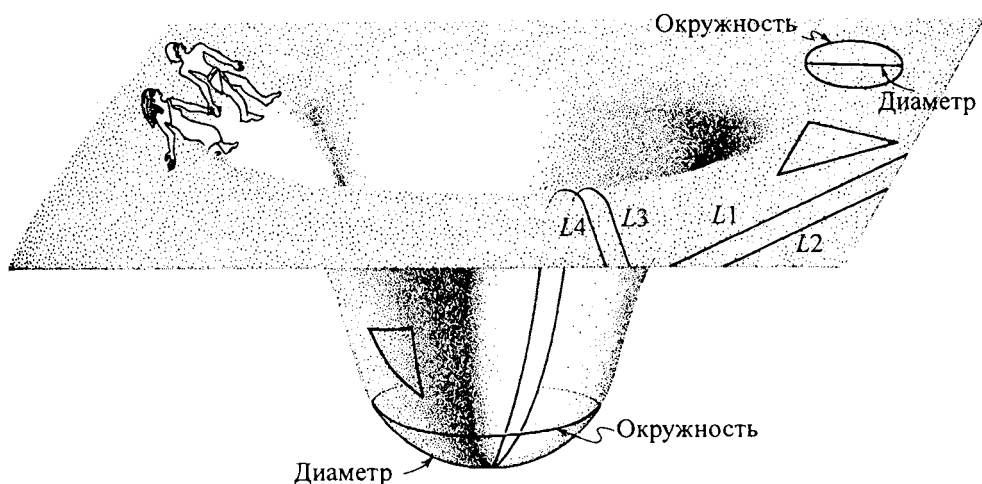
В качестве способа визуализации искривления пространства звезды я буду использовать рисунок, называемый *вложенной диаграммой*. Поскольку вложенные диаграммы будут играть важную роль в последующих главах, я подробно, с использованием аналогий, объясню, что это такое.

Представьте себе семью человекоподобных созданий, живущих во вселенной, имеющей всего два пространственных измерения. Пусть их вселенная искривлена (имеет вид поверхности с чашеобразной впадиной; см. рис. 3.2). Сами создания также двумерны; их размер в направлении, перпендикулярном поверхности, будем считать бесконечно малым. Кроме того, они не могут выглянуть из этой поверхности: световые лучи в их вселенной распространяются строго в пределах поверхности и никогда не покидают ее. У этих «плоскати-ков», как я буду их называть, нет никакого способа узнать о том, что происходит вне их двумерного мира.

Плоскатики могут изучать геометрию своей вселенной, исследуя прямые линии, треугольники и окружности. Их прямые — это геодезические, о которых говорилось в главе 2 (рис. 2.4 и соответствующие пояснения): самые прямые линии, которые существуют в этом двумерном мире. На дне впадины, которое на рис. 3.2 имеет форму сферического сегмента, эти прямые линии являются частями больших кругов, подобно земному экватору или параллелям. Вдали же от впадины эта вселенная плоская, и прямые линии представляют собой прямые в нашем обычном понимании.

Если плоскатики рассмотрят любую пару параллельных прямых в этой плоской части вселенной (например, L_1 и L_2 на рис. 3.2), они

² Рисунок 1.3 и притча о Млечине и Сероне из главы 2.



3.2. Двумерная вселенная, населенная «плоскатиками»

обнаружат, что эти линии никогда не пересекаются. Таким образом, они могут убедиться, что эта часть их пространства действительно плоская. С другой стороны, если они построят параллельные линии $L3$ и $L4$ вдали от впадины, а затем продлят их до нее, стараясь сохранять их прямыми, насколько это возможно (так, чтобы они оставались геодезическими), они увидят, что на дне впадины эти линии пересекаются. Отсюда они могут заключить, что эта область пространства искривленная.

Плоскатики могут также проверить то, что область вдали от впадины плоская, и измерить кривизну пространства внутри впадины при помощи окружностей и треугольников. В плоской области длина любой окружности равна числу π (3,14159265), умноженному на ее диаметр. Во впадине длины окружностей будут меньше, например, длина большого круга вблизи ее дна, изображенного на рис. 3.2, равна двум с половиной диаметрам. Если плоскатики построят треугольник, стороны которого — прямые линии (геодезические), и вычислят сумму его внутренних углов, они получают 180° для треугольников в плоской области и больше, чем 180° , если треугольник находится в искривленной части вселенной.

Обнаружив посредством таких измерений, что их вселенная искривлена, плоскатики могут начать строить предположения о существовании трехмерного пространства, в котором находится их двумерная вселенная или в которое она *вложена*.

Они могут назвать это трехмерное пространство *гиперпространством* и фантазировать о его свойствах. Например, они могут пред-

положить, что оно плоское в евклидовом смысле, т. е. параллельные прямые в нем никогда не пересекаются.

Нам с вами представить такое гиперпространство совсем несложно — это наше обычное трехмерное пространство. Однако плоскатыкам сделать это было бы очень непросто. Более того, у них не было бы никакой возможности проверить, существует ли это гиперпространство на самом деле, ведь ни выйти из своей двумерной вселенной, ни бросить взгляд наружу из нее они не могут. Для них гиперпространство навсегда осталось бы лишь гипотезой.

Это третье измерение гиперпространства не имеет никакого отношения ко времени плоскатыков, которое они также могли бы назвать третьим измерением. В общей сложности, размышляя о гиперпространстве, плоскатыки оперировали бы четырьмя измерениями: двумя пространственными измерениями своей вселенной, одним временным и одним дополнительным пространственным измерением гиперпространства.

* * *

Мы с вами — объемные существа и живем в трехмерном пространстве. Если бы мы провели исследования геометрии нашего пространства внутри и вблизи звезды *шварцшильдовской геометрии*, мы обнаружили бы, что оно искривлено, подобно тому, как в нашем примере была искривлена вселенная плоскатыков.

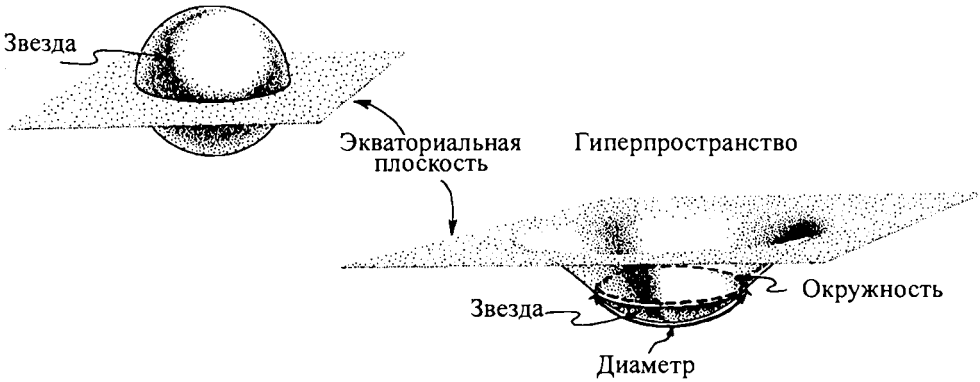
Можно строить предположения о высших измерениях — плоском гиперпространстве, в которое вложено наше искривленное трехмерное пространство. Оказывается, такое гиперпространство должно быть шестимерным, чтобы в него можно было вложить искривленное трехмерное пространство, подобное нашему (а если вспомнить, что наша Вселенная имеет еще временное измерение, всего измерений оказывается семь).

Наглядно изобразить наше трехмерное пространство, вложенное в шестимерное гиперпространство, мне ничуть не легче, чем плоскатыкам — свое двумерное, вложенное в трехмерное. Однако существует прием, который окажет нам неоценимую помощь (см. рис. 3.3).

Рис. 3.3 иллюстрирует мысленный эксперимент: тонкий лист разрезает звезду в плоскости ее экватора так, что совершенно одинаковые половинки звезды оказываются сверху и снизу. Хотя этот лист на рисунке кажется плоским, на самом деле он таким не является. Массивная звезда искривляет трехмерное пространство внутри и вокруг звезды, но изобразить это искривление на обычном рисунке

3. ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ ОТКРЫТЫ И ОТВЕРГНУТЫ

Физическое пространство



3.3. Кривизна трехмерного пространства внутри и вокруг звезды (слева сверху) и ее представление на *вложенной диаграмме* (справа внизу). Эта кривизна предсказывается шварцшильдовским решением уравнения Эйнштейна

(рис. 3.3, слева) невозможно. Это искривление выгибает лист, но на этом рисунке изгиб не виден. Однако мы можем исследовать форму искривления, если будем проводить геометрические измерения в нашем трехмерном пространстве, точно так же, как их делали плоскатики в своей двумерной вселенной. Такие измерения покажут, что существуют прямые, изначально параллельные линии, которые пересекаются в центре звезды, что длина любой окружности вблизи или внутри звезды меньше, чем ее диаметр, умноженный на число π , и что сумма внутренних углов любого треугольника в этой области больше 180° . Все эти свойства искривленного пространства предсказываются шварцшильдовским решением уравнения Эйнштейна.

Чтобы представить наглядно шварцшильдовскую кривизну, мы можем, подобно плоскатикам, мысленно перенести лист из искривленного трехмерного пространства нашей реальной Вселенной в воображаемое плоское гиперпространство (см. справа внизу на рис. 3.3). В этом не искривленном гиперпространстве лист может сохранить свою форму, лишь выгнувшись в том месте, где была звезда. Такие изображения двумерных поверхностей, взятые из нашей искривленной Вселенной и помещенные в гипотетическое плоское трехмерное пространство, и называются *вложенными диаграммами*.

Не следует поддаваться искушению отождествить третье измерение гиперпространства с третьим пространственным измерением нашей Вселенной. Третье измерение в гиперпространстве не имеет к измерениям нашего пространства никакого отношения. Это измерение, в которое мы не можем перейти и из которого не можем

получить никакой информации; оно чисто вымышленное. Зато с его помощью мы сможем наглядно представить геометрию нашего искривленного пространства, пространства, где существуют черные дыры, гравитационные волны, сингулярности и червоточины (см. главы 6, 7, 10, 13 и 14).

Как показывает вложенная диаграмма на рис. 3.3, шварцшильдовская геометрия листа, взятого из экваториальной плоскости звезды, качественно такая же, как и у двумерного пространства и в нашем примере с плоскатиками: внутри звезды она искривлена и имеет чашеобразную форму, вдали от звезды она становится плоской. Так же как и большой круг в углублении двумерного пространства (рис. 3.2), окружность звезды, деленная на ее диаметр, здесь оказывается меньше, чем π . Для нашего Солнца отношение длины окружности к диаметру оказывается меньше π на несколько миллионов долей; другими словами, пространство внутри Солнца плоское с точностью до нескольких долей миллиона. Тем не менее, если Солнце, сохраняя свою массу, будет становиться все меньше и меньше, кривизна внутри будет становиться больше и больше, впадина на вложенной диаграмме (рис. 3.3) будет становиться все глубже и глубже, и отношение длины его окружности к диаметру может стать гораздо меньше π .

Поскольку пространство различно в различных системах отсчета («ваше пространство — это смесь моего пространства и моего времени, если мы движемся друг относительно друга»), особенности кривизны пространства у звезды будут отличаться при наблюдении из системы отсчета, которая движется с большой скоростью относительно звезды, и из системы, которая относительно ее покоится. В быстро движущейся системе отсчета звезда будет несколько сплюснута в направлении, перпендикулярном направлению движения, а вложенная диаграмма будет похожа на рис. 3.3, с той разницей, что углубление будет сжато с боков и вытянуто. Это сплющивание в искривленном пространстве и есть сокращение размеров, которое Фицджеральд открыл во вселенной без гравитации (см. главу 1).

Шварцшильдовское решение уравнения поля Эйнштейна описывает не только кривизну пространства, но и искривление времени вблизи звезды, искривление, создаваемое ее гравитацией. В системе отсчета, которая покоится относительно звезды, это искривление в точности соответствует гравитационному замедлению времени, обсуждавшемуся в главе 2 (Врезка 2.4 и соответствующее обсуждение).

Вблизи поверхности звезды время течет медленнее, чем вдали от нее, и еще медленнее течет оно в ее центре.

3. ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ ОТКРЫТЫ И ОТВЕРГНУТЫ

В случае Солнца искривление времени очень мало: у поверхности замедление составляет примерно 2 миллионные доли (64 секунды в год) по сравнению с его течением вдали от Солнца, а в его центре эта величина достигает лишь одной стотысячной доли (5 минут в год). Однако если предположить, что при постоянной массе Солнце вдруг начнет сжиматься так, что его поверхность будет приближаться к центру, гравитация будет становиться сильнее, и замедление времени будет расти.

Одним из следствий этого искривления времени является *гравитационное красное смещение* света, излучаемого с поверхности звезды. Поскольку частота световых колебаний связана с течением времени в том месте, где они излучаются, на Земле свет, испущенный атомами у поверхности Солнца, будет иметь меньшую частоту, чем испускаемый такими же атомами межзвездного пространства. Смещение частоты в точности будет равно замедлению времени. Уменьшение частоты означает увеличение длины волны, поэтому спектр излучения звезды будет смещен в красную область на ту же величину, на которую замедляется время на поверхности звезды.

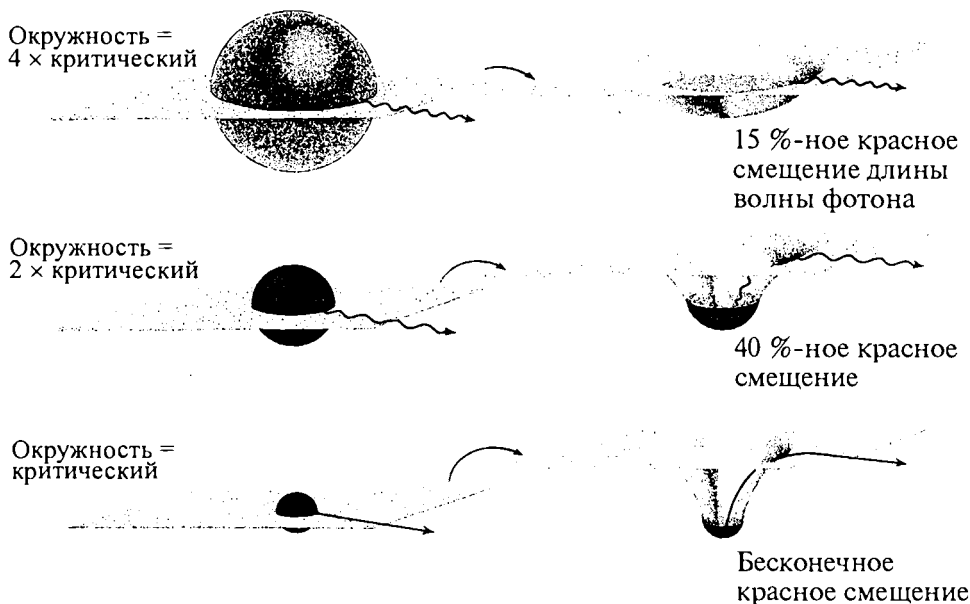
На поверхности Солнца замедление времени составляет 2 миллионные доли, соответственно, гравитационное красное смещение также должно быть равно 2 миллионные доли. Эта величина была слишком мала, чтобы этот эффект можно было обнаружить во времена Эйнштейна, однако в начале шестидесятых годов XX века технология достигла уровня эйнштейновских законов гравитации: Джим Браун из Принстонского университета в ходе чрезвычайно точного эксперимента измерил величину красного смещения для солнечного света, и она оказалась в хорошем соответствии с предсказаниями Эйнштейна.

* * *

В течение нескольких лет после безвременной кончины Шварцшильда его пространственно-временная геометрия стала стандартным рабочим инструментом для физиков и астрофизиков. Множество людей, включая Эйнштейна, изучили ее и использовали для расчетов. Все они были совершенно согласны с тем, что вблизи и внутри достаточно больших звезд, таких, например, как Солнце, пространство-время оказывается слегка искривленным и спектр света, излучаемого с их поверхностей, будет, пусть немного, но смещен в красную область. Все также соглашались с тем, что чем более компактна звезда, тем сильнее создаваемое ею искривление пространства-времени и больше красное смещение излучаемого ею света.

Физическое пространство

Гиперпространство



3.4. Предсказания ОТО кривизны пространства и красноволнового смещения для трех чрезвычайно компактных звезд одинаковой массы, но с разными длинами окружности. У первой звезды окружность в четыре раза больше критической, у второй — в два раза больше, а у третьей — в точности равна. Говоря современным языком, поверхность третьей звезды является горизонтом черной дыры

Однако мало кто воспринимал всерьез радикальное предсказание, которое геометрия Шварцшильда давала для очень плотных звезд (см. рис. 3.4):

Шварцшильдовская геометрия предсказывает, что для каждой звезды существует критическая окружность, зависящая от массы — такая же как та, что была выведена Джоном Митчеллом и Пьером Симоном Лапласом более чем столетие назад: 18,5 километров умножить на массу этой звезды, выраженную в солнечных массах. Если окружность звезды больше критической в 4 раза (верхняя часть рис. 3.4), то ее пространство будет заметно искривлено, время на ее поверхности будет течь на 15 % медленнее, чем вдали от нее, а свет, испускаемый ею, будет смещаться в красную область спектра на 15 %. Если ее размер еще меньше, например, если он лишь вдвое превышает критическую величину (средняя часть рис. 3.4), искривление пространства будет еще сильнее и замедление времени на ее поверхности составит уже 41 %, соответственно, 41 % составит красное смещение излучаемого ею света. Все эти предсказания выглядят разумными и приемлемыми. Что казалось неприемлемым физикам и

3. ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ ОТКРЫТЫ И ОТВЕРГНУТЫ

астрофизикам двадцатых и даже шестидесятых годов XX века, так это предсказания, касающиеся звезд, размер которых в точности равен критическому (нижняя часть рис. 3.4). Для такой звезды искривление пространства становится еще сильнее и замедление времени на ее поверхности становится бесконечным; время там вообще не течет — оно заморожено. Соответственно, какого бы цвета не был свет, испускаемый такой звездой, красное смещение сделает его частоту ниже красного, инфракрасного и радиоволнового диапазона — она станет бесконечно малой, т. е. свет перестанет существовать. На современном языке, поверхность звезды, размер которой равен критическому, находится в точности на горизонте событий, который звезда создает вокруг себя мощной гравитацией. Практический результат, к которому приводит шварцшильдовская геометрия, совпадает с выводами Митчелла и Лапласа: звезда, радиус которой равен или меньше критического, должна казаться удаленным наблюдателям совершенно черной; сейчас мы называем такие звезды черными дырами. Несмотря на это, механизмы здесь совершенно различны.

Митчелл и Лаплас с их ньютоновскими представлениями о том, что пространство и время абсолютны, а скорость света относительна, были уверены, что с поверхности звезды, диаметр которой чуть меньше критического, частицы могут подняться на очень большую высоту, возможно дальше орбиты, обращающейся вокруг звезды, планеты. Но в процессе подъема они будут тормозиться притяжением звезды и, в конце концов, едва не достигнув межзвездного пространства, начнут падать и упадут обратно. Таким образом, существа, живущие на планете, вращающейся вокруг такой звезды, будут видеть ее замедляющийся свет (для них она не будет черной), в то время как мы, живущие на далекой Земле, ее увидеть не сможем. Для нас такая звезда будет совершенно черной.

Напротив, в шварцшильдовской геометрии свет всегда распространяется с одной и той же скоростью и не может замедляться (скорость света абсолютна, а пространство и время относительны). Однако спектр света, испускаемого с поверхности, будет смещен до бесконечно малой величины на бесконечно малом отрезке своего пути вверх (поскольку время на горизонте полностью остановлено, а смещение спектра всегда такое же, как замедление времени). Такое смещение приводит к тому, что энергия света становится равной нулю — он просто перестает существовать! Поэтому неважно, как близко к поверхности звезды находится планета: существа на ее поверхности все равно не увидят света, испускаемого звездой.

В главе 7 мы будем рассматривать, как ведет себя свет, с точки зрения наблюдателя, находящегося внутри горизонта событий черной дыры, и узнаем, что, вообще говоря, существовать он не перестает. На самом деле, он просто не может выйти за пределы горизонта, несмотря даже на то, что он движется с обычной, универсальной скоростью 299792 километров в секунду. Однако находясь в начале этой книги, мы еще не готовы понять такое, казалось бы, противоречивое поведение. Вначале мы должны разобраться в других вещах, так же, как это сделали физики в период с 1916 по 1960 гг.

* * *

В двадцатые годы XX века наиболее известными экспертами в общей теории относительности в мире были Альберт Эйнштейн и британский астрофизик Артур Эддингтон. Последователей у этой теории было много, но тон задавали Эйнштейн и Эддингтон. И хотя были исследователи, желавшие принять черные дыры всерьез, Эйнштейн и Эддингтон к ним не относились. Черные дыры «дурно пахли», они были слишком противоестественны, они не соответствовали интуитивным представлениям Эйнштейна и Эддингтона о том, как должна быть устроена Вселенная. Похоже, что в этот период Эйнштейн просто игнорировал их. Впрочем, в то время никто не рассматривал черные дыры как серьезное предсказание, так что потребности разбираться в этой проблеме не ощущалось. И поскольку другие загадки природы казались Эйнштейну более интересными и привлекательными, он направлял свои усилия на них.

Эддингтон в двадцатые годы совершил более эксцентричный поступок. Он был артистической натурой, увлекался популяризацией науки и, раз никто не верил в черные дыры, ему показалось забавным помахать ими, как красной тряпкой, перед всеми. В 1926 г. в книге *Внутреннее устройство звезд* он написал, что среди наблюдаемых звезд, возможно, нет таких, окружность которых меньше критической: «Во-первых, сила тяготения будет настолько велика, что свет не сможет оторваться от них и лучи будут падать обратно на такую звезду, как камень на землю. Во-вторых, красное смещение спектральных линий будет настолько велико, что спектр просто перестанет существовать. В-третьих, масса создаст столь сильное искривление пространственно-временной метрики, что все пространство замкнется вокруг звезды, т. е. нигде, оставив нас снаружи». Первый тезис здесь иллюстрирует ньютоновский подход, второй — приближенный релятивистский подход, а третий — это типично

3. ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ ОТКРЫТЫ И ОТВЕРГНУТЫ

эддингтоновская гипербола. Как явствует из вложенной диаграммы на рис. 3.4, если звезда имеет размер равный критическому, искривление пространства будет очень сильным, но не бесконечным и, уж конечно, пространство не будет замыкаться вокруг звезды. Эддингтон, скорее всего, понимал это, но его описание было выразительным и передавало дух шварцшильдовской кривизны пространства-времени.

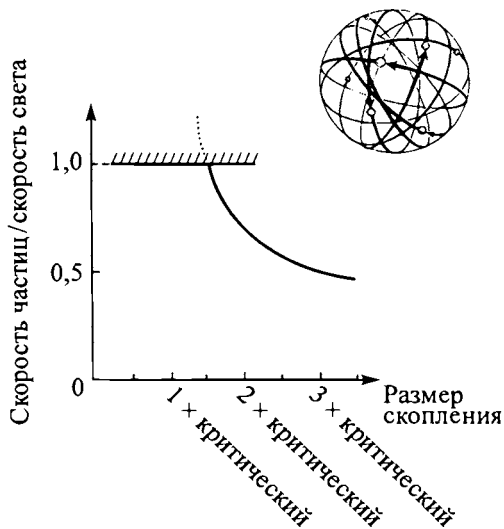
В тридцатые годы, как мы увидим в главе 4, появилась тенденция к серьезному рассмотрению черных дыр. По мере этого, Эйнштейн, Эддингтон и другие «признанные авторитеты» начали недвусмысленно выражать свое отрицание этих ужасных объектов.

В 1939 г. Эйнштейн опубликовал результаты вычислений, основанных на общей теории относительности, которые он интерпретировал как иллюстрацию того, почему черные дыры не могут существовать. Эти вычисления касались поведения идеализированного объекта, из которого предположительно могла бы сформироваться черная дыра. Этот объект представлял собой скопление частиц, притягивающихся друг к другу за счет гравитации и, таким образом, удерживающихся вместе, подобно тому, как Солнце удерживает, притягивая к себе, планеты. В эйнштейновском скоплении все частицы двигались по круговым орбитам, совокупность которых образовывала сферу, так, что частицы, находящиеся на одной половине сферы, притягивали те, что находятся на другой (левая половина рис. 3.5).

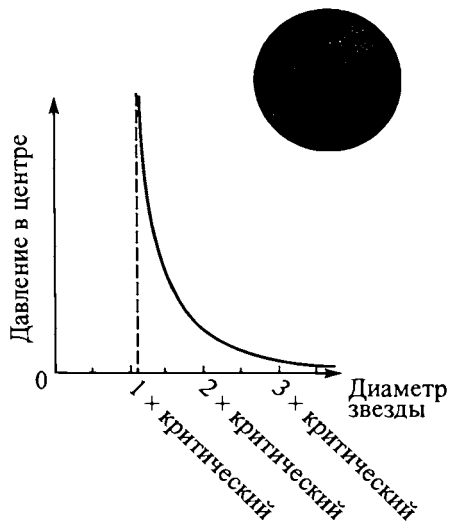
Эйнштейн предположил, что такое скопление становится все меньше и меньше, и попытался вычислить, что будет происходить по мере приближения его радиуса к критическому. Как можно догадаться, его вычисления показали, что чем компактнее становится скопление, тем сильнее становится гравитация и тем быстрее должны двигаться частицы по его поверхности, чтобы не упасть внутрь. Поскольку ничто не может двигаться со скоростью, большей скорости света, такое скопление не может иметь диаметр меньше, чем полтора критических. «Важным результатом этого исследования, — писал Эйнштейн, — является объяснение того, почему «шварцшильдовские сингулярности» не существуют в физической реальности».

Для подтверждения своей точки зрения Эйнштейн мог также рассмотреть внутреннее устройство однородной звезды (звезды, плотность которой одинакова во всем ее объеме) (правая половина рис. 3.5). Такая звезда удерживается от сжатия за счет давления внутреннего газа. Карл Шварцшильд, используя общую теорию относительности, получил полное математическое описание такой звезды, и его формулы показали, что, если такая звезда будет становиться все более и более компактной, давление внутри нее должно стано-

Эйнштейновское скопление частиц



Шварцшильдовская звезда с постоянной плотностью



3.5. Эйнштейновское доказательство того, что объект не может иметь диаметр меньше критического. *Слева:* Если сферическое скопление частиц имеет диаметр меньше полутора критических, то скорости частиц должны превышать скорость света, что невозможно. *Справа:* Если звезда, имеющая постоянную по всему объему плотность, становится меньше, чем $9/8=1,125$ критического диаметра, давление в центре звезды становится бесконечным, что невозможно

виться все больше и больше, чтобы противодействовать растущей гравитации. Согласно этим формулам, при размере звезды, равном $9/8=1,125$ критического, давление в центре звезды обращается в бесконечность. Поскольку ни один газ (так же, как и никакая другая форма материи) не может создавать бесконечного давления, то, по логике Эйнштейна, никакая звезда не может иметь диаметр меньше, чем $1,125$ критического.

Расчеты Эйнштейна были верны, а его интерпретация их результатов — нет. Его вывод о том, что никакой объект не может уменьшиться до окружности, равной критической, был продиктован скорее его интуитивным неприятием шварцшильдовских сингулярностей, чем этими расчетами. Теперь мы уже знаем, что правильным был бы следующий иной вывод.

Эйнштейновское скопление частиц и однородная звезда никогда не становятся компактными настолько, чтобы образовать черную дыру потому, что Эйнштейн предполагал наличие каких-либо сил, уравнивающих гравитационное сжатие: центробежных сил в случае скопления или давления газа в случае звезды. Действительно, никакие силы не способны противостоять сжатию в случае, если

3. ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ ОТКРЫТЫ И ОТВЕРГНУТЫ

радиус объекта становится очень близок к критическому. Однако это не означает, что объект не может иметь такого размера. На самом деле из этого следует, что если объект становится столь малым, то *гравитация неизбежно преодолеет любые другие силы внутри него и приведет к катастрофическому сжатию, в результате чего и образуется черная дыра*. Эйнштейн ошибся из-за того, что он изначально исключил возможность такого сжатия.

Сейчас мы настолько свыклись с представлением о черных дырах, что возникает желание спросить: «Как Эйнштейн мог оказаться таким недалеким? Как он мог просмотреть возможность сжатия, приводящего к появлению черных дыр?» А возникает это желание из-за того, что мы забываем, каким было понимание вещей *практически всеми* в то время.

Предсказания общей теории относительности были непонятны. Никому не приходило в голову, что достаточно компактный объект должен сжиматься, и что результатом такого сжатия является черная дыра. Наоборот, считалось, что шварцшильдовские сингулярности (черные дыры) — это объекты, размер которых удерживается вблизи критической величины за счет противодействия гравитации со стороны некой внутренней силы. Исходя из этих представлений, Эйнштейн полагал, что может разрушить эту концепцию, показав, что таких сил не существует.

Если бы Эйнштейн предположил, что «шварцшильдовские сингулярности» могут существовать в действительности, то, вполне возможно, он бы догадался, что именно катастрофическое сжатие является ключевым моментом в их образовании, а силы, действующие внутри, не существенны. Но он настолько твердо был убежден, что их быть не должно (они «дурно пахли», очень дурно), что не смог преодолеть это убеждение, так же, впрочем, как и большинство его коллег.

В романе Т.Х.Уайта «Король сегодня и навсегда» описывается сообщество муравьев, девизом которого было: «Все, что не запрещено, является принудительно-обязательным». К законам физики и устройству Вселенной это *не* относится. Множество вещей, разрешенных законами физики, оказываются столь маловероятными, что на деле никогда не происходят. Простым, хорошо известным примером является случайное восстановление разбитого яйца: возьмем видеозапись, на которой зафиксировано, как на пол падает и разбивается вдребезги куриное яйцо. Затем пустим ее в обратном направлении, и вы увидите, как из скорлупы и осметков собирается целое яйцо, которое затем взлетает в воздух. Законы физики не запрещают, чтобы

это произошло в действительности, при обычном течении времени, однако этого никогда не случается, так как вероятность такого события чрезвычайно мала.

Физики двадцатых, тридцатых, сороковых и даже пятидесятих годов XX века задавались одним и тем же вопросом: допускают ли законы физики возможность существования черных дыр? И ответ получался неоднозначный: на первый взгляд, да, допускают, но, с другой стороны, Эйнштейн, Эддингтон и некоторые другие приводили (ошибочные) доводы в пользу того, что такого не может быть. В пятидесятые годы, когда эти доводы были окончательно отклонены, многие физики стали склоняться к точке зрения, что, хотя существование черных дыр и не противоречит законам физики, оно настолько маловероятно (так же, как и случайное восстановление яйца), что на практике они нигде не встречаются.

В реальности появление черных дыр, в отличие от восстанавливающихся яиц, является, при некоторых обстоятельствах, неизбежным; однако лишь в конце шестидесятых, когда свидетельства этой неизбежности стали очевидны, большинство физиков действительно стали принимать черные дыры всерьез. В следующих трех главах я расскажу, как, начиная с тридцатых и кончая шестидесятыми годами XX века, накапливались эти свидетельства и какое сопротивление они встречали.

Практически единодушное сопротивление черным дырам в XX веке составляет разительный контраст с энтузиазмом, с которым они были приняты во времена Митчелла и Лапласа. Вернер Израэль, физик, занимающийся глубоким изучением этой истории в наши дни, размышлял о причинах такого различия:

«Я уверен, что [отношение к черным дырам в XVIII веке] было не только признаком, характерным для революционных веяний 1790-х», — писал Израэль. «Причина на самом деле в том, что темные звезды Лапласа [черные дыры] не представляли опасности для нашей бережно хранимой веры в постоянство и стабильность материи. Напротив, черные дыры XX века представляли для нее огромную опасность.»

Согласно представлениям Митчелла и Лапласа темные звезды состояли из вещества примерно такой же плотности, как вода, камни, Земля или Солнце: примерно 1 грамм на кубический сантиметр. При такой плотности звезда, чтобы быть темной (иметь окружность меньше критической), должна иметь массу примерно в 140 миллионов раз больше солнечной и диаметр примерно в 3 раза больше, чем у земной орбиты. Такие звезды, подчиняющиеся ньютоновским зако-

3. ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ ОТКРЫТЫ И ОТВЕРГНУТЫ

нам физики, были бы экзотическими, но определенно не противоречили бы нашим общим представлениям об устройстве природы. Чтобы увидеть такую звезду, достаточно было бы приземлиться на планету вблизи нее и взглянуть на световые частицы перед тем, как они упадут обратно на поверхность этой звезды. Если бы кому-нибудь захотелось исследовать вещество, из которого она состоит, он спокойно мог бы подлететь к ее поверхности, взять пробу и привезти ее на Землю. Я не знаю, думали или нет Митчелл, Лаплас и их современники о подобных вещах, но в любом случае у них не было причин беспокоиться о законах природы, о постоянстве и стабильности материи.

Горизонт черной дыры (поверхность, диаметр которой равен критическому), черной дыры XX века представляет собой нечто совершенно иное. На какой бы высоте над ним вы не находились, вы не увидите света, идущего от него. Все что падает сквозь этот горизонт, никогда не возвращается обратно, оно исчезает из нашей Вселенной, и сам факт этого исчезновения бросает вызов представлениям физиков о законах сохранения материи и энергии.

«Существует удивительная параллель между историей черных дыр и историей дрейфа материков [перемещения континентов по поверхности Земли друг относительно друга]», — писал Израэль. «Уже в 1916 г. признаки того, что оба эти явления имеют место, практически невозможно было игнорировать, но изучение и того, и другого затормозилось почти на полвека из-за сопротивления, доходившего до абсурда. Я уверен, что глубокие психологические причины были сходны в обоих случаях. Еще одно совпадение: это сопротивление рухнуло где-то в 1960 г. Конечно, оба направления [астрофизика и геофизика] получили мощный импульс от послевоенных технических достижений. Но не менее интересно то, что именно в это время советская водородная бомба и советский спутник изменили представление о западной науке как об истине в последней инстанции. Зародилось подозрение, что и на Земле, и в небесах может быть гораздо больше интересного, чем об этом можно подумать».

ЗАГАДКА БЕЛЫХ КАРЛИКОВ

глава, в которой Эддингтон и Чандрасекар ведут баталии вокруг смерти массивных звезд; должны ли они, погибая, схлопнуться, образуя черные дыры, или их спасет квантовая механика?

Год 1928-й, место действия — южная Индия, город Мадрас на берегу Бенгальского залива. Здесь, в Мадрасском университете, 17-летний индийский юноша Субраманьян Чандрасекар увлечен изучением физики, химии и математики. Чандрасекар — высокий и красивый юноша с царственными манерами — чрезвычайно горд своими академическими «успехами». Он только недавно прочитал классический учебник Арнольда Зоммерфельда «Атомные структуры и спектральные линии» и поэтому весьма обрадовался, узнав, что проживающий в Мюнхене Зоммерфельд — один из величайших в мире физиков-теоретиков — посетил Мадрас.

Сгорая от нетерпения, Чандрасекар отправился к Зоммерфельду в отель и попросил о встрече. Зоммерфельд назначил встречу на другой день. В указанное время гордый Чандрасекар, уверенный в своем владении основами современной физики, подошел к номеру Зоммерфельда в отеле и постучал в дверь. Зоммерфельд, вежливо поприветствовав пришедшего, осведомился об учебе, а затем развеял все его иллюзии. «Физика, которую Вы изучали, дело прошлого. Она полностью изменилась за те пять лет, что прошли с тех пор, как написана моя книга», — объяснил он. Зоммерфельд описал революцию в физическом понимании законов, которые управляют микромиром: миром атомов, молекул, электронов и протонов. В этом мире законы Ньютона, как было обнаружено, уже не справедливы, поскольку не выполняются принципы относительности движения. Им на смену пришел принципиально новый класс физических законов,

4. ЗАГАДКА БЕЛЫХ КАРЛИКОВ

получивших название законов *квантовой механики*¹, поскольку они имеют дело с поведением («механикой») частиц среды («квантов»). Появившись всего два года назад, новые законы квантовой механики, тем не менее, уже успешно проявили себя в объяснении поведения атомов и молекул.

Чандрасекар читал в книге Зоммерфельда о первой, предварительной версии этих законов. Однако, как объяснил Зоммерфельд, эти предварительные законы оказались неудовлетворительными. Они хотя и находились в согласии с экспериментами над простыми атомами и молекулами, такими как водород, не могли рассчитать поведение более сложных. Кроме того, эти законы не были логически связаны друг с другом и другими физическими законами. Они были не более чем набором неэстетичных эмпирических правил вычисления.

Новый вариант законов, хотя и более радикальный по форме, выглядел гораздо более многообещающим. Он объяснял сложные атомы и молекулы и, казалось, хорошо согласовывался с остальной физикой.

Чандрасекар потрясенно слушал, боясь пропустить хоть слово.

Квантовая механика и строение белых карликов

Перед расставанием Зоммерфельд подарил Чандрасекару оттиски своей только что написанной статьи. Она содержала основы законов квантовой механики, которые управляют большим числом электронов, заключенных в малом объеме, например в металле.

Чандрасекар как зачарованный прочел оттиски, разобрался в них, а затем много дней провел в университетской библиотеке, изучая все научные статьи по этой теме, которые только смог разыскать. Особенно интересной оказалась статья, озаглавленная «О конденсированном веществе», английского физика Р.Х.Фоулера, опубликованная 10 декабря 1926 г. в журнале *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* (Ежемесячные записки Королевского астрономического общества). Статья Фоулера указала Чандрасекару на замечательную книгу «*Внутреннее строение звезд*» знаменитого британского астрофизика Артура С. Эддингтона, в которой Чандрасекар наткнулся на описание *загадки белых карликов*.

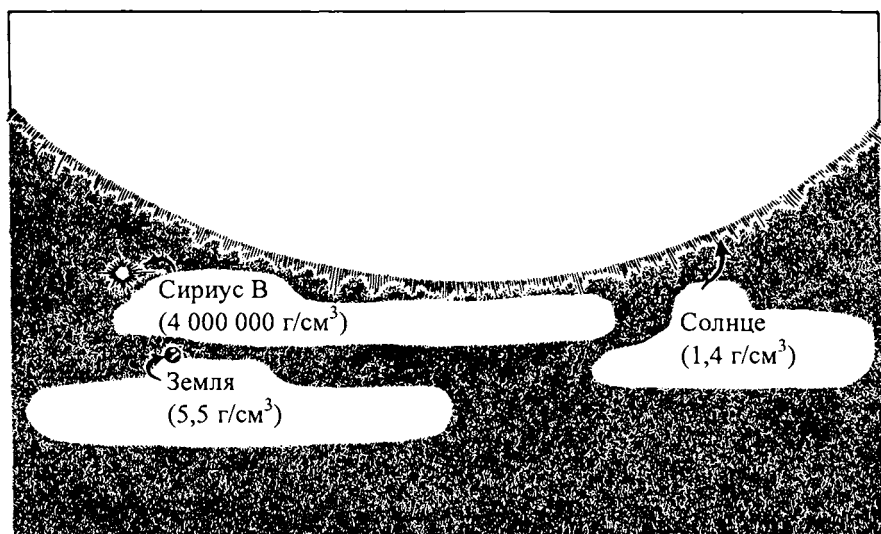
¹ Ясное объяснение законов квантовой механики см. в книге: *Heinz Pagels «The Cosmic Code»* (Simon and Schuster, 1982).

Белые карлики — это определенный тип звезд, обнаруженный астрономами с помощью телескопов. Загадочной в них была чрезвычайно высокая плотность вещества, находящегося внутри этих звезд, гораздо большая, чем та, с которой до сих пор сталкивался человек. Открывая книгу Эддингтона, Чандрасекар, конечно, не знал, что берясь за раскрытие загадки столь высокой плотности, он и Эддингтон в конце концов с неизбежностью столкнутся с возможностью того, что массивные звезды, погибая, могут схлопнуться, превратившись в черные дыры.

«Вероятно, белых карликов очень много», — прочитал Чандрасекар в книге Эддингтона. «Достоверно известны только три, но все они расположены на малом расстоянии от Солнца... Самая известная из этих звезд — спутник [обычной звезды] Сириуса», который называют Сириус В. Сириус и Сириус В — шестая и седьмая ближайшие к Земле звезды, расстояние до них составляет 8,6 св. лет. Сириус, кроме того, — самая яркая звезда на небе. Сириус В обращается вокруг Сириуса так же, как Земля вокруг Солнца, но Сириусу В требуется 50 лет, чтобы закончить один оборот, тогда как Земле — только год.

Эддингтон описал, как астрономы на основе наблюдений в телескоп оценили массу и диаметр Сириуса В. Масса составила 0,85 солнечной, а диаметр 118 000 км. Это означало, что средняя плотность Сириуса В равнялась 61000 г/см^3 , т. е. в 61 000 раз больше плотности воды, или примерно 1 тонна в кубическом дюйме! «И хотя этот аргумент был известен уже некоторое время», — писал Эддингтон, обычно считалось необходимым добавлять в заключение «это абсурдно». Большинство астрономов не могло всерьез воспринимать плотность, столь значительно превышающую ту, которая когда-либо встречалась на Земле. Но если бы они узнали всю истину, обнаруженную в результате более поздних астрономических наблюдений (масса 1,05 солнечной, диаметр 31 000 км и плотность 4 млн г/см^3 или 60 т/дюйм³), они сочли бы это еще более абсурдным (рис. 4.1).

Далее Эддингтон описал новый ключевой подход, подкрепляющий «абсурдное» положение, согласно которому Сириус В в 61 тыс. раз плотнее воды: если Сириус В действительно столь плотный, то, в соответствии с законами гравитации Эйнштейна, свет, проходя сквозь его мощное гравитационное поле, «покраснел» бы на 6/100 000 — сдвиг, в 30 раз более сильный, чем для света, излучаемого Солнцем, и потому легко обнаружимый. Кажется это предсказание красного смещения было проверено как раз перед тем, как



4.1. Сравнение размеров и средних плотностей Солнца, Земли и белого карлика Сириус В на основе современных данных

книга Эддингтона была направлена в печать в 1925 г., астрономом В.С.Адамсом в обсерватории Маунт Вильсон, расположенной на вершине горы близ Пасадены в Калифорнии².

«Профессор Адамс убил сразу двух зайцев, — писал Эддингтон, — он выполнил еще одну проверку общей теории относительности Эйнштейна и подтвердил наши подозрения относительно того, что вещество с плотностью, в 2000 раз большей, чем у платины, не только возможно, но и реально существует во Вселенной». Еще дальше в книге Эддингтона Чандрасекар нашел описание того, как внутренняя структура звезд, таких как Солнце или Сириус В, поддерживается посредством баланса между внутренним давлением и гравитационным сжатием. Природа подобного баланса может быть понята (у Эддингтона этого нет) из аналогии со сжимаемым в руках мячиком (левая часть рис. 4.2). Внешняя сила сжатия ваших рук в точности компенсируется направленной наружу силой давления воздуха в мячике — давления, которое создается молекулами воздуха, бомбардирующими резиновую стенку мяча.

Для звезды (правая часть рис. 4.2) аналогом ваших рук является вес внешней оболочки звездного вещества, а аналогом воздуха в мяче —

² В деликатных экспериментах можно с опасной легкостью получить тот результат, который, как кажется, и должен получиться. Измеренное Адамсом значение красноволнового гравитационного сдвига является примером именно такого случая. Его результат оказался согласующимся с предсказанием теории, хотя предсказанное значение сдвига было серьезно ошибочным (в пять раз меньше) из-за ошибок в астрономических оценках массы и диаметра Сириуса В.



- 4.2. Баланс между силой давления ваших рук и давлением внутри мяча (слева) и аналогичный баланс между гравитационным сжатием (весом) внешней оболочки звездного вещества и давлением внутреннего объема звезды (справа)

вещество внутри оболочки. Граница между внешней оболочкой и внутренним шаром может быть выбрана совершенно произвольно — на глубине одного метра, километра, тысячи километров от поверхности звезды... Где бы ни была выбрана граница, должно выполняться требование: вес внешней оболочки, сжимающий внутреннее ядро (гравитационное сжатие внешней оболочки), в точности скомпенсирован давлением молекул внутреннего шара, сталкивающимися с этой оболочкой. Этот баланс, с необходимостью возникающий в каждом месте внутри звезды, определяет *структуру* звезды, т.е. детали того, как давление, гравитация и плотность меняются от поверхности звезды вглубь, к ее центру.

В книге Эддингтона также обсуждался не дающий покоя физикам парадокс, связанный с представлениями того времени о структуре белых карликов. Эддингтон полагал (так же как и все астрономы в 1925 г.), что давление вещества белых карликов, так же как и в вашем мяче, должно быть обусловлено его теплом. Тепло заставляет атомы вещества двигаться внутри звезды с высокими скоростями, сталкиваясь друг с другом и бомбардируя поверхность границы между внешней оболочкой звезды и его внутренним ядром. При «макроскопическом» рассмотрении, слишком грубом, чтобы различать отдельные атомы, все, что мы можем измерить, это полную силу ударов атомов, которые сталкиваются, скажем, с одним квадратным сантиметром поверхности. Эта полная сила и есть давление внутри звезды.

Когда звезда охлаждается, испуская излучение во внешнее пространство, ее атомы начинают двигаться медленнее, давление ослабевает, и вес внешней оболочки сжимает внутреннее ядро до меньшего объема. Это сжатие вновь нагревает звезду, увеличивая внутреннее

4. ЗАГАДКА БЕЛЫХ КАРЛИКОВ

давление, пока не будет достигнут новый баланс сжатие-давление, но уже при меньших размерах, чем прежде. Таким образом, поскольку Сириус В продолжает постепенно охлаждаться, излучая тепло в межзвездное пространство, он должен мало-помалу сокращаться в размерах.

Когда закончится это сжатие? Какова окончательная судьба Сириуса В? Самый очевидный (но неверный) ответ, что звезда будет уменьшаться до тех пор, пока не станет столь малой, что превратится в черную дыру, был неприемлем для Эддингтона. Он отказывался даже рассматривать его. Единственное разумное решение, которое он еще мог представить, состояло в том, что звезда должна в пределе охладиться и затем будет поддерживаться уже не тепловым давлением (т.е. давлением, обусловленным теплом), а другим известным в 1925 г. типом давления, а именно, тем, которое обнаруживается в твердых телах, например, в обычном камне, обусловленным отталкиванием электронов близко расположенных атомов. Но как (неправильно) считал Эддингтон, такое «каменное давление» возможно лишь в том случае, если плотность звезды близка к плотности камня — несколько грамм на кубический сантиметр (в 10 тыс. раз меньше, чем плотность Сириуса В).

Такая последовательность аргументов приводила к парадоксу Эддингтона. Чтобы расширяться до плотности камня и тем самым быть в состоянии удерживать себя после охлаждения, Сириусу В требуется совершить колоссальную работу против сил собственной гравитации, а физики не знали адекватного такой работе источника энергии внутри звезды. «Представьте тело, постоянно теряющее тепло, но тем не менее теряющее его недостаточно, чтобы охладиться», — писал Эддингтон. «Это любопытная проблема, и можно было бы сделать множество причудливых предположений касательно того, что в действительности происходит. Мы же оставим в стороне эту трудность, поскольку она не обязательно является неизбежной».

Чандрасекар нашел разрешение этого парадокса 1925 г. в статье Р.Х.Фоулера 1926 г. «О плотном веществе». Решение заключалось в недостаточности законов физики, использованных Эддингтоном. Эти законы необходимо было заменить новыми законами квантовой теории, которые описывали давление внутри Сириуса В и других белых карликов не как обусловленное теплом, а как новый, квантовомеханический феномен: *вырожденное движение электронов*, также называемое *электронным вырождением*³.

³ Слово «вырожденный» не означает «моральное вырождение» («низкий уровень морали»), а имеет смысл «достижение электроном наинизшего возможного уровня энергии».

Вырождение электронов напоминает человеческую клаустрофобию. Когда вещество сжато до плотности, в 10 тыс. раз превышающей плотность камня, облако электронов, окружающее каждое атомное ядро, занимает в 10 тыс. раз более тесную ячейку. Поэтому каждый электрон оказывается заключенным в «клетку», имеющую объем, в 10 тыс. раз меньший того, в котором ему раньше позволялось двигаться. Имея в распоряжении столь малый объем, электрон, как человек больной клаустрофобией, начинает произвольно метаться. Он носится по своей маленькой клетке с очень высокой скоростью, с большой силой ударяясь об электроны в прилегающих ячейках. Это *вырожденное движение*, как его называют физики, не может быть остановлено охлаждением вещества. Ничто не может его остановить; законы квантовой механики вынуждают электрон двигаться даже при температуре вещества равной абсолютному нулю.

Это вырожденное движение есть следствие особенности вещества, о которой и не думали ньютоновские физики, особенности, называемой *корпускулярно-волновым дуализмом*. Каждая частица (корпускула), в соответствии с квантовой механикой, при определенных условиях ведет себя как волна, а волна любого типа, при некоторых специальных условиях, — как частица. Поэтому волны и частицы в действительности являются одной и той же сущностью, которая иногда ведет себя как частица, а иногда — как волна.

* * *

Электронное вырождение проще всего понять в рамках дуализма волна-частица. Когда вещество сжато до высокой плотности, и каждый электрон среды заключен в чрезвычайно малом пространстве, сдавленный электронами соседних ячеек, он начинает вести себя во многом как волна. Длина электронной волны (расстояние между ее гребнями) не может быть больше, чем размер ячейки; если бы она была больше, волна выходила бы за пределы этой ячейки. Далее, частицы, имеющие очень малую длину волны, обязательно будут обладать высокой энергией. (Типичный пример — частица, связанная с электромагнитной волной, — фотон. Фотон рентгеновских лучей имеет гораздо более короткую длину волны, чем у видимого света и, как следствие, фотоны рентгеновских лучей гораздо более энергичны, чем фотоны видимого света. Высокая энергия рентгеновских лучей позволяет им проникать через мягкие ткани и кости человека.)

В случае электронов внутри очень плотного вещества короткая длина волны и, соответственно, высокая энергия приводят к их

быстрому движению; это означает, что электрон должен двигаться в своей ячейке как странный сверхбыстрый мутант: наполовину — волна, наполовину — частица. Физики говорят, что электрон «вырожден», и называют давление, вызываемое этим беспорядочным высокоскоростным движением, «давлением вырожденных электронов». Избавиться от этого давления невозможно; оно является неизбежным следствием заключения электрона в малом объеме. Более того, чем больше плотность вещества, тем меньше ячейка, тем меньше длина волны электрона, тем выше его энергия, быстрее движение и, следовательно, больше давление вырождения. В обычном веществе с обычной плотностью давление вырождения настолько мало, что им можно пренебречь, но при огромных плотностях белых карликов оно должно быть чрезвычайно большим.

* * *

Когда Эддингтон писал свою книгу, электронное вырождение еще не было предсказано, и поэтому не было никакой возможности правильно рассчитать, как камень или любой другой материал ответит на сжатие до ультравысоких плотностей Сириуса В. С появлением законов электронного вырождения, подобные вычисления стали возможны, и они действительно были предложены и осуществлены Фоулером в статье 1926 г.

Врезка 4.1

Краткая история корпускулярно-волнового дуализма

Уже во время Исаака Ньютона (конец 1600-х) физики столкнулись с вопросом: состоит ли *свет* из частиц или волн. Ньютон, хотя и колебался, все же склонялся к частицам и называл их *корпускулами*, в то время как Христиан Гюйгенс приводил доводы в пользу волн. Представление о частицах света Ньютона возобладало до начала 1800-х, когда открытие, что свет может сам с собой интерферировать (глава 10), убедило физиков в правильности волновых воззрений Гюйгенса. В середине 1800-х Джеймс Кларк Максвелл поставил волновое описание волны на твердую опору своих объединяющих законов электричества и магнетизма, и физики решили, что проблема, наконец, разрешилась. Однако это было до появления квантовой механики.

В 1890-х Макс Планк заметил в форме спектра излучения, испускаемого очень горячими объектами, намеки на то, что физики что-то упустили в понимании природы света. В 1905 г. Эйнштейн показал то, чего не доставало: свет иногда ведет себя как волна, а иногда как частица (теперь называемая *фотоном*). Эйнштейн объяснил, что он ведет себя как волна, когда интерферирует сам с собой, но как

частица в *фотоэлектрическом эффекте*, когда слабый пучок света падает на поверхность металла. Луч выбивает электроны из металла по одному, именно так, как если бы с электронами сталкивались, выбивая их с поверхности металла, отдельные частицы света (отдельные фотоны). По энергии выбиваемых электронов Эйнштейн определил, что энергия фотона всегда обратно пропорциональна длине волны света. Таким образом, свойства фотона переплетены с волновыми свойствами: длина волны однозначно связана с энергией фотона. Открытие Эйнштейном дуализма волновых и корпускулярных свойств света и первые квантовомеханические законы физики, которые он начал строить вокруг этого открытия, обеспечили ему в 1922 г. Нобелевскую премию 1921 г.

Хотя Эйнштейн сформулировал общую теорию относительности почти единолично, он был только одним среди многих тех, кто внес свой вклад в законы квантовой механики — законы «царства малого».

Когда Эйнштейн обнаружил дуализм волн/частиц света, он еще не понимал того, что электрон или протон тоже могут вести себя иногда как частицы, а иногда как волны. Об этом никто не догадывался до середины 1920-х, когда Луи де Бройль сформулировал такую гипотезу, а затем Эрвин Шредингер использовал ее как основу для полного набора законов квантовой механики, законов, в которых электрон является волной вероятности. Вероятности чего? Вероятности локализации частицы. Эти «новые» законы квантовой механики (которые оказались чрезвычайно успешными в объяснении поведения электронов, протонов, атомов и молекул) не будут нас особенно волновать в этой книге. Однако время от времени некоторые из их особенностей будут все же для нас важны. Такой важной особенностью для этой главы является электронное вырождение.

Из расчетов Фоулера следовало, что поскольку электроны в Сириусе В и других белых карликах сжаты в столь малых ячейках, давление вырождения в них гораздо больше температурного (вызванного теплом). Соответственно, когда Сириус В остывает, его слабое термическое давление исчезает, а огромное давление вырождения остается и продолжает противостоять гравитации.

Таким образом, решение парадокса белых карликов Эддингтона имеет две стороны. Во-первых, Сириус В не сдерживает влияние гравитации с помощью температурного давления, как думали ранее, до появления квантовой механики: основную роль играет давление вырождения. Во-вторых, когда Сириус В остывает, ему нет необходимости расширяться до плотности камня, чтобы поддерживать себя; как раз наоборот, он будет вполне удовлетворительно поддерживаться давлением вырождения при существующей плотности 4 млн г/см^3 .

Читая все это и изучая математические выкладки в МадраССкой библиотеке, Чандрасекар был попросту очарован. Это было его пер-

4. ЗАГАДКА БЕЛЫХ КАРЛИКОВ

вое соприкосновение с современной астрономией, и он обнаружил глубокие следствия двух, идущих рука об руку, революционных идей физики XX века: общая теория относительности Эйнштейна с новым взглядом на природу пространства и времени проявилась в красноволновом сдвиге света, испускаемого Сириусом В, а новая квантовая механика с корпускулярно-волновым дуализмом была ответственна за внутреннее давление Сириуса В. Такая астрономия представлялась благодатным полем, на котором молодой человек мог бы проявить себя.

Продолжая обучение в Мадрасе, Чандрасекар обнаружил дальнейшие приложения квантовой механики к астрономической Вселенной. Он даже написал небольшую статью о своих идеях, отправил ее в Англию Фоулеру, с которым ранее никогда не встречался, и Фоулер представил ее к публикации.

Наконец, в 1930 г. в возрасте 19 лет Чандрасекар получил индийский эквивалент степени бакалавра и в последнюю неделю июля ступил на борт парохода, отплывающего в далекую Англию. Он был принят для продолжения образования в Кембриджский университет — место, где работали его кумиры Фоулер и Эддингтон.

Предельная масса

Восемнадцать дней плавания по морю из Мадраса в Саутгемптон были для Чандрасекара первой за много месяцев возможностью спокойно подумать о физике, не отвлекаясь на рутину учебы и экзаменов. Морское уединение способствовало размышлениям, которые были весьма плодотворны. Настолько, что фактически помогли получить ему Нобелевскую премию, правда, лишь 54 года спустя и только после серьезной борьбы за признание мировым астрономическим сообществом.

На борту парохода Чандрасекар позволил своим мыслям вернуться к белым карликам, парадоксу Эддингтона и разрешению парадокса Фоулером. Решение Фоулера почти наверняка было правильным, и другого не было. Однако Фоулер до конца не разработал детали баланса между вырожденным давлением и гравитацией в звездах типа белого карлика, не рассчитал также и их внутреннюю структуру: каким образом от поверхности к центру меняются плотность, давление и гравитация звезды. И это был вызов — дразнящая проблема, помогающая к тому же бороться со скукой во время долгого путешествия.

Чтобы найти опору при исследовании структуры звезды, Чандрасекару необходимо было получить ответ на следующий вопрос.

Допустим, вещество, из которого состоит белый карлик, уже сжато до некоторой плотности (например, до 1 млн г/см^3). Сожмем вещество (т.е. уменьшим его объем и увеличим плотность) еще на 1%. Вещество будет противиться этому дополнительному сжатию, увеличивая свое внутреннее давление. На сколько процентов возрастет это давление? Физики используют термин «адиабатический коэффициент» для такого процентного изменения давления, обусловленного одним процентом дополнительного сжатия. В этой книге я буду пользоваться более наглядным названием — *сопротивление сжатию*, или просто *сопротивление*. (Его не следует путать с «электрическим сопротивлением», это совершенно разные понятия.)

Чандрасекар вывел сопротивление сжатию, изучая шаг за шагом последствия однопроцентного увеличения плотности вещества белого карлика: результирующее уменьшение размера электронной ячейки, уменьшение длины волны электрона, увеличение его энергии и скорости и, наконец, возрастание давления. Результат оказался прост: однопроцентное увеличение плотности приводит к увеличению давления на $5/3\%$ ($1,667\%$). Сопротивление вещества белого карлика, следовательно, было равно $5/3$.

За много десятилетий до плавления Чандрасекара астрофизики рассчитали составляющие баланса между гравитацией и давлением внутри любой звезды, сопротивление сжатию которой не зависит от глубины. То есть звезды, давление и плотность которой возрастают так, что если продвигаться все глубже внутрь, увеличение плотности на 1% будет по-прежнему сопровождаться тем же фиксированным приращением давления. Детали получающейся структуры звезды содержались в книге Эддингтона «Внутреннее строение звезд» — этой книгой Чандрасекар весьма дорожил и потому взял ее с собой на борт корабля. Поэтому когда Чандрасекар обнаружил, что вещество белого карлика имеет не зависящее от давления сопротивление сжатию, он был очень доволен. Теперь, обратившись к книге Эддингтона, он мог сразу узнать внутреннюю структуру звезды: как плотность и давление меняются от поверхности к центру.

Среди прочего открытого Чандрасекаром в результате объединения формул, приведенных в книге Эддингтона, с его собственными вычислениями, были выведены значения плотности и скорости вырожденного движения электронов в центре Сириуса В. Ответ состоял в следующем: плотность в центре звезды составляла 360 тыс. г/см^3 (или 6 т/дюйм^3); средняя скорость электронов = 57% скорости света.

Как неудобно много! Чандрасекар, как и Фоулер до него, рассчитывал сопротивление вещества белых карликов, основываясь на

4. ЗАГАДКА БЕЛЫХ КАРЛИКОВ

законах квантовой механики, но игнорируя релятивистские эффекты. Однако если какой-либо объект движется с околосветовой скоростью (даже если это частица, управляемая квантовомеханическими законами), то становятся важными эффекты теории относительности. При скорости, составляющей 57% скорости света, эти эффекты не должны быть особенно велики, но у более массивного белого карлика большая гравитация требует большего давления в центре звезды для поддержания баланса сил, и средняя скорость электронов, соответственно, будет больше. В таком белом карлике уже нельзя игнорировать релятивистские эффекты. Поэтому Чандрасекар вернулся к исходной точке своего анализа — вычислению сопротивления вещества белого карлика, чтобы на этот раз постараться учесть релятивистские эффекты.

Но их строгий учет потребовал бы объединения законов специальной теории относительности и законов квантовой механики, объединения, которое было разработано позднее совместными усилиями величайших физических умов. Чандрасекару, только недавно закончившему университет, в одиночку это было, конечно, не под силу. Однако уже тогда он смог достаточно оценить принципиальные эффекты, вызываемые высокой скоростью электронов.

Квантовая механика утверждает, что когда достаточно плотное вещество сжимается еще больше, делая каждую электронную ячейку еще меньше, длина волны электрона должна уменьшаться и, соответственно, должна увеличиваться энергия вырожденного движения. Чандрасекар, однако, понял, что природа дополнительной энергии электронов различна и зависит от того, движется ли электрон много медленнее света или же со скоростью, близкой к световой. Если перемещение электрона медленное, то, как обычно, увеличение энергии означает более быстрое движение, т.е. более высокую скорость. Если же электрон движется уже с околосветовой скоростью, то его скорость не сможет сколько-нибудь значительно увеличиться (иначе она превысит световой предел!). Поэтому приращение энергии принимает другую форму, незнакомую в повседневной жизни: дополнительная энергия переходит в инерционность, т.е. возрастает сопротивление электрона ускорению.

Эти две различные судьбы добавочной энергии (дополнительная скорость против дополнительной инерционности) приводят к разным увеличениям электронного давления, а следовательно, и к разным сопротивлениям сжатию. Чандрасекар установил: при низких скоростях электрона сопротивление равно $5/3$, как он и рассчитал раньше, а при высоких — $4/3$.

Объединив затем полученное им сопротивление $4/3$ для *релятивистски вырожденного вещества* (т.е. вещества настолько плотного, что вырожденные электроны движутся со скоростями, близкими к скорости света) с формулами, приведенными в книге Эддингтона, Чандрасекар вывел свойства белых карликов с высокой плотностью и большой массой. Результат оказался поразительным: вещество с высокой плотностью с трудом может сдерживать гравитацию — настолько, что *действие гравитации может быть уравновешено давлением, только если масса звезды меньше 1,4 солнечной*. Это означало, в принципе не может существовать белых карликов с массой, превышающей 1,4 массы Солнца!

Имея достаточно ограниченные знания по астрофизике, Чандрасекар был озадачен полученным странным результатом. Только позже, после обсуждения его с Эддингтоном и другими учеными в Кембридже, он пришел к пониманию. Если белый карлик тяжелее Солнца в 1,4 раза, гравитация полностью преодолевает давление вырождения. Если более тяжелая звезда истощает свой внутренний запас тепла и остывает, тяготение выигрывает противоборство с давлением и заставляет звезду неминуемо сжиматься. Но до каких пор? Ответ (в нейтронную звезду или черную дыру) мы рассмотрим в следующих двух главах. Однако в то время Чандрасекар был еще далек от таких проблем.

В тот момент он был просто поставлен в тупик. Вновь и вновь он проверял свои вычисления, но не находил ошибки. Поэтому в оставшиеся несколько дней своего путешествия он старательно записал результаты, оформив их для публикации в две статьи. В одной он описал свои выводы о структуре белых карликов малой массы и плотности, таких как Сириус В. В другой очень кратко объяснял его вывод, согласно которому не существует белых карликов в 1,4 раза тяжелее Солнца.

* * *

Когда Чандрасекар прибыл в Кембридж, Фоулер был в отъезде. В сентябре, после возвращения Фоулера, Чандрасекар сразу же посетил его и вручил обе свои статьи. Фоулер одобрил первую и отослал ее для публикации в *Philosophical Magazine*, вторая же статья о максимальной массе белых карликов привела его в недоумение. Он не смог понять доказательства невозможности существования белых карликов с массой, большей 1,4 солнечной массы, полученное Чандрасекаром, но поскольку он был скорее физик, чем астроном, то

4. ЗАГАДКА БЕЛЫХ КАРЛИКОВ

попросил своего коллегу, известного астронома Е.А. Милна посмотреть статью. Когда и тот не смог понять приводимых в ней доказательств, Фоулер отказался рекомендовать статью в печать.

Чандрасекар был раздосадован. Прошло уже три месяца, как он приехал в Англию, и два месяца Фоулер держал его рукописи. Слишком долго, чтобы ждать одобрения для публикации. Уязвленный Чандрасекар прекратил все попытки опубликовать вторую статью в Британии и отослал по почте рукопись в Америку, в *Astrophysical Magazine*.

Несколько недель спустя пришел ответ редактора из Чикагского университета: рукопись послана на рецензию американскому физiku Карлу Эккарту. В рукописи Чандрасекар приводил без объяснения результаты своих релятивистских и квантовомеханических расчетов, согласно которым сопротивление сжатию при высокой плотности среды составляет $4/3$. Это сопротивление, равное $4/3$, было существенно для установления предела массы белого карлика. Если бы сопротивление было больше, белые карлики могли бы быть сколь угодно тяжелыми, и Эккерт думал, что оно действительно больше. Чандрасекар немедленно дал ответ, содержащий математическое доказательство равенства сопротивления $4/3$ (четырем третям). Эккерт, вникнув в детали, признал правоту Чандрасекара и одобрил рукопись для публикации. Наконец, спустя год после написания она была напечатана⁴.

Реакцией астрономического сообщества было непроницаемое молчание. Казалось, никто не заинтересовался. Поэтому Чандрасекар, желая поскорее получить степень доктора философии, обратился к более насущным задачам.

Три года спустя, получив степень доктора, Чандрасекар посетил Россию, чтобы обменяться идеями с советскими учеными. В Ленинграде молодой армянский астроном Виктор Амазаспович Амбарцумян заявил Чандрасекару, что ни один астроном в мире не поверит в его странный предел массы до тех пор, пока на основании физических законов он не рассчитает массы достаточного числа белых карликов и ясно не покажет, что все они лежат ниже провозглашенного порога. При этом было бы явно недостаточно, утверждал Амбарцумян, чтобы Чандрасекар проанализировал только белые карлики с относительно низкой плотностью и сопротивлением, равным $5/3$, и белые

⁴ Тем временем Эдмунд С. Стоунер независимо доказал (и опубликовал) существование предела массы белых карликов. Однако его вычисления были менее убедительными, чем вычисления Чандрасекара, поскольку он предполагал, что звезда имеет равномерное внутри распределение плотности.

карлики с чрезвычайно высокой плотностью и сопротивлением $4/3$. Ему следовало бы также исследовать несколько белых карликов с промежуточными значениями плотности и сопротивления и показать, что они также имеют массу, меньшую $1,4$ солнечной. По возвращении в Кембридж Чандрасекар принял вызов Амбарцумяна.

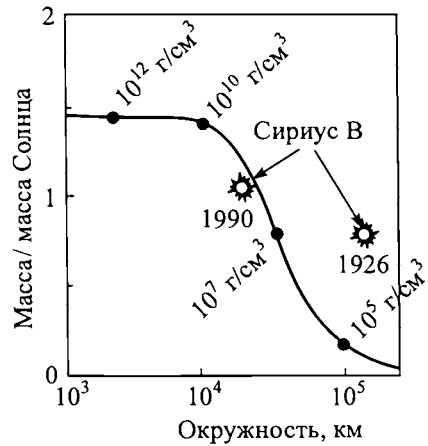
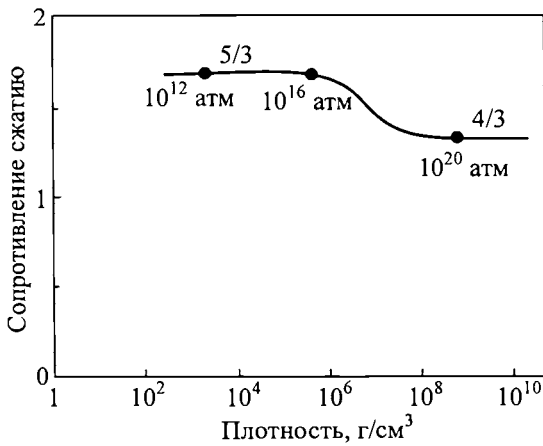
В качестве основы для анализа белых карликов с промежуточными значениями плотности необходимо было иметь *уравнение состояния* их вещества при любых значениях плотности — от низкой до предельно большой. (Под термином «состояние» вещества физики понимают плотность и давление в веществе, или, что то же самое, его плотность и сопротивление сжатию, поскольку из плотности и сопротивления можно вычислить давление. Под «уравнением состояния» понимается соотношение между сопротивлением и плотностью, т. е. сопротивление «как функция» плотности.)

К концу 1934 г., когда Чандрасекар принял вызов Амбарцумяна, уравнение состояния для белых карликов, благодаря вычислениям Эдмунда Стоунера из университета Лидса в Англии и Вильгельма Андерсона из Тартусского университета в Эстонии, было уже известно. Уравнение состояния Стоунера—Андерсона показало, что когда вещество белого карлика сжимается все сильнее и сильнее, переходя от нерелятивистского режима низкой плотности и малых скоростей электронов в релятивистскую область чрезвычайно высоких плотностей и околосветовых скоростей движения электронов, сопротивление вещества сжатию плавно спадает от $5/3$ до $4/3$ (левая часть рис. 4.3). Трудно придумать более простое поведение.

Чтобы ответить на вызов Амбарцумяна, Чандрасекар должен был соединить уравнение состояния (зависимость сопротивления от плотности) с законами баланса между давлением и гравитацией и, исходя из этого, получить *дифференциальное уравнение*⁵, описывающее внутреннюю структуру звезды, т. е. изменение плотности звезды в зависимости от расстояния до ее центра. Затем требовалось решить полученное дифференциальное уравнение для десятка или около того звезд, плотность вещества в центре которых меняется от низких до чрезвычайно высоких значений. Только решая дифференциальное

⁵ Дифференциальное уравнение — уравнение, связывающее в одном выражении различные функции и скорости их изменения, т. е. функции и их производные. В дифференциальном уравнении, полученном Чандрасекаром, функциями рассматривались плотность звезды, давление и сила гравитации, являющиеся функциями расстояния от центра. Дифференциальное уравнение представляло связь этих функций и скорость их изменения при движении от поверхности внутрь звезды. Под словами «решение дифференциального уравнения» понимают «вычисление самих функций на основе заданного дифференциального уравнения».

4. ЗАГАДКА БЕЛЫХ КАРЛИКОВ



4.3. Уравнение состояния вещества белых карликов, т.е. соотношение между плотностью вещества и сопротивлением сжатию (слева). По горизонтальной оси отложена плотность, до которой сжато вещество, по вертикальной — сопротивление (увеличение давления, в процентах, вызванное ростом плотности на 1%). Вдоль кривой проставлены значения давления сжатия (равные внутреннему давлению) в единицах атмосферного давления. Диаметр (по горизонтали) и масса (по вертикали) звезд типа белых карликов, рассчитанные Чандрасекаром с помощью механического арифмометра «Брауншвайгер», принадлежавшего Эддингтону (справа)

уравнение для каждой отдельной звезды, он мог узнать ее массу и установить меньше ли она 1,4 солнечной.

Для звезд как с малой, так и с предельно большой плотностью, исследованных Чандрасекаром на борту парохода, решение соответствующего дифференциального уравнения и вытекающее из него строение звезды нашлось в книге Эддингтона. Однако для звезд с промежуточными значениями плотности вывести решение с помощью математических формул Чандрасекару никак не удавалось. Вычисления были слишком сложны. Ничего не оставалось, кроме как решить дифференциальные уравнения численно, с помощью счетной машины.

В 1934 г. счетные машины весьма отличались от тех компьютеров, которые появились в 90-е годы. Они напоминали, скорее, простейшие из карманных калькуляторов. За один раз они могли лишь перемножить два числа, причем пользователю требовалось сначала вручную ввести эти числа, а затем повернуть рукоятку. Рукоятка приводила в движение сложную систему шестеренок и колесиков, выполнявших умножение и выдававших ответ.

Но даже и такие калькуляторы были тогда роскошью, и получить к ним доступ было непросто. У Эддингтона, однако, был один —

«Брауншвайгер», размер которого примерно соответствовал размеру настольных персональных компьютеров 90-х, и поэтому Чандрасекар, к тому времени уже хорошо знакомый с великим человеком, просто пришел к Эддингтону и попросил на время одолжить ему машину. В тот момент Эддингтон был вовлечен в спор о белых карликах с Милном и был весьма заинтересован поскорее узнать их детально рассчитанную внутреннюю структуру; поэтому он позволил Чандрасекару перенести «Брауншвайгер» в его комнату в Тринити-колледже,

Вычисления были длинными и утомительными. Каждый вечер после обеда Эддингтон, работавший в Тринити-колледже, поднимался к Чандрасекару, чтобы приободрить его и взглянуть, как продвигается дело.

Наконец, много дней спустя, Чандрасекар закончил. Он ответил на вызов Амбарцумяна. Для каждого из десяти типичных белых карликов он рассчитал внутреннюю структуру и затем, зная ее, — полную массу и поперечный размер звезды. Все массы, как и предполагалось, оказались меньше 1,4 солнечной. Более того, когда он нанес все значения масс и диаметров на диаграмму и соединил точки, получилась одна плавная кривая (правая часть рис. 4.3); измеренные массы и поперечники Сириуса В, а также других известных белых карликов относительно хорошо согласовывались с полученной кривой. (С учетом исправлений, полученных в результате современных астрономических наблюдений, согласие становится еще лучше; обратите внимание на новые значения 1990 г. массы и поперечника Сириуса В на рис. 4.3.) Гордый своими результатами, полагая, что астрономы всего мира, наконец, согласятся с его утверждением, что белые карлики не могут быть тяжелее, чем 1,4 массы Солнца, Чандрасекар был счастлив.

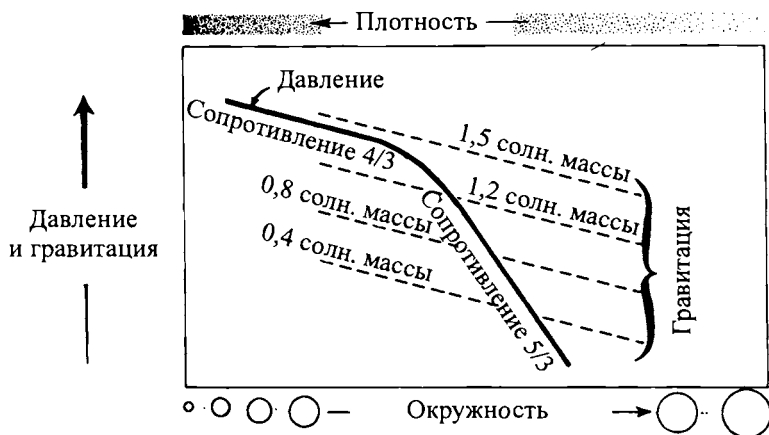
Особенно приятной казалась возможность представить полученные результаты на заседании Королевского астрономического общества в Лондоне. Выступление было назначено на пятницу 11 января. Согласно протоколу, детали повестки дня предстоящего заседания должны были оставаться в секрете вплоть до начала заседания, однако мисс Кей Вильямс, ученый секретарь Общества и близкий друг Чандрасекара, обычно тайно заранее посылала ему программу выступлений. Получив в четверг вечером программу по почте, Чандрасекар был удивлен, обнаружив, что сразу после его доклада следует выступление Эддингтона по вопросу о «релятивистском вырождении». Чандрасекар недоумевал. В течение последних нескольких месяцев Эддингтон заходил навестить его, по крайней мере, раз в неделю, читал черновики, но ни разу не упомянул о собственных исследованиях на ту же тему!

Подавив досаду, Чандрасекар спустился к обеду. Эддингтон был в столовой, обедая за главным столом. Приличия, однако, не позволяли просто так побеспокоить столь известного человека, даже если вы были с ним знакомы, и он проявлял некий интерес к вашей деятельности. Поэтому Чандрасекар, сдержавшись, просто сел в стороне.

Врезка 4.2

Объяснение масс и окружностей звезд — белых карликов

Для качественного понимания того, почему белые карлики имеют такие массы и окружности, которые показаны на рис. 4.3, посмотрите на иллюстрацию внизу. На ней показаны среднее давление и гравитация в белом карлике (отложены по вертикали) как функция окружности звезды (отложены вправо) или плотности (отложена влево). Если Вы сжимаете звезду, так что увеличивается ее плотность и уменьшается окружность (движение на рисунке влево), то давление звезды повышается в соответствии со сплошной кривой, быстрее для плотностей, где сопротивление сжатию равно $5/3$, и медленнее для больших плотностей, когда сопротивление — $4/3$. Это же самое сжатие звезды заставляет поверхность звезды приближаться к ее центру, таким образом, увеличивая силу внутренней гравитации звезды в соот-



ветствии с ходом штриховых линий. Скорость увеличения гравитации аналогична $4/3$ у сопротивления: увеличение гравитации на $4/3$ на каждый процент сжатия. На рисунке показаны несколько штриховых линий гравитации для нескольких значений массы, и чем больше масса звезды, тем сильнее ее гравитация.

В каждой звезде, например в звезде с массой в 1,2 солнечной, гравитация и давление должны уравновешивать друг друга. Поэтому звезда должна существовать на пересечении штриховой линии гравитации, отмеченной как «1,2 солнечной массы», и сплошной кривой давления: это пересечение определяет окружность звезды (указана на горизонтальной оси графика). Если окружность будет больше, то штриховая линия гравитации звезды будет проходить выше сплошной

кривой давления, гравитация преодолееет давление, и звезда будет схлопываться. Если окружность меньше, то давление преодолевает гравитацию, и звезда взрывается.

Пересечения нескольких штриховых линий со сплошной кривой соответствуют массам и окружностям равновесия белых карликов, показанным в правой части рис. 4.3. Для звезды меньшей массы (самая нижняя штриховая линия) окружность в точке пересечения является большой. Для звезды с большей массой (более высокая штриховая линия) — окружность меньше. Для звезды с массой больше 1,4 солнечной вообще нет пересечений, штриховая линия гравитации лежит всегда выше сплошной кривой давления и, таким образом, гравитация всегда преодолевает давление, независимо от того, какова окружность звезды, и заставляет звезду схлопываться.

После обеда Эддингтон сам отыскал Чандрасекара и сказал: «Я попросил Смарта дать Вам полчаса вместо обычных пятнадцати минут». Чандрасекар поблагодарил и собрался было что-то спросить относительно выступления Эддингтона, но тот, извинившись, отклонялся. Раздражение Чандрасекара переросло в смятение.

Схватка

На следующее утро Чандрасекар на поезде приехал в Лондон и взял такси до Берлингтон Хаус, где размещалось Королевское астрономическое общество. Когда он со своим другом Биллом Мак-Крэем ожидал начала заседания, к ним приблизился проходивший мимо Эддингтон, и Мак-Крэй, только что ознакомившийся с программой, спросил: «Профессор Эддингтон, что Вы нам поведаете о релятивистском вырождении?» В ответ Эддингтон, повернувшись к Чандрасекару, сказал: «Это будет для вас сюрпризом» и удалился, оставив Чандрасекара в еще большем недоумении.

Но вот заседание началось. Время медленно тянулось, пока президент Общества делал разные объявления, а астрономы выступали с докладами. Наконец, подошла очередь Чандрасекара. Подавив беспокойство, он выступил безупречно, особенно выделив в своем сообщении полученный им максимальный предел массы белых карликов.

После вежливых аплодисментов членов Общества президент предоставил слово сэру Артуру Эддингтону.

Эддингтон начал спокойно, сделав обзор истории исследования белых карликов. Затем, набирая обороты, он описал беспокоящие его следствия существования предельной массы. На диаграмме Чандрасекара, на которой по вертикали отложена масса звезды, а по горизонтали диаметр (рис. 4.4), существовала только одна совокупность масс и диаметров звезд, для которой гравитация может быть уравновешена нетепловым давлением (т. е. давлением, которое остается

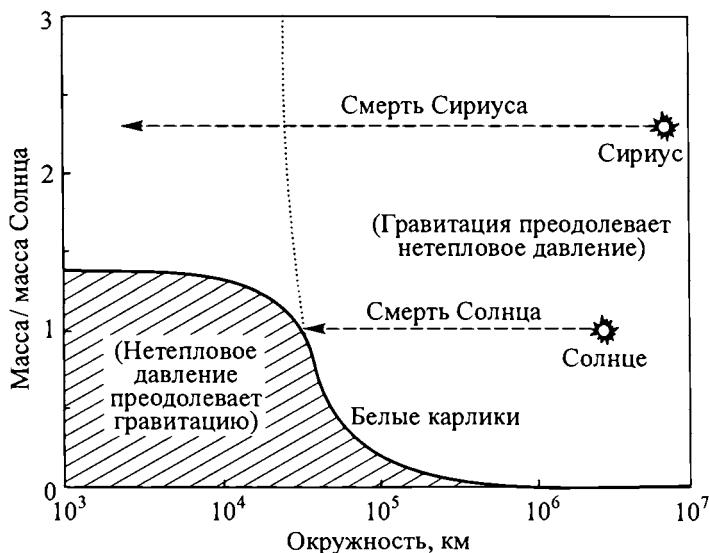
4. ЗАГАДКА БЕЛЫХ КАРЛИКОВ



Слева: Артур Стэнли Эддингтон, 1932 г. *Справа:* Субраманьян Чандрасекар, 1934 г.
[Слева: предоставлено UPI/Bettmann; справа: предоставлено С. Чандрасекаром]

после остывания звезды) — это и есть белые карлики. В области слева от кривой белых карликов Чандрасекара (заштрихованная область, звезды с меньшим диаметром) давление вырождения полностью пересиливает гравитацию, что должно для любой звезды, находящейся в заштрихованной области, привести к взрыву. Справа от кривой (светлая область, звезды с большим, чем у белых карликов, радиусом), напротив, гравитация преодолевает давление вырождения звезды. Каждая холодная звезда, оказавшаяся в этой области, немедленно схлопнется под действием гравитационного сжатия.

Солнце может существовать в светлой области, поскольку сейчас оно очень горячее; его термическому (обусловленному теплом) давлению удастся уравновесить гравитацию. Однако когда Солнце, в конце концов, остынет, его тепловое давление исчезнет, и Солнце не сможет больше себя поддерживать. Гравитация заставит его сжиматься до все меньших размеров, стискивая электроны Солнца во все уменьшающихся ячейках, пока, наконец, они не смогут противопоставить сжатию достаточное давление вырождения. В процессе такого сжатия — «смерти» масса Солнца будет оставаться почти постоянной, тогда как его диаметр будет уменьшаться и, следовательно,



- 4.4. Когда обычная звезда вроде Сириуса (но не Сириуса В) или Солнца начинает остывать, она должна сжиматься, двигаясь влево на этой диаграмме масс и диаметров звезд. Сжатие Солнца остановится, как только оно достигнет края заштрихованной области (кривая белых карликов). В этом месте давление вырождения сравняется с силами гравитационного сжатия. Сжатие Сириуса, напротив, не может быть остановлено таким же образом, поскольку он никогда не достигнет границы заштрихованной области. Если бы (как заявлял Эддингтон) сопротивление сжатию вещества белых карликов всегда было равно $5/3$, т. е. релятивистские эффекты не уменьшали бы его до $4/3$ при высоких плотностях, то график зависимости массы от диаметра имел бы вид пунктирной кривой, и сжатие Сириуса остановилось бы на этой линии

оно будет двигаться влево вдоль горизонтальной линии на рис. 4.4, пока, наконец, не остановится на кривой белых карликов — своей гробнице. В этом состоянии, в виде белого карлика, Солнце будет существовать всегда, постепенно остывая и превращаясь в черный карлик — холодный темный твердый объект, с размером, примерно равным размеру Земли, но в миллионы раз более тяжелый и плотный.

Такая конечная судьба Солнца казалась Эддингтону вполне удовлетворительной. Но не конечная судьба звезд, имеющих массу, большую предельной массы, полученной Чандрасекаром (1,4 солнечной), например Сириуса, спутника Сириуса В, массой в 2,3 солнечной. Если Чандрасекар был прав, такая звезда никогда не сможет умереть спокойной смертью, подобной той, что ожидает Солнце. Когда излучение, постоянно испускаемое звездой в пространство, унесет достаточно тепла, и звезда начала остывать, тепловое давление понизится, и гравитационные силы будут уменьшать и уменьшать ее

4. ЗАГАДКА БЕЛЫХ КАРЛИКОВ

размеры. Но для такой тяжелой звезды, как Сириус, сжатие не может быть остановлено вырожденным давлением. Это становится понятным из рис. 4.4, на котором заштрихованная область не поднимается достаточно высоко, чтобы помешать предначертанному пути сжатия Сириуса. Эддингтон находил это предсказание неприемлемым.

«Звезда будет продолжать излучать, сжимаясь и сжимаясь, — сообщал Эддингтон аудитории, — пока, как я полагаю, она не уменьшится до размера в несколько километров, когда гравитация станет столь сильной, что будет удерживать излучение, и звезда, наконец, упокоится с миром». (Говоря словами 1990-х годов, она должна стать черной дырой.) «Доктор Чандрасекар ранее получил этот результат, однако в своей последней статье он сгладил проблему. Обсуждая ее с ним, я пришел к заключению, что это почти *reductio ad absurdum*⁶ формулы релятивистского вырождения. Разные случайности могут вмешаться и спасти звезду, но я хочу лучшей защиты. Думаю, должен существовать закон природы, не позволяющий звездам вести себя столь абсурдным образом!»

Затем Эддингтон оспорил математические доказательства Чандрасекара, заявив, что им нельзя доверять, поскольку они основываются на неадекватно сделанном соединении специальной теории относительности и квантовой механики. «Я не считаю, что плод этого союза рожден в законном браке», — сказал Эддингтон. «Я почувствую удовлетворение лишь тогда (при условии правильного соединения), когда релятивистские поправки скомпенсируются так, что мы вернемся к “обычной” формуле» (т. е. к сопротивлению $5/3$, которое позволило бы существовать белым карликам произвольной массы и тем самым позволило бы давлению прекратить сжатие Сириуса на гипотетической пунктирной кривой рис. 4.4). Затем Эддингтон обрисовал, как необходимо, по его разумению, проделать соединение квантовой теории и специальной теории относительности, совсем не так, как это сделали Чандрасекар, Стоунер и Андерсон: подобное соединение спасло бы все звезды от судьбы черной дыры.

Чандрасекар был шокирован. Он никак не ожидал такой атаки на свою работу. Почему Эддингтон не обсудил все это с ним заранее? Что же касается аргументов Эддингтона, они показались Чандрасекару подозрительными, почти наверняка неверными.

В то время Эддингтон считался великим человеком в британской астрономии. Его открытия были почти легендарными. Во многом благодаря ему астрономы пришли к пониманию обычных звезд, таких, как Солнце и Сириус: их строения, атмосферы и света, который

⁶ Доведение до абсурда. [Прим. пер.]

они излучают. Поэтому, естественно, члены Общества, как и астрономы всего мира, внимали ему с великим уважением. Естественно, раз Эддингтон думал, что анализ Чандрасекара неверен, он должен был быть неверным.

После заседания к Чандрасекару один за другим подходили члены Общества с выражением сочувствия. «Я печенкой чувствую, что Эддингтон прав», — заявил ему Милн.

* * *

На следующий же день Чандрасекар обратился за поддержкой к своим друзьям физикам. Вот что он писал Леону Розенфельду в Копенгаген: «Если Эддингтон прав, то вся моя четырехмесячная работа идет в корзину. Но прав ли Эддингтон? Я очень хотел бы узнать мнение Бора.» (Нильс Бор был одним из отцов квантовой механики и самым уважаемым физиком в 30-х годах.) Розенфельд ответил спустя два дня, уверив, что и он, и Бор убеждены, что Эддингтон ошибается и прав Чандрасекар. «Могу только сказать, что твое письмо меня удивило, — писал он, — поскольку никто и никогда не думал оспаривать уравнения [которые Чандрасекар использовал для получения сопротивления $4/3$], замечание Эддингтона, приведенное в твоём письме, выглядит крайне непонятным. Думаю, тебе следует приободриться и не позволять запугать [*sic*] себя верховным жрецам». В следующем письме, отправленном в тот же день, Розенфельд писал: «Мы с Бором абсолютно не в состоянии разглядеть какой-либо смысл в утверждениях Эддингтона».

Однако для астрономов суть дела сначала не была столь прозрачной. Они не были искусны в тонкостях квантовой механики и теории относительности, и среди них авторитет Эддингтона удерживал господство еще несколько лет. Но и позже Эддингтон продолжал упорно держать оборону. Он был настолько ослеплен своим неприятием черных дыр, что утратил здравый смысл. Он так хотел, чтобы «существовал закон природы, не позволяющий звездам вести себя столь абсурдным образом», что вплоть до самой смерти в 1944 г. продолжал верить в то, что такой закон действительно есть, хотя фактически такого закона не существовало.

К концу 30-х годов астрономы, объяснившись с коллегами-физиками, поняли ошибку Эддингтона, но уважение к его огромным прежним достижениям не позволяло заявлять об этом публично. В 1939 г. в Париже в своем выступлении на астрономической конференции Эддингтон вновь атаковал выводы Чандрасекара. Как только Эддингтон начал нападать на него, Чандрасекар послал председа-

4. ЗАГАДКА БЕЛЫХ КАРЛИКОВ

тельствовавшему Генри Норрису Расселу (знаменитому астроному из Принстонского университета в Америке) записку, в которой просил позволить ему выступить. В ответной записке Рассел написал: «Я бы не хотел, чтобы вы делали это», хотя ранее в тот же день в частной беседе сказал: «Здесь мы не верим Эддингтону».

Полностью приняв, наконец (хотя и за спиной Эддингтона), предельную массу белых карликов, полученную Чандрасекаром, были ли они готовы допустить, что во Вселенной должны существовать черные дыры? Вовсе нет. Если природа не противопоставила им закона типа того, который искал Эддингтон, она, конечно же, найдет другой выход. Так, возможно, каждая массивная звезда в процессе старения или в предсмертной агонии извергает в межзвездное пространство достаточно вещества, чтобы уменьшить свою массу до 1,4 солнечной и, тем самым, войти в более безопасную «могилу» белого карлика. Это была точка зрения, на которую встало большинство астрономов после поражения Эддингтона, и придерживались они ее в течение 40-х и 50-х годов, а многие — и в начале 60-х.

Что касается Чандрасекара, его больно ранил весь этот спор с Эддингтоном. Как он вспоминал много лет спустя: «Я чувствовал, что все астрономы без исключения думали, что я не прав. Они считали меня кем-то вроде Дон Кихота, пытающегося убить Эддингтона. Можете себе представить, каким обескураживающим опытом это стало для меня — оказаться втянутым в спор с главной фигурой в астрономии, тогда как моя работа была полностью и окончательно дискредитирована астрономическим сообществом. Я должен был для себя решить, что делать дальше. Должен ли я посвятить всю оставшуюся жизнь этой борьбе? В то время я был в середине своего третьего десятилетия и планировал еще лет тридцать-сорок заниматься научной деятельностью, поэтому просто не думал, что было бы продуктивным постоянно отстаивать уже сделанное. Гораздо лучше было бы сменить область интересов и заняться чем-то другим».

Поэтому в 1939 г. он повернулся спиной к белым карликам и смерти звезд и не возвращался к ним четверть века (глава 7).

А что же Эддингтон? Почему он так сурово обошелся с Чандрасекаром? Эддингтону такое обращение могло вовсе и не казаться плохим. Резкие и бескомпромиссные интеллектуальные конфликты были его образом жизни. Такое обхождение с Чандрасекаром являлось даже в какой-то степени мерой уважения, знаком того, что он признает Чандрасекара членом астрономического сообщества. Фактически, начиная с первого столкновения в 1935 г. и до самой смерти в 1944 г., Эддингтон проявлял теплое личное расположение к Чандрасекару, и Чандрасекар, хотя и задетый спором, отвечал тем же.

СХЛОПЫВАНИЕ НЕИЗБЕЖНО

глава, в которой даже ядерные силы, казалось бы самые мощные из всех видов сил, не могут противостоять мощи гравитации

Цвикки

В 1930—1940-х годах многие коллеги Фрица Цвикки воспринимали его как паяца. Будущие поколения астрономов сочтут его гением.

«Когда я познакомился с Фрицем, он был всерьез убежден, что у него есть собственная дорога к абсолютному знанию, а все остальные ошибаются», — рассказывает Уильям Фоулер, бывший студентом Калтеха (Калифорнийского технологического института) в то время, когда там преподавал и вел свои исследования Цвикки. Джесси Гринштейн — коллега Цвикки по Калтеху с конца 40-х годов — вспоминает его как «самоуверенного гения... Без сомнения, ум его был довольно экстраординарный. Но наряду с этим он также был, хотя и не признавал этого, неотесан и несдержан. Когда он вел свой курс физики, самым главным для него было получить одобрение слушателей. Он принимал только тех, кто проникался его идеями... Он был очень одинок среди преподавателей-физиков Калтеха и не пользовался популярностью у администрации... Его публикации зачастую содержали яростные нападки на других людей».

Цвикки — коренастый человек, задиристый, всегда готовый к драке, — не колебался не только провозглашать свою дорогу к абсолютному знанию, но и навязывать открытия, к которым она вела. В каждой лекции, прочитанной в 1930-х годах, в каждой опубликованной статье он буквально трубил о своей концепции нейтронной звезды — концепции, которую он, Цвикки, создал, чтобы объяснить сущ-



Цвикки

Милликен Эйнштейн

Толман

Фриц Цвикки на встрече ученых в Калтехе в 1931 г. На фотографии также присутствуют Ричард Толман (который будет важной фигурой дальше в этой главе), Роберт Милликен и Альберт Эйнштейн. [Предоставлено архивом Калифорнийского технологического института]

ность самых высокоэнергетических явлений, наблюдаемых астрономами: сверхновых и космических лучей. Для популяризации концепции нейтронных звезд он даже использовал эфир во время национального радишоу. Но при ближайшем рассмотрении его статьи и лекции оказывались неубедительными, в них содержалось слишком мало доказательств его идей.

Ходили слухи, что Роберт Милликен (человек, превративший Калтех в один из сильнейших научных институтов), когда его во время этой шумной кампании спросили, почему он держит Цвикки в Калтехе, ответил, что вполне возможно, что некоторые из заумных идей Цвикки окажутся верны. Милликен, в отличие от многих других в научном сообществе, должно быть, видел признаки гениальной интуиции Цвикки, признанной только 35 лет спустя, когда астрономы-наблюдатели действительно обнаружат нейтронные звезды и проверят некоторые связанные с ними экстравагантные гипотезы Цвикки.

Среди предвидений Цвикки, более всего относящихся к теме этой книги, стоит упомянуть его подход к нейтронным звездам как к «трупам» обычных звезд. Как мы увидим в дальнейшем, нормальную звезду, слишком массивную, чтобы окончить жизнь белым карликом, может постигнуть смерть в виде нейтронной звезды. Если бы все массивные звезды

гибли таким образом, Вселенная была бы спасена от самых странных гипотетических звездных «трупов» — черных дыр. Если бы легкие звезды становились после смерти белыми карликами, а тяжелые превращались в нейтронные звезды, то у Природы не осталось бы возможности создать черные дыры. И тогда Эйнштейн и Эддингтон, как и большинство физиков и астрономов той эпохи, вздохнули бы с облегчением.

* * *

Цвикки в Калтех привлек Милликен, для того чтобы тот занялся теоретическими исследованиями квантово-механических свойств атомов в кристаллах. Однако в конце 20-х — начале 30-х годов Цвикки все больше стал погружаться в астрофизику. Да и трудно было не дать себя заморозить астрономической Вселенной, работая в Пасадине, месте, где располагается не только Калтех, но и обсерватория Маунт Вильсон, имеющая в своем распоряжении самый большой в мире телескоп-рефлектор с зеркалом диаметром 2,5 м.

В 1931 г. Цвикки сблизился с Вальтером Бааде, новичком, прибывшим в Маунт Вильсон после работы в Гамбурге и Геттингене, прекрасным астрономом-наблюдателем. Бааде и Цвикки имели общую культурную базу: Бааде был немец, Цвикки — швейцарец, и для обоих немецкий был родным языком. Они также испытывали взаимное уважение к блестящим способностям друг друга. Но этим общее между ними и ограничивалось. Темперамент Бааде отличался от темперамента Цвикки. Бааде был скрытен, горд, неконтактен, универсально образован и терпим к странностям коллег. Цвикки будет испытывать его терпение в течение ряда лет, пока во время второй мировой войны они окончательно не разойдутся. «Цвикки называл Бааде нацистом, которым тот не был, а Бааде заявлял, что боится, как бы Цвикки не убил его. Они стали слишком опасной парочкой, чтобы держать их в одной комнате», — вспоминала Джесси Гринштейн.

В 1932 и 1933 гг. в Пасадине часто видели Бааде и Цвикки, оживленно беседующими по-немецки о так называемых «новых» звездах, которые неожиданно вспыхивают и начинают светить в десятки тысяч раз ярче, чем до этого, а затем примерно за месяц медленно блекнут до нормального состояния. Бааде, имевший энциклопедические познания в астрономии, был знаком с экспериментальными свидетельствами того, что кроме «обычных» новых должны существовать и необычные, редкие, сверхъяркие новые. Поначалу астрономы не подозревали, что эти новые являются сверхъяркими, поскольку в телескоп они имели примерно ту же светимость, что и обычные новые. Однако

5. Схлопывание неизбежно

располагались они в своеобразных туманностях (светящихся облаках). Наблюдения, проведенные в Маунт Вильсон и других обсерваториях в 1920-х годах, начали убеждать астрономов, что эти туманности не просто облака газа в нашем Млечном Пути, как думали ранее, но представляют собой равноправные галактики — гигантские скопления, содержащие около 10^{12} (т. е. триллионов) звезд и находящиеся далеко за пределами нашей Галактики. Отдельные наблюдаемые в этих галактиках новые звезды, будучи расположены много дальше, чем обычные новые нашей Галактики, должны быть существенно более яркими, чтобы при наблюдении с Земли иметь ту же светимость.

Бааде собрал все данные наблюдений, какие только смог найти в литературе относительно каждой из шести сверхярких новых, наблюдавшихся астрономами с начала столетия. Эти данные он объединил со всей доступной ему информацией о расстоянии до галактик, в которых находились эти звезды, и соединив все это, вычислил, сколько света испускает сверхяркая новая. Вывод оказался поразительным: во время вспышки такие новые были обычно в 10^8 (т. е. в 100 миллионов) раз ярче, чем наше Солнце! (Сегодня мы знаем, во многом благодаря работам самого Бааде 1952 г., что оценка расстояния до галактик в 1930 г. была занижена примерно в 10 раз и что, соответственно, сверхяркие звезды были почти в 10^{10} (10 миллиардов) раз ярче Солнца.¹⁾

Любитель крайностей, Цвикки был пленен этими сверхяркими новыми. Именно Бааде и Цвикки, несчетное число раз обсуждая эти звезды, дали им имя *сверхновые*. Каждая сверхновая, как они (справедливо) полагали, образуется в результате взрыва обычной звезды. И этот взрыв, как они подозревали (на этот раз неверно), столь горяч, что гораздо больше энергии испускается в виде ультрафиолетового и рентгеновского излучения, чем в виде обычного света. Поскольку ультрафиолетовое и рентгеновское излучение не может проникать сквозь земную атмосферу, невозможно и измерить содержащуюся в нем энергию. Однако эту энергию можно оценить, исходя из наблюдаемого спектра и законов физики, управляющих горячим газом от взрывающейся сверхновой.

Объединив знания Бааде о наблюдениях новых звезд и понимание Цвикки законов теоретической физики, два друга пришли к заключению (неверному), что ультрафиолетовое и рентгеновское излучение сверхновых должно нести в 10 тысяч, а возможно, и в 10 миллионов раз,

¹ Количество достигающего Землю света обычно обратно пропорционально квадрату расстояния до сверхновой; поэтому ошибка в расстоянии в 10 раз означала ошибку в оценках Бааде полного излучения в 100 раз.



Галактика NGC 4725 в созвездии Волосы Вероники. *Слева*: фотография 10 мая 1940 г. до взрыва сверхновой. *Справа*: 2 января 1941 г. во время взрыва. Белая стрелка указывает на сверхновую на окраине галактики. Как сейчас известно, эта галактика находится на расстоянии 30 миллионов световых лет от Земли и содержит 3×10^{11} (треть триллиона) звезд. [Предоставлено Калифорнийским технологическим институтом]

больше энергии, чем видимый свет. Цвикки со своей любовью к крайностям настаивал именно на верхней оценке — 10 миллионов, и с энтузиазмом на нее ссылался.

Этот неверный коэффициент означал, что в течение нескольких дней максимальной яркости сверхновая испускает чудовищное количество энергии: Солнце за всю свою жизнь длиной в 10 миллиардов лет излучает в виде света и тепла примерно лишь в 100 раз больше. Это примерно такое количество энергии, которое можно было бы получить, превратив одну десятую часть массы Солнца в чистую энергию излучения! (Благодаря десятилетиям последующих наблюдений сверхновых, многие из которых были проведены самим Цвикки, теперь мы знаем, что оценка Бааде—Цвикки энергии сверхновых была не столь далека от истины. Однако их вычисления имели существенный недостаток: как теперь стало понятно, почти вся теряемая энергия уносится частицами, называемыми нейтрино, а не ультрафиолетовым и рентгеновским излучением, как они полагали. Бааде и Цвикки получили верный ответ лишь благодаря счастливой случайности.)

Какова же природа огромной энергии сверхновой? Чтобы ответить на этот вопрос, Цвикки и изобрел нейтронную звезду.

Цвикки интересовался всеми разделами физики и астрономии, а также воображал себя философом. Он пытался объединить все явления, с которыми сталкивался, в нечто, впоследствии названное им «морфологической моделью». В 1932 г. самым популярным из всех направлений в физике и астрономии была *ядерная физика*, изучение

5. Схлопывание неизбежно

атомных ядер. Именно отсюда извлек Цвикки ключевую составляющую своей идеи нейтронных звезд — концепцию *нейтрона*.

* * *

Поскольку нейтрон будет играть в дальнейшем очень важную роль в этой главе, я слегка отвлекусь от Цвикки и от его нейтронных звезд, чтобы рассказать об открытии нейтрона и его связи со структурой атомов.

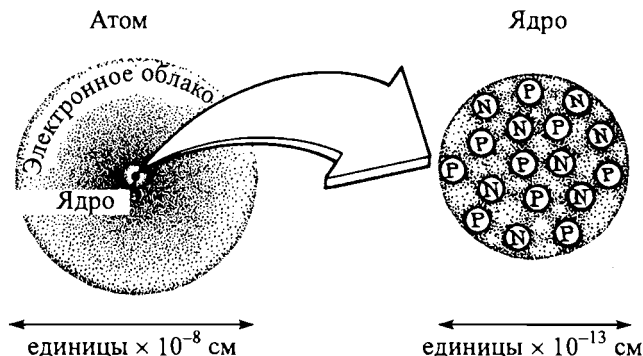
После того как в 1926 г. были сформулированы «новые» законы квантовой механики (глава 4), последующие пять лет физики провели в непрерывных исследованиях микромира. Они приоткрыли завесу тайны над атомами (Врезка 5.1) и над строением молекул металлов, кристаллов и вещества белых карликов, построенных из этих атомов. Затем в 1931 г. физики обратили внимание на внутреннее строение атома — его оболочку и ядро.

Природа атомного ядра оставалась большой загадкой. Большинство физиков думали, что оно сделано из горсти электронов и вдвое большего числа протонов, связанных неким, пока непонятным, способом. Однако у Эрнста Резерфорда из Кембриджа (Англия) была другая гипотеза: протоны и нейтроны. О существовании протонов было уже известно. Их несколько десятилетий исследовались в физических экспериментах, позволивших установить, что они почти в 2000 раз тяжелее электронов и несут положительный заряд. Нейтроны же известны не были.

Врезка 5.1

Внутренние структуры атомов

Атом состоит из электронного облака, окружающего массивное центральное ядро. Электронное облако имеет размер примерно равный 10^{-8} см (в миллион раз меньше диаметра человеческого волоса), а ядро еще в 100 000 раз меньше, примерно 10^{-13} см (см. рисунок внизу). Если



бы электронное облако увеличилось до размера Земли, то ядро стало бы размером с футбольное поле. Несмотря на крошечный размер, ядро в несколько тысяч раз тяжелее электронного облака.

Отрицательно заряженные электроны удерживаются в облаке притяжением положительного электрического заряда ядра и не падают на ядро по той же самой причине, по которой не схлопывается звезда — белый карлик: Закон квантовой механики, называемый принципом Паули, запрещает больше чем двум электронам занимать в одно и то же время одну и ту же область пространства (два могут, если имеют противоположные «спины» — деталь, игнорируемая в главе 4). Поэтому электронные облака попарно объединены в ячейках пространства, называемых «орбиталями». Каждая пара электронов, протестуя против заключения ее в тесной ячейке, совершает беспорядочные быстрые «клаустрофобные» движения, так же как и электроны в белом карлике (глава 4). Эти движения приводят к «электронному давлению вырождения», которое противодействует электрическому притяжению ядра. Таким образом, атом можно считать похожим на крошечную звезду белый карлик, в которой электронному давлению вырождения, выталкивающему электроны наружу, противодействуют затягивающие их внутрь электрические, а не гравитационные силы.

На правой картинке внизу на предыдущей странице дан набросок описанной структуры атомного ядра — это крошечный кластер протонов и нейтронов, скрепляемый ядерной силой.

Резерфорду пришлось постулировать существование нейтронов, чтобы успешно объяснить ядро с помощью законов квантовой механики. Для подобного объяснения требовалось учесть три факта: 1) каждый нейтрон должен иметь примерно ту же массу, что и протон, но не иметь заряда; 2) каждое ядро должно содержать примерно одинаковое число протонов и нейтронов; 3) все нейтроны и протоны должны надежно удерживаться в крошечном ядре новым видом силы, не электрической и не гравитационной, но силой, естественно, названной ядерной. (Сейчас также употребляют термин «сильное взаимодействие».) Ответом на такое заключение со стороны нейтронов и протонов должно стать клаустрофобическое беспорядочное движение с огромной скоростью, вызывающее вырожденное давление, и это давление должно противостоять ядерной силе, поддерживая постоянный размер ядра порядка 10^{-13} см.

В 1931 г. и в начале 1932 г. физики-экспериментаторы вступили в острое соперничество на поле проверки такого описания ядра. Методика проверки состояла в том, чтобы попытаться выбить из атомного ядра несколько постулированных Резерфордом нейтронов, бомбардируя ядро излучением высокой энергии. Соревнование было выиграно в феврале 1932 г. членом команды экспериментаторов группы самого Резерфорда Джеймсом Чедвиком. Бомбардировка, предпринятая Чед-

5. Схлопывание неизбежно

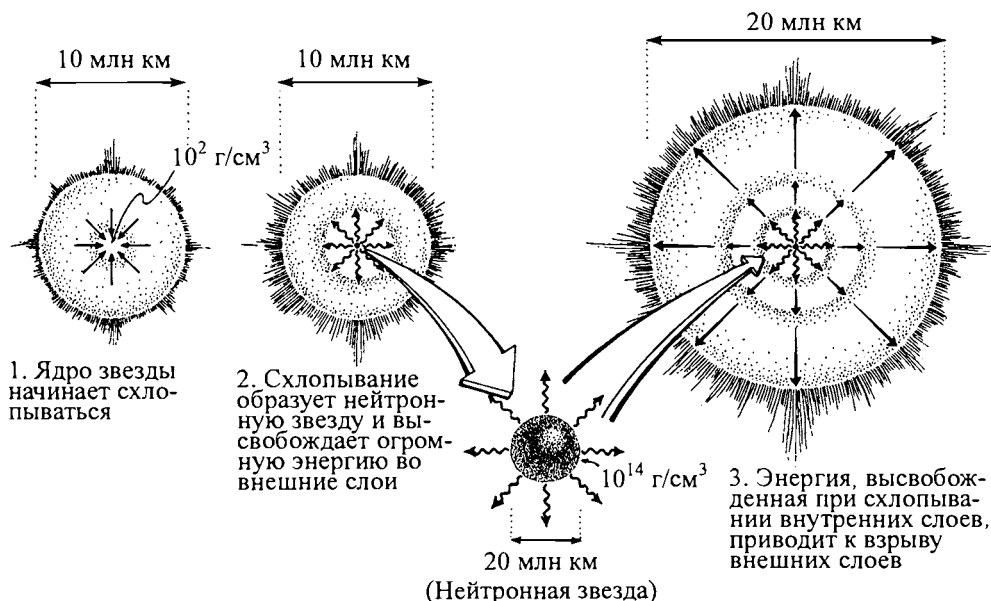
виком, удалась, в изобилии возникли нейтроны, которые имели как раз постулированные Резерфордом свойства. Газеты раструбили об открытии по всему миру и, естественно, оно привлекло внимание Цвикки.

* * *

Нейтрон появился на сцене как раз в тот год, когда Бааде и Цвикки бились над пониманием сверхновых. Как показалось Цвикки, нейтрон — это как раз то, что им было нужно. Он полагал, что, возможно, ядро нормальной звезды с плотностью, скажем, 100 грамм на кубический сантиметр может схлопываться до тех пор, пока не достигнет такой же плотности, как в атомном ядре (10^{14} грамм на кубический сантиметр), и что, возможно, вещество такого сжатого звездного ядра превращается в «газ» нейтронов — в «нейтронную звезду», как назвал ее Цвикки. Если это действительно так, то как (на этот раз верно) рассчитал Цвикки, мощная гравитация спрессованного звездного ядра будет стискивать его столь сильно, что уменьшится не только поперечник звезды, но и ее масса. Масса ядра звезды будет теперь на 10% меньше, чем до сжатия. Куда же уходят эти 10% массы ядра? Цвикки (снова верно; см. рис. 5.1 и Врезку 5.2) полагал, что в энергию взрыва.

Если масса сжатого звездного ядра составляет, как верил Цвикки, величину порядка массы Солнца, то 10% от нее, преобразованные в энергию взрыва, когда ядро становится нейтронной звездой, породят 10^{46} Дж, что близко к величине энергии, требуемой, по мнению Цвикки, для существования сверхновой. Энергия взрыва должна нагревать внешние слои звезды до огромных температур, выбрасывая их в межзвездное пространство (рис. 5.1), и поэтому во время взрыва звезда со столь высокой температурой будет ярко светиться, так же, как и идентифицированные Бааде сверхновые.

Цвикки не знал, что может инициировать сжатие звездного ядра в нейтронную звезду, не знал также, как будет вести себя звезда в процессе сжатия, и потому не мог оценить, сколько времени оно будет продолжаться (медленное ли это опадание или быстрое схлопывание). (Когда, наконец, в 60-х годах процесс сжатия ядра был детально проанализирован, оказалось, что он представляет собой резкое схлопывание под действием гравитационных сил, заставляющих звезду размером, примерно равным размеру Земли, уменьшаться в окружности до 100 км менее чем за 10 с.) Кроме того, Цвикки точно не понимал, как именно энергия, высвобождающаяся в процессе сжатия



5.1. Гипотеза Цвикки, объясняющая взрыв сверхновой: энергия взрыва высвобождается из-за схлопывания ядра звезды нормальной плотности до образования нейтронной звезды. Ядро звезды начинает схлопываться (*слева*). Схлопывание формирует нейтронную звезду и создает поток энергии во внешние слои звезды (*в центре*). Энергия, выделяемая в результате сброса внешних слоев звезды при вспышке сверхновой (*справа*)

звезды, может породить взрыв сверхновой, и почему продукты взрыва должны так ярко вспыхивать на несколько дней, и оставаться достаточно яркими еще несколько месяцев, а не секунд, часов или лет. Он, однако, знал (или думал, что знает), что при образовании нейтронной звезды высвобождается достаточно энергии, и это было все, чего он хотел.

Врезка 5.2

Эквивалентность массы и энергии

Согласно законам специальной теории относительности Эйнштейна, масса просто является очень компактной формой энергии. Возможно, хотя это совсем не тривиально, преобразовывать любую массу, включая массу человека, в энергию взрыва. Количество энергии, которое получается от такого преобразования, — огромно. Оно дается известной формулой Эйнштейна $E = Mc^2$, где E — энергия взрыва, M — масса, которая преобразуется в энергию, и $c = 2,99792 \times 10^8$ метров в секунду — скорость света. Эта формула предсказывает, что в 75 килограммах массы типичного человека заключена взрывчатая энергия равная 7×10^{18} джоулей, что в тридцать раз больше

энергии взрыва самой мощной водородной бомбы, которая когда-либо испытывалась.

Преобразование массы в тепло или в кинетическую энергию взрыва лежит в основе объяснения сверхновых звезд Цвикки (рис. 5.1), ядерного горения, поддерживающего жар Солнца (см. далее в этой главе), и ядерных взрывов (следующая глава).

Цвикки не мог удовлетвориться объяснением только сверхновых, он хотел объяснить все во Вселенной. Среди непонятых явлений, привлекавших в Калтехе в 1932–1933 гг. наибольшее внимание, были космические лучи — быстрые частицы, бомбардирующие Землю из космоса. Роберт Милликен из Калтеха был признанным мировым лидером в их исследовании и именно он дал им имя, а Карл Андерсон, также работавший в Калтехе, открыл, что некоторые частицы космических лучей построены из антивещества². Цвикки, обожавший крайности, убедил себя (как оказалось, правильно), что космические лучи в основном приходят извне Солнечной системы и (это не так) даже извне нашей галактики Млечный Путь — из самых отдаленных пределов Вселенной, и уверился в том, что полная энергия, переносимая всеми космическими лучами во Вселенной (примерно так оно и есть), составляет величину порядка той, что высвобождается всеми сверхновыми Вселенной. Вывод был для Цвикки очевиден (и, возможно, правилен³): космические лучи рождаются при взрывах сверхновых.

К концу 1933 г. Цвикки окончательно убедил себя в существовании тесной связи между сверхновыми, нейтронами и космическими лучами. Поскольку энциклопедические познания Бааде в наблюдательной астрономии послужили основной базой для установления этих связей, и поскольку во многом расчеты и аргументы Цвикки родились в результате оживленных совместных дискуссий, Цвикки и Бааде договорились представить совместную работу на собрании Американского физического общества в Стэнфордском университете, который находится в одном дне приятной езды по побережью от Пасадины. Тезисы их доклада, опубликованные в журнале *Physical Review* 15 января 1934 г., воспроизведены на рис. 5.2. Это пример одного из самых провидческих документов в истории физики и астрономии. В нем уверенно заявляется о существовании сверхновых, как об определенном классе

² Антивещество называется так потому, что частицы из вещества и антивещества, сталкиваясь, взаимно аннигилируют (уничтожаются).

³ В действительности оказалось, что космические лучи образуются многими способами. До сих пор неизвестно, как именно получается большая часть космических лучей, но есть большая вероятность, что они являются результатом ускорения частиц в газовых туманностях, потомках взорвавшихся сверхновых. Если это так, то косвенным образом Цвикки оказался прав.

JANUARY 15, 1934

PHYSICAL REVIEW

VOLUME 43

Proceedings
of the
American Physical Society

MINUTES OF THE STANFORD MEETING, DECEMBER 15-16, 1933

38. *Supernovae and Cosmic Rays.* W. BAADE, *Mt. Wilson Observatory*, AND F. ZWICKY, *California Institute of Technology*.—Supernovae flare up in every stellar system (nebula) once in several centuries. The lifetime of a supernova is about twenty days and its absolute brightness at maximum may be as high as $M_{v,14} = -14^m$. The visible radiation L_v of a supernova is about 10^8 times the radiation of our sun, that is, $L_v = 3.78 \times 10^{44}$ ergs/sec. Calculations indicate that the total radiation, visible and invisible, is of the order $L_t = 10^7 L_v = 3.78 \times 10^{44}$ ergs/sec. The supernova therefore emits during its life a total energy $E_t \geq 10^8 L_v = 3.78 \times 10^{44}$ ergs. If supernovae initially are

quite ordinary stars of mass $M < 10^{31}$ g, E_t/c^2 is of the same order as M itself. In the supernova process mass is bulk is annihilated. In addition the hypothesis suggests itself that cosmic rays are produced by supernovae. Assuming that in every nebula one supernova occurs every thousand years, the intensity of the cosmic rays to be observed on the earth should be of the order $e = 2 \times 10^{-3}$ erg/cm² sec. The observational values are about $e = 3 \times 10^{-4}$ erg/cm² sec. (Millikan, Regener). With all reserve we advance the view that supernovae represent the transitions from ordinary stars into neutron stars, which in their final stages consist of extremely closely packed neutrons

- 5.2. Тезисы доклада о сверхновых, нейтронных звездах и космических лучах, который Вальтер Бааде и Фриц Цвикки сделали в Стэнфордском университете в декабре 1933 г.

астрономических объектов, хотя адекватные прочные доказательства того, что они отличаются от обычных новых, будут получены Бааде и Цвикки лишь в 1938 г., четыре года спустя. Для обозначения этих объектов впервые введен термин «сверхновые». Правильно оценена полная излучаемая ими энергия. Выдвинуто также предположение, что космические лучи образуются при взрыве сверхновых, — гипотеза, кажущаяся правдоподобной в 1994 г., но все еще строго не подтвержденная (см. сноску 3). Была представлена концепция нейтронной звезды, состоящей из нейтронов, — концепция, которая не была широко принята как теоретически плодотворная вплоть до 1939 г. и не была подкреплена наблюдениями вплоть до 1968 г. Введено само название *нейтронная звезда* для обозначения новой концепции. И «со всеми оговорками» (фраза, вероятно, вставленная по настоянию Бааде) высказывалось предположение, что сверхновые получаются при превращении обычных звезд в нейтронные звезды, — предположение, теоретическая жизнеспособность которого будет доказана только в начале 60-х годов и подтверждена наблюдениями лишь в конце 60-х с открытием пульсаров (вращающихся намагниченных нейтронных звезд) внутри газовых остатков взрывов древних сверхновых.

В 1930 г. астрономы с энтузиазмом откликнулись на концепцию сверхновых Бааде—Цвикки, но на идеи Цвикки относительно нейтронных звезд и космических лучей смотрели с некоторым пренебрежением.

Общее мнение сводилось к тому, что они «слишком умозрительны». К этому можно было бы обоснованно добавить — и «основываются на ненадежных расчетах». В публикациях и выступлениях Цвикки не содержалось ничего, кроме скупых намеков на то, что могло бы подкрепить его идеи. Фактически, как мне стало понятно после детального анализа работ Цвикки того периода, он недостаточно хорошо понимал законы физики, чтобы суметь доказать свои идеи. Позже я еще к этому вернусь.

* * *

В ретроспективе некоторые концепции в науке представляются настолько очевидными, что возникает недоумение, почему никто не обратил на них внимание раньше. Таковой представляется и связь нейтронных звезд с черными дырами. Цвикки мог бы установить такую связь еще в 1933 г., но он этого не сделал; первый намек появится лишь через шесть лет, а определенно взаимосвязь будет доказана только четверть века спустя. Изложению этого тернистого пути, в конце которого физики буквально уткнулись в существование такой связи, и будет в основном посвящена оставшаяся часть главы.

Чтобы лучше оценить рассказ о том, как физики пришли к пониманию связи «нейтронные звезды — черные дыры», полезно узнать кое-что об этой связи заранее. Поэтому сделаем некоторое отступление.

Какая судьба ожидает звезды после их смерти? Глава 4 дала частичный ответ, отраженный на правой половине рис. 5.3 (повторяющем рис. 4.4). Этот ответ зависел от того, была ли звезда тяжелее или легче, чем 1,4 солнечной массы (предельная масса Чандрасекара).

Если масса звезды меньше, чем предел Чандрасекара, например, если эта звезда — само Солнце, то в конце жизни она последует по пути, обозначенном на рис. 5.3 «смерть Солнца». Излучая энергию во внешнее пространство, звезда постепенно охлаждается, в результате уменьшается тепловое (обусловленное высокой температурой) давление. С уменьшением давления противодействие силам собственной гравитации становится больше невозможным, что заставляет звезду сжиматься. Сжимаясь, звезда движется влево на рис. 5.3 в направлении уменьшения размера, оставаясь на графике всегда на одной и той же высоте, поскольку ее масса не меняется. (Следует иметь в виду, что на графике масса отложена по вертикальной оси, а длина окружности увеличивается вправо, по горизонтальной оси.) Сжимаясь, звезда стискивает свои внутренние электроны в ячейках, которые становятся все меньше, пока, наконец, электроны не ответят столь сильным



5.3. Конечная судьба звезды, более тяжелой, чем предел Чандрасекара, равный 1,4 солнечной массы, зависит от того, насколько массивной может быть нейтронная звезда. Если ее масса может быть произвольной (кривая *B*), то звезда типа Сириуса, умирая, может схлопнуться лишь в нейтронную звезду и не может превратиться в черную дыру. Если же имеется верхняя граница для массы нейтронной звезды (как на кривой *A*), то гибнущая тяжелая звезда не может превратиться ни в белый карлик, ни в нейтронную звезду, а поскольку иного места на «кладбище» звезд не находится, она умирает, став черной дырой

давлением вырождения, что звезда не сможет более продолжать сжатие. Давление вырождения противодействует внутренней гравитационной силе, вынуждая звезду упокоиться в «могиле» белого карлика на граничной кривой (кривая белых карликов) между светлой и заштрихованной областями рис. 5.3. Если звезда сожмется еще больше (т. е. будет двигаться влево от кривой белых карликов в заштрихованную область), ее давление электронного вырождения возрастет и заставит звезду расшириться и тем самым вернуться на кривую белых карликов. Если звезда расширится в светлую область, давление электронного вырождения ослабнет и позволит гравитации опять сжать ее, вновь вернув к кривой. Таким образом, у звезды нет иного выбора, кроме как навсегда оставаться на этой кривой белых карликов (где гравитация и давление полностью уравниваются), постепенно охлаждаясь и превращаясь в черный карлик — холодное темное твердое тело размером с Землю и массой с Солнце.

Если звезда более массивная, чем предел Чандрасекара (1,4 массы Солнца), например Сириус, то в конце своей жизни она последует по пути, намеченному на рисунке как «путь Сириуса». Излучая и охла-

5. Схлопывание неизбежно

даясь, звезда будет двигаться влево по этому пути, в сторону уменьшения размера, при этом внутренние электроны будут стиснуты во все меньших и меньших ячейках. Их протест выразится во все нарастающем давлении вырождения, но он напрасен, поскольку из-за большой массы гравитация звезды достаточно сильна, чтобы подавить протест электронов. Электроны никогда не смогут создать достаточное давление вырождения, чтобы уравнивать гравитацию⁴, и звезда должна будет, по мнению Эддингтона, «продолжать излучать и излучать, сжиматься и сжиматься, пока она не достигнет радиуса равного нескольким километрам, когда гравитация станет достаточно сильной, чтобы удержать излучение: тогда звезда, наконец, сможет обрести покой».

Такая судьба ожидала бы звезды, если бы не нейтронные звезды. Если Цвикки был прав, доказывая их существование, они могли бы быть аналогами белых карликов, но с внутренним давлением вырождения, создаваемым не электронами, а нейтронами. Это означает, что на рис. 5.3 должна находиться кривая нейтронных звезд, аналогичная кривой белых карликов, но с длиной окружности (откладываемой по горизонтальной оси) примерно в сотню километров, вместо десятков тысяч километров. На этой кривой нейтронное давление полностью уравновешивается гравитацией, и следовательно, нейтронные звезды здесь могут покоиться вечно.

Предположим, что кривая нейтронных звезд простирается вверх на рис. 5.3 в направлении больших масс, т. е. предположим, что она имеет вид кривой *B* на этом рисунке. Тогда Сириус, умирая, *не сможет* образовать черную дыру. Вернее, Сириус будет сжиматься до тех пор, пока не натолкнется на кривую нейтронных звезд, после чего сжиматься далее не сможет. Если он попытается еще уменьшиться (т. е. двигаться влево от кривой нейтронных звезд в заштрихованную область), то внутренние нейтроны ответят протестом на подобную попытку их ущемления — они породят большое давление (частично из-за вырождения, т. е. «клаустрофобии», частично из-за ядерных сил), и это давление будет достаточно сильным, чтобы преодолеть гравитацию и вернуть звезду к прежнему состоянию. Если же звезда попытается вновь расшириться в светлую область, давление нейтронов настолько ослабнет, что гравитация опять начнет сжатие. Таким образом, у Сириуса не останется другого выбора, кроме как остановиться на кривой нейтронных звезд и оставаться здесь вечно, постепенно остывая и становясь твердой холодной черной нейтронной звездой.

⁴ Причина была объяснена во Врезке 4.2.

А теперь представим, что вместо этого кривая нейтронных звезд не простирается на рис. 5.3 вверх, в направлении увеличения массы, а изгибается так же, как кривая, помеченная буквой А. Это будет означать, что существует максимальная масса, которую может иметь нейтронная звезда, аналогично пределу Чандрасекара в 1,4 солнечной массы для белых карликов. Так же, как и в случае белых карликов, существование предельной массы для нейтронных звезд незамедлительно предвещало бы следующий важный факт: у звезды с массой большей максимальной гравитация может полностью пересилить давление, в данном случае — нейтронное давление, аналогичное электронному давлению в белых карликах. Поэтому, когда звезда с массой большей новой максимальной умирает, она должна либо отбросить лишнюю массу, чтобы опуститься ниже максимума, либо начать безостановочно сжиматься под действием гравитационного тяготения, миновав кривую нейтронных звезд, чтобы затем, *если* не найдется каких-нибудь еще звездных могил, кроме белых карликов и нейтронных звезд, образовать черную дыру.

Поэтому центральным вопросом, содержащим ключ к пониманию конечной судьбы массивных звезд, является следующий: насколько тяжелой может быть нейтронная звезда. Если она может быть очень тяжелой, более тяжелой, чем любая нормальная звезда, это означает, что черные дыры в реальной Вселенной не возникают. Если же существует максимальная возможная масса нейтронной звезды, и этот максимум не слишком велик, черные дыры будут образовываться при условии отсутствия какой-нибудь звездной «могилы», о которой не подозревали в 1930-х годах.

Ретроспективно подобная последовательность рассуждений представляется очевидной, поэтому кажется удивительным, что ее не воспроизвели ни Цвикки, ни Чандрасекар, ни Эддингтон. Однако если бы Цвикки и попытался пойти по этому пути, он многого бы все равно не добился, поскольку слишком слабо разбирался в ядерной физике, а его знание теории относительности было недостаточно, чтобы установить, накладывают ли физические законы ограничения на массу нейтронных звезд. В Калтехе, однако, были два человека, которые настолько хорошо понимали физику, что были бы в состоянии вывести массу нейтронной звезды: речь идет о Ричарде Чейзе Толмане, химике, ставшем физиком, написавшем классический учебник под названием «Относительность, термодинамика и космология», и Дж. Роберте Оппенгеймере, который позднее возглавит американский проект по разработке атомной бомбы.

Тем не менее, ни Толман, ни Оппенгеймер вообще не обратили внимания на нейтронные звезды Цвикки. Продолжалось это вплоть до

1938 г., когда идея нейтронных звезд была опубликована (под несколько другим названием — *нейтронное ядро*) неким исследователем, которого они, в отличие от Цвикки, уважали — Львом Давидовичем Ландау из Москвы.

Ландау

Публикация Ландау о нейтронных ядрах была в действительности криком о помощи: сталинские чистки в СССР были в полном разгаре, и Ландау был в опасности. Он надеялся, что вызванный газетной публикацией всплеск интереса к идее нейтронного ядра и к нему самому сможет защитить его от ареста и смерти. Но обо всем этом ни Толман, ни Оппенгеймер ничего не знали.

Ландау был в опасности из-за своих прошлых контактов с западными учеными. Вскоре после русской революции новое коммунистическое руководство уделяло науке особое внимание. Ленин лично на VIII съезде партии большевиков провел резолюцию, освобождающую ученых от требований идеологической чистоты. По его мнению, проблема индустриального и экономического развития страны требовала немедленного и всеохватного использования научных и технических спецов, унаследованных от капитализма, несмотря на то, что они неизбежно были заражены буржуазными идеями и привычками. Особой заботой лидеров советской науки было плачевное состояние физики. Поэтому, с благословения Коммунистической партии и правительства, самые выдающиеся и перспективные молодые теоретики страны были на несколько лет собраны в Ленинграде для обучения в аспирантуре, а затем после защиты кандидатских диссертаций отправлены в Западную Европу на стажировку на один или два года.

Зачем новоиспеченных кандидатов наук надо было посылать еще и на стажировку? Дело в том, что к 1920-м годам физика стала столь сложна, что для полного овладения ею уровня кандидата наук (Ph.D — доктора философии по американскому стандарту) было уже недостаточно. В целях содействия повсеместному повышению квалификации на Западе была учреждена система специальных стипендий, финансируемая в основном фондом Рокфеллера (от доходов капиталистических нефтяных компаний). Каждый, даже ревностный русский марксист, мог бороться за эту стипендию. Победителя называли «стипендиат постдок» или просто «постдок».

Почему именно в Западную Европу? Потому, что в 20-х годах она являлась Меккой теоретической физики, местом жительства почти всех ведущих мировых физиков-теоретиков. Советские лидеры, отчаян-

но пытающиеся переместить теоретическую физику из Западной Европы в СССР, не имели другого выбора, кроме как послать на стажировку своих молодых теоретиков, несмотря на всю опасность идеологической заразы.

Среди всех молодых советских теоретиков, проделавших путь в Ленинград, затем в Западную Европу и обратно в СССР, Лев Давидович Ландау окажет, пожалуй, наибольшее влияние на развитие физики. Родившись в 1908 г. в обеспеченной еврейской семье (его отец был инженером-нефтяником в Баку, расположенном на берегу Каспийского моря), он в возрасте 16 лет поступил в Ленинградский университет и закончил его в 19 лет. После всего лишь двухлетнего обучения в аспирантуре Ленинградского Физико-технического института Ландау защитил кандидатскую диссертацию и был послан в Западную Европу, где провел 18 месяцев в 1929–1930 гг., путешествуя между знаменитыми центрами теоретической физики Швейцарии, Германии, Дании, Англии, Бельгии и Голландии.

Проходивший стажировку тогда же в Цюрихе уроженец Германии Рудольф Пайерлс позже писал: «Я живо помню то огромное впечатление, которое произвел на нас Ландау, впервые появившись в группе Вольфганга Паули в Цюрихе в 1929 г. ... Не потребовалось много времени, чтобы обнаружить глубину его понимания современной физики и опыт в решении фундаментальных проблем. Он редко вчитывался в детали теоретической работы, а лишь внимательно проглядывал ее, чтобы увидеть, представляет ли интерес рассматриваемая проблема, и если да, то каков подход автора к ее решению. Затем он сам принимался за вычисления, и если его ответ совпадал с приводимым автором, работа получала одобрение». Пайерлс и Ландау стали лучшими друзьями.

Высокий и худощавый, чрезмерно требовательный к себе и другим, Ландау сокрушался, что не родился на несколько лет раньше. Он считал, что золотой век физики пришелся на 1925–1927 гг., когда де Бройль, Шредингер, Гейзенберг, Бор и другие создавали новую квантовую механику: родился Ландау ранее, он смог бы принять в этом участие. «Все хорошенькие девушки уже замужем, все интересные задачи уже решены, и мне не нравятся те, что остались», — заявил он как-то в минуту отчаяния в 1929 г. в Берлине. Однако фактически изучение следствий из законов квантовой механики и теории относительности только начиналось, и эти следствия сулили еще немало поразительных сюрпризов: структура атомных ядер, атомная энергия, черные дыры и их испарение, сверхтекучесть, сверхпроводимость, транзисторы, лазеры, ЯМР-спектроскопия ... И Ландау, несмотря на

5. Схлопывание неизбежно



Слева: Лев Ландау в студенческие годы в Ленинграде в середине 1920-х. *Справа:* Студенческие забавы Ландау с друзьями студентами-физиками Георгием Гамовым и Евгенией Канегиессер во время обучения в Ленинграде, около 1927 г. На самом деле Ландау никогда не умел играть ни на одном музыкальном инструменте. [Слева: предоставлено Визуальным архивом Эмилио Сегре Американского института физики из коллекции Маргарет Бор. Справа: предоставлено Библиотекой Конгресса]

свой пессимизм, станет центральной фигурой в увлекательном поиске этих следствий.

После возвращения в Ленинград в 1931 г. Ландау, будучи ревностным марксистом и патриотом, исполнился решимости посвятить свою карьеру перемещению центра современной теоретической физики в Советский Союз. Как мы увидим в последующих главах, он в этом необычайно преуспел.

Вскоре после возвращения Ландау опустил сталинский «железный занавес», сделавший дальнейшие путешествия на Запад практически невозможными. Георгий Гамов, соученик Ландау по Ленинграду, позже вспоминал: «Русская наука стала еще одним из видов оружия, направленным на борьбу с миром капитализма. Так же как Гитлер делил науку и искусство на еврейские и арийские, Сталин ввел понятия капиталистической и пролетарской науки. (Стало) ... преступным для русских ученых «общаться» с учеными из капиталистических стран».

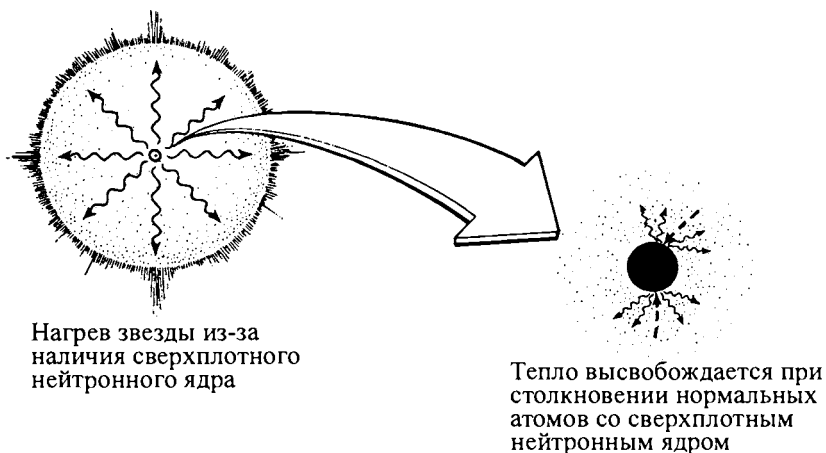
Политический климат из плохого стал ужасным. В 1936 г. Сталин, уже убивший 6 или 7 миллионов крестьян и кулаков (землевладельцев)

в ходе насильственной коллективизации в сельском хозяйстве, организовал продолжавшиеся в течение нескольких лет чистки среди политических и интеллектуальных лидеров, чистки, называемые теперь «Великим террором». Во время репрессий были расстреляны почти все члены первоначального ленинского Политбюро, расстреляны или пропали без вести высшие командиры Советской Армии, 50 из 71 членов Центрального Комитета Коммунистической партии, большинство советских послов в зарубежных странах, премьер-министры и главы правительств других, «нерусских» советских республик. На нижних уровнях общества примерно 7 миллионов человек были арестованы и посажены в тюрьмы, 2,5 миллиона человек погибло — половину из них составляли представители интеллигенции, включая большое число ученых, а иногда и целиком исследовательские группы. Советская биология, генетика и сельскохозяйственная наука были полностью разгромлены.

В конце 1937 г. Ландау, теперь лидер в области теоретической физики Москвы, почувствовал на себе жаркое дыхание приближающихся репрессий. В панике он бросился искать защиты. Один из возможных путей защиты состоял в том, чтобы поставить себя, как замечательного ученого, в фокус общественного внимания, и потому он обратился к поиску таких научных идей, которые смогли бы вызвать заметный всплеск интереса, как на Востоке, так и на Западе. Его выбор остановился на идее, над которой он размышлял с начала 30-х годов, — идее о том, что «нормальные» звезды, такие как Солнце, могут содержать в центре нейтронные звезды, или *нейтронные ядра*, как назвал их Ландау.

* * *

У Ландау были следующие основания так полагать: Солнце и другие нормальные звезды сдерживают сжимающие силы собственной гравитации с помощью термического (обусловленного теплом) давления. Излучив тепло и свет в космос, Солнце должно охладиться, уменьшиться в размерах и умереть примерно через 30 млн лет, если только не найдется иного способа восполнить теряемое им тепло. Поскольку в 1920–1930-х годах уже существовали неоспоримые геологические свидетельства того, что на Земле в течение миллиарда лет и более поддерживалась примерно постоянная температура, Солнце *должно* было как-то восполнять теряемое ей тепло. Артур Эддингтон в середине 20-х верно предположил, что новое тепло могло возникать в ходе ядерных реакций, в которых один тип атомных ядер превращается



5.4. Сценарий Льва Ландау, объясняющий происхождение энергии, нагревающей нормальную звезду. Звездное тепло поступает от сверхплотного нейтронного ядра (слева). Тепло выделяется, когда нормальные атомы (штриховые стрелки) захватываются нейтронным ядром (справа)

в другой, — то, что теперь называют *ядерным распадом и термоядерным синтезом*. Однако детали этих процессов к 1937 г. еще не были разработаны настолько, чтобы физики смогли утверждать, что все это способно работать. С этой точки зрения «нейтронные ядра» Ландау оказались очень привлекательной альтернативой.

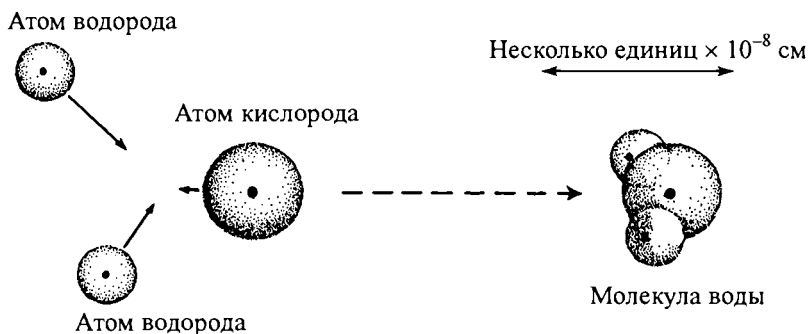
Так же как Цвикки мог представить себе подпитку сверхновой энергией, освобождаемой при схлопывании нормальной звезды, так и Ландау мог предположить, что Солнце и другие нормальные звезды питаются энергией, высвобождающейся, когда их атомы один за другим захватываются нейтронным ядром (рис. 5.4).

Захват атома нейтронным ядром во многом похож на падение камня с большой высоты на цементную плиту: гравитация тянет камень вниз, ускоряя его до большой скорости, и когда он ударяется о плиту, его огромная энергия движения может раздробить камень на тысячи осколков. Точно так же, рассуждал Ландау, гравитация должна сильно ускорять и атомы, падающие на нейтронное ядро звезды. Когда такой атом врывается в ядро, эта разрушительная остановка преобразует его гигантскую энергию движения (энергию, эквивалентную 10 процентам его массы) в тепло. В таком сценарии конечным источником солнечного тепла является рост гравитации его нейтронной сердцевины; и так же, как и в случае сверхновых Цвикки, гравитация ядра обеспечивает 10-процентную эффективность преобразования массы падающих атомов в тепло.

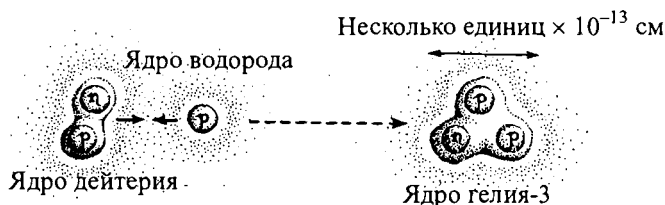
Сравнение ядерного и обычного горения

Обычное горение — это химическая реакция. В химических реакциях атомы соединяются в молекулы, атомы делят между собой электронные облака, которые и скрепляют молекулы. Ядерное горение — это ядерная реакция. В ядерном горении атомные ядра соединяются вместе, синтезируя (термоядерный синтез) более массивные атомные ядра, которые скрепляются ядерными силами.

Следующая диаграмма показывает пример обычного горения: горение водорода с образованием воды (взрывное сильное горение, которое используется в некоторых ракетах для выведения грузов в космос). Два водородных атома объединяются с атомом кислорода и образуют молекулу воды. В молекуле воды атомы водорода и кислорода делят электронные облака между собой, но атомные ядра существуют отдельно.



Следующая диаграмма показывает пример ядерного горения: слияние ядра дейтерия («тяжелый водород») и обычного ядра водорода с образованием ядра гелия-3. Это одна из реакций синтеза, которая, как теперь известно, питает Солнце и другие звезды и дает энергию водородным бомбам (Глава 6). Ядро дейтерия содержит один нейтрон и один протон, связанные ядерной силой, ядро водорода состоит из единственного протона; ядро гелия-3 возникшее при слиянии, содержит один нейтрон и два протона.



Распад ядерного топлива (Врезка 5.3), в отличие от захвата атомов нейтронным ядром звезды (рис. 5.4), может преобразовать в тепло лишь несколько десятых массы исходного ядерного горючего. Другими словами, источник тепла Эддингтона (ядерная энергия) является пример-

5. Схлопывание неизбежно

но в 30 раз менее мощным, чем источник Ландау (гравитационная энергия).⁵

В действительности в 1931 г. Ландау разработал более примитивную версию своей идеи нейтронного ядра. Однако тогда нейтрон еще не был открыт, и устройство атомного ядра оставалось загадкой: поэтому энергия захвата атома ядром звезды в модели 1931 г. высвобождалась в ходе совершенно умозрительного процесса, основанного на (неверном) предположении, согласно которому законы квантовой механики в атомном ядре могут нарушаться. Теперь, через пять лет после открытия нейтрона, когда начали понимать свойства атомного ядра, Ландау мог сделать свою идею гораздо более точной и убедительной. Представляя ее миру с рекламной помпой, он мог отразить натиск сталинских репрессий.

* * *

В конце 1937 г. Ландау написал работу, описывающую идею нейтронного звездного ядра; чтобы привлечь к ней максимальное общественное внимание, он предпринял серию необычных шагов. Он направил ее в журнал *Доклады Академии наук СССР* для издания на русском языке, параллельно английский вариант статьи отослал тому же знаменитому западному физическому, к которому апеллировал Чандрасекар, когда на него напал Эддингтон, — Нильсу Бору в Копенгаген. (Бор, как почетный член Академии наук СССР, был более или менее приемлем в качестве авторитета, даже во время Великого террора.) Вместе с рукописью Ландау послал Бору следующее письмо:

5 ноября 1937, Москва

Дорогой мистер Бор!

Я прилагаю написанную мной статью о звездной энергии. Если Вам покажется, что в ней есть физический смысл, я прошу представить ее к публикации в *Nature*. Если это не доставит Вам много хлопот, я был бы очень рад узнать Ваше мнение об этой работе.

С глубокой благодарностью.

Ваш Л.Ландау

⁵ Это может показаться удивительным тем, кто думает, что ядерные силы гораздо мощнее, чем гравитационные. В действительности ядерная сила мощнее, лишь когда в вашем распоряжении имеются только несколько атомов или атомных ядер. Но когда у вас несколько солнечных масс, состоящих из атомов (10^{37} атомов) или более, общая гравитационная сила всех атомов может стать сокрушительной по сравнению с их ядерными силами. Как мы увидим позже, этот простой факт гарантирует, в конце концов, что огромная гравитация умирающей массивной звезды превозмогает отталкивание атомных ядер и сжимает их, образуя черную дыру.

Nature (Природа) — британский научный журнал, который быстро публикует сообщения об открытиях во всех областях науки и который имеет один из самых больших тиражей в мире среди серьезных научных журналов.

У Ландау были высокопоставленные друзья, достаточно высокопоставленные, чтобы как только стало известно о том, что Бор одобрил статью и рекомендовал ее для публикации в *Nature*, ему была послана телеграмма от редакции газеты *Известия* (одной из двух самых влиятельных газет в СССР, она была органом Советского правительства). Телеграмма, посланная 16 ноября 1937 г., гласила:

«Пожалуйста, проинформируйте нас о Вашем мнении о работе профессора Ландау. Телеграфируйте нам, пожалуйста, Ваше краткое заключение.

Редакционная коллегия газеты *Известия*»

Бор, видимо, слегка озадаченный и обеспокоенный подобным запросом, ответил из Копенгагена в тот же день:

«Новая идея профессора Ландау о нейтронных ядрах массивных звезд в высшей мере превосходна и многообещающа. Я буду счастлив послать краткую характеристику этой работы и других исследований Ландау. Пожалуйста, проинформируйте меня, для какой цели требуется знать мое мнение.

Бор»

Редакция *Известий* откликнулась в том духе, что они собираются опубликовать оценку Бора в газете. Это было действительно сделано 23 ноября в статье, описывающей и восхваляющей идею Ландау:

«... Эта работа профессора Ландау вызвала огромный интерес среди советских физиков: его смелая идея дает новую жизнь одному из самых важных течений в астрофизике. Есть все основания считать, что новая гипотеза Ландау окажется правильной и приведет к решению целой серии нерешенных астрофизических проблем. ... Необычайно лестную оценку работе этого советского ученого [Ландау] дал Нильс Бор, сказавший, что «новая идея Л.Ландау превосходна и многообещающа».

Однако этой кампании оказалось недостаточно для спасения Ландау. Рано утром 28 апреля 1938 г. в его квартире раздался стук в дверь, и его увезли в казенном черном лимузине, а его невеста Кора в шоке наблюдала за этим, стоя в дверях. Судьба, обрушившаяся на многих других, теперь стала и судьбой Ландау.

Лимузин доставил Ландау в одну из печально известных московских политических тюрем, Бутырку. Здесь ему сказали, что его деятельность в качестве немецкого шпиона раскрыта и ему придется за это расплачиваться. То, что эти обвинения были нелепы (Ландау,

5. Схлопывание неизбежно

еврей, преданный марксист, шпионящий в пользу Германии?!), никого не смущало; в сталинской России мало кто узнавал настоящую причину ареста, хотя в случае с Ландау причина стала известна после открытия архивов КГБ. В разговоре с коллегами он критиковал Советское правительство и Коммунистическую партию за методы организации научных исследований и массовые аресты 1936–1937-х годов, которые сопровождали Великий террор. Такая критика расценивалась как «антисоветская деятельность» и могла легко привести критикующего в тюрьму.

Ландау повезло. Его заключение продлилось лишь год, и он пережил его, хотя и с трудом. Его отпустили в апреле 1939 г. после того, как Петр Капица, самый известный советский физик 30-х годов, обратился непосредственно к Молотову и Сталину, уверив их, что Ландау и только Ландау среди всех советских физиков-теоретиков в состоянии разрешить загадку происхождения сверхтекучести.⁶ (Явление сверхтекучести было открыто в лаборатории Капицы и независимо Дж.Ф.Алленом и А.Д.Майзнером в Кембридже (Англия), и если бы его смогли объяснить советские ученые, это бы вдвойне доказало мощь советской науки.)

Ландау вышел из тюрьмы истощенным и совершенно больным. В дальнейшем он восстановил свои умственные и физические силы, разрешил загадку сверхтекучести, используя законы квантовой механики, и получил Нобелевскую премию за свое решение. Но его дух был сломлен. В дальнейшем он уже никогда не сможет противостоять даже малейшему давлению со стороны властей.

Оппенгеймер

В Калифорнии Роберт Оппенгеймер (коллега Фрица Цвикки по физическому факультету, впоследствии возглавивший американский проект создания атомной бомбы) имел обыкновение внимательно прочитывать каждую новую статью, опубликованную Ландау. И потому работа Ландау о нейтронных ядрах в февральском выпуске *Nature* сразу же привлекла его внимание. Идеи Фрица Цвикки о нейтронных звездах как источнике энергии были лишь абстрактными, умозрительными, сырыми рассуждениями. Нейтронные же ядра Ландау как носители энергии обычных звезд заслуживали самого пристального внимания. Может ли Солнце иметь такое ядро? Оппенгеймер пообещал себе ответить на этот вопрос.

⁶ Сверхтекучесть представляет собой полное отсутствие вязкости (внутреннего трения), которое наблюдается в некоторых жидкостях при их охлаждении до температуры нескольких градусов выше абсолютного нуля, т. е. примерно до минус 270°C.

Стиль исследования Оппенгеймера в корне отличался от того, с чем мы уже сталкивались в этой книге. Если Бааде и Цвикки работали вместе как равноправные коллеги, и их талант и знания взаимодополняли друг друга, а Чандрасекар и Эйнштейн работали в основном в одиночестве, то Оппенгеймер с энтузиазмом работал в окружении большого числа студентов. И если Эйнштейн страдал, когда ему приходилось преподавать, то Оппенгеймер расцветал, обучая других.

Как и Ландау, Оппенгеймер ездил для обучения в Западную Европу — Мекку теоретической физики и, как и Ландау, Оппенгеймер после возвращения домой старался пересадить теоретическую физику из Европы в свою родную страну.

Ко времени возвращения в Америку Оппенгеймер успел приобрести столь громкую репутацию, что получил приглашение на преподавательскую работу от десятка американских университетов, включая Гарвард и Калтех, а также двух европейских. Среди других предложений одно исходило от Калифорнийского университета в Беркли, где теоретической физики не было совсем. «Я побывал в Беркли, — вспоминал потом Оппенгеймер, — и подумал, что хотел бы остаться здесь, потому что это настоящая пустыня». В Беркли он мог создать нечто совершенно свое. Однако, опасаясь последствий интеллектуальной изоляции, Оппенгеймер принял сразу два предложения — Беркли и Калтеха. Осень и зиму он будет проводить в Беркли, а весну — в Калтехе. «Я поддерживал связь с Калтехом. <...> Это было место, где я мог бы проверять, не слишком ли я оторвался от земли, и мог бы узнавать о вещах, не нашедших адекватного отражения в литературе».

Поначалу Оппенгеймер как преподаватель слишком спешил, был нетерпелив, излишне требователен к студентам. Он не понимал, как мало они еще знают, не мог опуститься до их уровня. Его первая лекция в Калтехе весной 1930 г. была демонстрацией силы — мощная, элегантная, глубокая. По окончании лекции, когда зал опустел, оставшийся в аудитории Толман (химик, ставший физиком, близкий друг Оппенгеймера) вернул его на землю: «Ну хорошо, Роберт, — сказал он, — это было прекрасно, но, черт возьми, я не понял ни слова!»

Но Оппенгеймер быстро учился. Уже в первый год аспиранты и постдоки со всей Америки стали стекаться в Беркли, чтобы изучать физику под его руководством, а еще через несколько лет он превратил Беркли в место даже более предпочтительное для стажировки молодых физиков-теоретиков, чем Европа.

Один из постдоков Оппенгеймера — Роберт Сербер потом так описывал их манеру совместной работы: «Оппи (под таким прозвищем Оппенгеймер был известен среди студентов Калтеха) был быстр, не-



Роберт Сербер (слева) и Роберт Оппенгеймер (справа) за обсуждением физических проблем, около 1942 г. [Предоставлено Информационным агентством США]

терпелив, обладал острым языком и первое время имел репутацию преподавателя, терроризировавшего студентов. Но спустя пять лет, приобретя некоторый опыт, он смягчился (если верить его первым студентам). Его курс [квантовой механики] был настоящим достижением в области преподавания. Он передал своим студентам ощущение красоты логических построений физики и заботу о ее дальнейшем развитии. Почти все прослушали его курс более одного раза, и порой Оппи было трудно отговорить студентов приходить в третий или четвертый раз <...>

Способ работы Оппи со студентами был довольно оригинален. В его группу входило от 8 до 10 аспирантов и примерно полдюжины постдоков. Он встречался с ними один раз в день в своем кабинете. Незадолго до назначенного времени члены группы набивались в кабинет и рассаживались на столах, стульях или просто стояли вдоль стен. Входил Оппи и последовательно с каждым обсуждал его задачу исследований,

в то время как другие внимательно слушали и давали свои комментарии. Все были вовлечены в широкий круг тем. Оппенгеймер интересовался буквально всем, вводились и сосуществовали все новые и новые направления. В течение такой встречи они могли обсуждать электродинамику, космические лучи, астрофизику и ядерную физику».

Каждую весну Оппенгеймер набивал свой открытый автомобиль книгами и бумагами, сажал нескольких учеников на откидные сидения и переезжал в Пасадену. «Мы не о чем не волновались, оставляя наши дома и квартиры в Беркли, — рассказывал Сербер, уверенные, что всегда сможем найти коттедж с садом в Пасадене за двадцать пять долларов в месяц».

Для каждой заинтересовавшей его задачи Оппенгеймер выбирал аспиранта или постдока, который должен был детально в ней разобраться. Для решения проблемы Ландау — вопроса о том, может ли нейтронная звезда поддерживать горячим наше Солнце, он выбрал Сербера.

Оппенгеймер и Сербер быстро поняли, что если бы в центре Солнца располагалась нейтронное ядро, и если бы его масса составляла большую часть массы Солнца, то мощная гравитация этого ядра притягивала бы внешние слои гораздо сильнее, делая размеры Солнца гораздо меньше, чем на самом деле. Поэтому идея Ландау о нейтронных ядрах могла работать только для звезд, гораздо более массивных, чем Солнце.

«Насколько *малой* может быть масса нейтронной сердцевин?» Такой вопрос вынуждены были задать себе Оппенгеймер и Сербер. «Какова *минимально* возможная масса нейтронного ядра?» Обратите внимание, что этот вопрос является *противоположным* по отношению к вопросу, критическому для существования черных дыр; чтобы знать, возможно ли образование черной дыры, требуется знать *максимальную* массу нейтронной звезды. Хотя Оппенгеймер еще не проникся важностью вопроса о максимальной массе, однако теперь он знал, что вопрос о минимуме массы нейтронной сердцевин — центральный для идеи Ландау.

В своей статье Ландау, также понимавший важность вопроса о минимальной массе нейтронного ядра, для ее оценки использовал некоторые физические законы. Оппенгеймер с Сербером тщательно проверили оценку Ландау. Они убедились, что Ландау действительно верно учел силы гравитационного притяжения внутри ядра. Он также правильно принял в расчет и вырожденное давление нейтронов сердцевин (давление, порождаемое клаустрофобным движением нейтронов, стиснутых в крошечных ячейках). Но он неверно учел ядерные

5. Схлопывание неизбежно

силы, с которыми нейтроны действуют друг на друга. Эти силы тогда еще не были вполне понятны, однако уже того уровня понимания было достаточно, чтобы Оппенгеймер и Сербер пришли к заключению, что вероятно (не абсолютно точно, но вероятно) не может существовать нейтронного ядра, легче $1/10$ массы Солнца. Если бы природе когда-либо удалось собрать нейтроны в ядро легче этой величины, его гравитация оказалась бы слишком слабой, чтобы удерживать их вместе, внутреннее давление привело бы к взрыву.

На первый взгляд, это не отвергало идею о том, что внутри Солнца может находиться нейтронная сердцевина — ядро в $1/10$ солнечной массы, которое допускалось оценками Оппенгеймера и Сербера, было достаточно легким, чтобы спрятаться внутри Солнца, не меняя существенно его поверхностные свойства (не изменяя то, что мы видим). Однако дальнейшие вычисления, учитывающие баланс между притяжением гравитации ядра и давлением окружающего газа, показали что эффекты, порождаемые такой сердцевиной, не спрятать. Вокруг нее должна располагаться оболочка из вещества, подобного веществу белого карлика массой примерно в одну солнечную, а вокруг такой оболочки лишь малая часть нормального газа; в результате Солнце не могло бы выглядеть таким, каким мы его в действительности наблюдаем. Поэтому Солнце не может содержать внутри нейтронное ядро, и энергия, поддерживающая его жар, должна поступать откуда-то еще.

Откуда? Тогда же, когда Оппенгеймер и Сербер проводили свои вычисления в Беркли, Ганс Бете в Корнельском университете в Итаке (штат Нью-Йорк) и Чарльз Критчфилд в университете Джорджа Вашингтона в Вашингтоне (округ Колумбия), используя разработанные незадолго до того законы ядерной физики, аккуратно показали, что ядерное горение (термоядерный синтез) может поддерживать горение Солнца и других звезд. Эддингтон был прав, а Ландау — нет (по крайней мере, в отношении Солнца и многих других звезд). (Однако с позиций начала 1990-х годов кажется, что для некоторой части гигантских звезд механизм Ландау действительно может работать.)

Оппенгеймер и Сербер, конечно, не подозревали, что работа Ландау была отчаянной попыткой избежать тюрьмы, а возможно, и смерти. Потому 1 сентября 1938 г., когда Ландау томился в Бутырской тюрьме, они отправили критическую статью в журнал *Physical Review*. Поскольку Ландау был достаточно крупным ученым, они воздержались от резких выпадов и писали достаточно дружелюбно: «Оценки Ландау приводят к величине в $0,001$ солнечной массы для предельной [минимальной] массы [нейтронного ядра]. Эта оценка оказывается неверной ... [Ядерные силы] которые, как часто полагают, имеют тип

спинового обмена, предотвращают существование [нейтронных] ядер для звезд с массами, сравнимыми с массой Солнца».

* * *

Нейтронные ядра Ландау и нейтронные звезды Цвикки — в действительности одно и то же. Нейтронное ядро — это не что иное, как нейтронная звезда, каким-то образом оказавшаяся внутри обычной звезды. Это стало ясно Оппенгеймеру, и теперь, начав думать о нейтронных звездах, он неуклонно стал подступать к проблеме, за решение которой должен был (но не смог) приняться Цвикки. Какова же дальнейшая судьба массивных звезд, когда они истощают ядерное горючее, которое, согласно Бете и Критчфилду, поддерживает их горячими? Какие останки при этом создаются: белые карлики? нейтронные звезды? Черные дыры? Что-то иное?

Вычисления Чандрасекара неопровержимо показали, что звезды, меньшие, чем 1,4 солнечной массы, должны стать белыми карликами. Цвикки утверждал, что, по крайней мере, некоторые более массивные звезды взрываются, формируя нейтронную звезду, порождая в этом процессе сверхновую. Был ли Цвикки прав? И все ли массивные звезды умирают таким образом, избавляя в результате Вселенную от черных дыр?

Одной из сильных сторон Оппенгеймера как теоретика была способность, рассматривая трудную проблему, безошибочно отсекал осложнения, выделяя только центральное, определяющее все звено. Несколько лет спустя, этот талант сможет найти блестящее воплощение, когда Оппенгеймер станет руководителем американского проекта создания атомной бомбы. Теперь же, в борьбе за понимание характера смерти звезд, этот талант подсказал ему отбросить все нагроможденные Цвикки сложности — детали взрыва сверхновых, трансформацию обычного вещества в нейтронное вещество, высвобождение огромной энергии и, возможно, источник энергии сверхновых и космических лучей. Все это было неважно для ответа на вопрос о *финальной судьбе* звезды. Единственное, что было важно, — определить, какую максимальную массу может иметь нейтронная звезда. Если эта масса может быть любой (кривая *B* на рис. 5.3), то черные дыры не образуются никогда. Если же существует максимально возможная масса нейтронной звезды (кривая *A* на рис. 5.3), то звезда, имеющая массу, большую максимальной, умирая, могла бы образовать черную дыру.

Поставив с предельной ясностью вопрос о максимальной массе нейтронной звезды, Оппенгеймер методично и четко приступил к его

5. Схлопывание неизбежно

решению. Как у него уже вошло в практику, он работал в сотрудничестве с учеником, в данном случае — с молодым человеком по имени Георгий Волков. История поисков Оппенгеймера и Волкова ответов на вопросы о массе нейтронных звезд, а также той определяющей роли, которую сыграл в этих исследованиях друг Оппенгеймера в Калтехе Ричард Толман, рассказана во Врезке 5.4. Эта история иллюстрирует подход к исследованиям Оппенгеймера, а также показывает несколько стратегий, по которым могут действовать физики, когда ясно понимают *некоторые*, но не *все* физические законы, управляющие явлением. В данном случае Оппенгеймер хорошо понимал законы квантовой механики и общей теории относительности, но ни он, ни кто-либо другой тогда еще хорошо не понимал ядерных сил.

Несмотря на слабое знание ядерных сил, Оппенгеймер и Волков смогли определенно показать (рис. 5.4), что существует максимальная масса нейтронных звезд и *она лежит в пределах между половиной и несколькими солнечными массами*.

В 1990-х годах, после 50 лет дополнительного изучения, мы знаем, что Волков и Оппенгеймер были правы; нейтронные звезды действительно имеют предел массы, и он лежит между 1,5 и 3 солнечными массами, тот же интервал, что и в оценках Волкова и Оппенгеймера. Более того, с 1967 г. астрономы обнаружили сотни нейтронных звезд, массы некоторых из них были измерены с большой точностью. Все измеренные массы близки к 1,4 солнечной, и мы не знаем почему.

Врезка 5.4

Рассказ об Оппенгеймере, Волкове и Толмане: поиск масс нейтронных звезд

Приступая к сложному анализу, полезно получить некоторую опору, начиная с грубой оценки «порядка величины», вычисления, точного в пределах некоторого коэффициента, скажем, 10. В соответствии с этим эмпирическим правилом Оппенгеймер и начал атаку на задачу о том, могут ли нейтронные звезды иметь максимальную массу, с помощью грубого, всего на несколько страниц, вычисления. Результат заинтриговал: он нашел максимальную массу, равную 6 солнечным для любой нейтронной звезды. Если бы детальное вычисление дало тот же самый результат, то Оппенгеймер смог бы заключить, что звезды, более тяжелые, чем 6 Солнц, умирают с образованием черных дыр.

«Детальное вычисление» означало выбор массы гипотетической нейтронной звезды и поиск ответа на вопрос: может ли для такой массы нейтронное давление в звезде уравновесить гравитацию. Если баланс может быть достигнут, то выбранная масса нейтронной звезды

возможна. Требовалось перебрать одну массу за другой и для каждой получить ответ о балансе между давлением и гравитацией. Это сделать гораздо сложнее, чем кажется с первого взгляда, поскольку давление и гравитация должны уравновесить друг друга везде внутри звезды. Однако подобные вычисления предпринял однажды Чандрасекар, когда анализировал белые карлики (расчет, выполненный с использованием калькулятора «Брауншвайгер», принадлежащего Артуру Эддингтону, с Эддингтоном, заглядывающим через плечо, — глава 4).

Оппенгеймер мог следовать в своих вычислениях нейтронных звезд методу расчета белых карликов Чандрасекара только, сделав два принципиальных изменения. Во-первых, в белом карлике давление производится электронами, а в нейтронной звезде нейтронами, таким образом, *уравнение состояния* (соотношение между давлением и плотностью) будет другим. Во-вторых, в белом карлике гравитация достаточно слаба и поэтому может быть описана достаточно хорошо как законами Ньютона, так и общей теорией относительности Эйнштейна: эти два описания дают почти одинаковые предсказания, поэтому Чандрасекар выбрал более простое ньютоновское описание. В нейтронной же звезде, с ее намного меньшей окружностью, гравитация настолько сильна, что использование законов Ньютона могло бы вызвать серьезные ошибки, таким образом, Оппенгеймер должен будет описывать гравитацию согласно законам общей теории относительности Эйнштейна⁷. Кроме этих двух изменений — новое уравнение состояния (нейтронное давление вместо электронного) и новое описание гравитации (эйнштейновское вместо ньютоновского) — вычисление Оппенгеймера было примерно таким же, как у Чандрасекара.

На этой стадии Оппенгеймер был готов поручить детальные вычисления студенту. Он выбрал Георгия Волкова, молодого человека из Ванкувера, эмигрировавшего из России в 1924 г.

Оппенгеймер объяснил Волкову задачу и сказал ему, что математическое описание гравитации, которое может понадобиться, можно найти в учебнике Ричарда Толмана «Относительность, термодинамика и космология». Уравнение состояния для нейтронного давления, однако, было более трудной проблемой, так как это давление вызывается ядерными силами (которыми нейтроны привлекают и отталкивают друг друга). Хотя ядерные силы начали уже хорошо понимать для плотностей атомных ядер, для плотностей в десять раз больших, с которыми нейтроны должны быть упакованы внутри массивной нейтронной звезды, такого понимания не было. Физики даже не знали, была ли ядерная сила при этих плотностях притягивающей или отталкивающей (привлекают или отталкивают друг друга нейтроны) и, таким образом, не было никакого способа узнать, уменьшает ли ядерная сила давление нейтронов или, напротив, увеличивает его. Но у Оппенгеймера был способ обойти эту неизвестность.

⁷ См. обсуждение в последнем разделе главы 1 («Характер физических законов») соотношения между различными описаниями законов физики и их областей применимости.

5. Схлопывание неизбежно

Предположите сначала, что ядерная сила не существует, — предположил Волкову Оппенгеймер. Тогда давление будет известно — это будет хорошо понятное нейтронное давление вырождения (давление производимое «клаустрофобным» движением нейтронов). Уравновесьте это нейтронное давление вырождения гравитацией, и из этого баланса вычислите структуры и массы, которые нейтронные звезды имели бы во Вселенной без ядерной силы. После этого попробуйте оценить, как изменится структура и масса звезд, если в нашей реальной Вселенной ядерная сила ведет себя тем или иным образом.

С такими четкими инструкциями трудно было промахнуться. Волкову, направляемому ежедневными консультациями с Оппенгеймером, с помощью книги Толмана потребовалось только несколько дней, чтобы получить общерелятивистское описание гравитации в нейтронной звезде. И понадобилось еще всего несколько дней, чтобы превратить известное уравнение состояния для вырожденного электронного давления в уравнение для давления нейтронов. Уравновесив давление гравитацией, Волков получил сложное дифференциальное уравнение, решение которого должно было рассказать ему о внутренней структуре нейтронных звезд. И тут он уперся в тупик. Как не пытался, Волков не мог решить это дифференциальное уравнение аналитически, чтобы получить формулу для структуры звезд, и как Чандрасекар для белых карликов, он был вынужден был решать его уравнение численно. Так же, как Чандрасекар потратил много дней в 1934 г., нажимая на клавиши калькулятора Эддингтона «Брауншвайгер», вычисляя аналогичную структуру белых карликов, Волков трудился большую часть ноября и декабря 1938 г., нажимая на клавиши калькулятора «Маршан».

Пока Волков давил на клавиши в Беркли, Ричард Толман в Пасадене решил выбрать другой путь: он предпочел все-таки попробовать получить формулы, описывающие структуру звезд, а не набор чисел, выданных калькулятором.

Единственная формула может заключать всю информацию, содержащуюся во многих таблицах чисел. Если бы он смог получить правильную формулу, она содержало бы одновременно структуры звезд в 1 солнечную массу, в 2 солнечных массы, в 5 солнечных масс — вообще для любой массы. Но даже с его блестящими математическими способностями Толман не смог найти решение уравнения Волкова в виде формул.

«С другой стороны, — по-видимому рассуждал Толман, — мы знаем, что правильное уравнение состояния в действительности не то, которым пользуется Волков. Волков игнорирует ядерные силы, а так как мы не знаем детально эту силу при высоких плотностях, мы не знаем и правильное уравнение состояния. Поэтому поставим вопрос иначе, не так как его ставит Волков. Спросим себя, как массы нейтронных звезд зависят от уравнения состояния. Предположим, что уравнение состояния очень 'жестко', т. е. что оно дает исключительно высокие давления, и попробуем определить, какие массы нейтронных звезд были бы в том случае. Затем предположим, что уравнение состояния очень 'мягкое', т. е. что оно дает исключительно низкие

давления, и зададимся вопросом о массах звезд в этом случае. В обоих случаях я подберу гипотетическое уравнение состояния в таком виде, для которого я смогу решить дифференциальное уравнение Волкова в виде формул. Хотя уравнение состояния, которое я использую, почти наверняка не будет правильным, мое вычисление все же еще даст мне общее представление относительно того, какими могли бы быть массы нейтронных звезд, если бы природа случайно выбрала жесткое уравнение состояния, и какими они могли бы быть в случае мягкого уравнения состояния».

19 октября Толман послал Оппенгеймеру длинное письмо, где описал некоторые из формул для структуры звезд и массы нейтронных звезд, которые он получил для некоторых гипотетических уравнений состояния. Приблизительно неделей позже Оппенгеймер отправился в Пасадену, чтобы в течение нескольких дней обсудить с Толманом этот проект. 9 ноября Толман написал Оппенгеймеру другое длинное письмо, с еще большим количеством формул. Тем временем Волков продвигался в своих упражнениях на клавишах калькулятора «Маршан». В начале декабря Волков закончил расчеты. Он построил численные модели для нейтронных звезд с массами 0,3; 0,6 и 0,7 солнечной массы и он нашел, что, если бы в нашей Вселенной не было бы никаких ядерных сил, то нейтронные звезды всегда бы имели массу меньшую, чем 0,7 солнечной массы.

Это было неожиданно! Грубая оценка Оппенгеймера, сделанная до начала расчетов Волкова, давала максимальный предел в 6 солнечных масс. Чтобы защитить массивные звезды от превращения в черные дыры, аккуратные вычисления должны были бы увеличить максимальную массу до сотни солнечных или еще больше. Вместо этого расчет сбросил предел еще ниже, до 0,7 солнечной массы.

Толман прибыл в Беркли, чтобы узнать больше подробностей. Пятьдесят лет спустя Волков с удовольствием вспоминал эту сцену: «Я помню восторг, с которым я рассказывал Оппенгеймеру и Толману то, что я сделал. Мы сидели на лужайке старого факультетского клуба в Беркли, и я, только закончивший аспирантуру, объяснял двум уважаемым джентльменам среди ярко-зеленой травы и высоких деревьев свои вычисления».

Теперь, когда они знали массы нейтронных звезд в идеализированной Вселенной без ядерной силы, Оппенгеймер и Волков были готовы оценить влияние ядерной силы. Здесьгодились формулы, которые так тщательно разработал Толман для различных гипотетических уравнений состояния. Из формул Толмана можно было примерно видеть, как изменилась бы структура звезды, если бы ядерная сила стала отталкивающей и, таким образом, сделала бы уравнение состояния более «жестким», чем то, которое использовал Волков, и как оно изменилось бы, если бы сила была притягивающей и уравнение состояния было бы более «мягким». В пределах диапазона правдоподобных ядерных сил изменения не были большими. Толман, Оппенгеймер и Волков пришли к заключению о том, что должна существовать предельная масса нейтронной звезды и что она должна лежать где-нибудь в пределах между половиной и несколькими солнечными массами.

Заключение Оппенгеймера и Волкова не могло удовлетворить таких людей, как Эддингтон и Эйнштейн, предавших черные дыры анафеме. Если верить Чандрасекару (а к 1938 г. большинство астрономов пришли к пониманию того, что ему следует верить) и если верить Волкову и Оппенгеймеру (а их трудно было опровергнуть), то ни в могиле белого карлика, ни в могиле нейтронной звезды массивная звезда упокоиться не может. Но есть ли вообще для тяжелой звезды какой-нибудь мыслимый способ избежать смерти в виде черной дыры? Да, есть, и даже два.

Во-первых, все массивные звезды, старея, могут терять так много вещества (например, срываемого с их поверхности мощными потоками излучения или ядерными взрывами), что уменьшают свою массу до величины меньшей предела в 1,4 солнечной массы, и поэтому попадают на кладбище белых карликов, или (если кто-то верит в механизм сверхновых Цвикки, а таких было мало) могут сбрасывать такое количество вещества в процессе взрыва сверхновой, что уменьшаются до такой величины, чтобы уместиться в могиле нейтронной звезды. Большинство астрономов в 40-х, 50-х и начале 60-х годов (если вообще задумывались на эту тему) разделяли подобную точку зрения.

Во-вторых, кроме кладбища белых карликов, нейтронных звезд и черных дыр, у массивных звезд могло бы существовать какое-нибудь четвертое кладбище, не известное в 30-е годы. Например, можно себе представить такое кладбище для звезд с промежуточным значением окружности между белыми карликами и нейтронными звездами, т. е. примерно в 1000 км. Сжатие звезды могло бы тогда прерваться на таком кладбище еще до того, как звезда станет настолько малой, чтобы образовать нейтронную звезду или черную дыру.

Если бы делу не помешала вторая мировая война и последовавшая за ней холодная война, Оппенгеймер со своими учениками или еще кто-нибудь скорее всего исследовали бы эту возможность и строго показали бы, что такого четвертого кладбища нет.

Однако вторая мировая война разразилась и поглотила энергию почти всех физиков-теоретиков мирового уровня; затем, после войны, разрушительные программы создания водородных бомб опять отодвинули сроки возвращения физиков к нормальным исследованиям. Наконец, в середине 50-х годов два физика, оставив свою работу в проектах по созданию водородной бомбы, обратились к тому, на чем остановились Оппенгеймер и его ученики. Это были Джон Арчибалд Уилер из Принстонского университета в Соединенных Штатах и Яков Борисович Зельдович в Институте прикладной математики в Москве — два выдающихся физика, которые будут главными фигурами в дальнейшем изложении.

Уилер

В марте 1956 г. Уилер несколько дней посвятил изучению статей Чандрасекара, Ландау, Оппенгеймера и Волкова. Он понял, что здесь еще оставалась загадка, которую стоило попробовать решить. Правда ли, что у звезды, более массивной, чем 1,4 Солнца, нет после смерти другого выбора, чем образовать черную дыру? «Из всех выводов общей теории относительности, касающихся структуры и эволюции Вселенной, этот вопрос о судьбе огромных масс вещества является наиболее интригующим», — писал вскоре после этого Уилер; и он взялся закончить начатое Чандрасекаром, Оппенгеймером и Волковым исследование звездных могил.

Чтобы уточнить стоящую перед ним задачу, Уилер дал аккуратную характеристику типа вещества, из которого должны состоять остывшие мертвые звезды. Он назвал его *веществом в конце термоядерной эволюции*, поскольку слово *термоядерный* приобрело популярность для обозначения реакций синтеза, дающих энергию ядерному горению в звезде и в водородной бомбе. Такое вещество должно было бы быть абсолютно холодным, с полностью выработанным ядерным горючим, так что не оставалось больше возможности извлечь из его ядер дополнительную энергию. Поэтому здесь вместо выражения «вещество в конце термоядерной эволюции» будет использоваться название «холодное мертвое вещество».

Уилер поставил перед собой задачу определить все объекты, которые могут быть сделаны из холодного неорганического вещества. Это могут быть малые объекты типа железных шариков, более тяжелые объекты, такие как мертвые железные планеты, и еще более тяжелые объекты: белые карлики, нейтронные звезды и какие-то другие типы холодных и мертвых объектов, допускаемых законами физики. Уилер хотел получить *полный* каталог холодных и мертвых объектов.

Уилер работал во многом подобно Оппенгеймеру — в окружении аспирантов и постдоков. Среди них для работы над деталями уравнения состояния холодного мертвого вещества, он выделил Б. Кента Гаррисона, сурового мормона из штата Юта. Уравнение состояния позволило бы детально описать, как возрастает давление вещества, если последовательно сжимать вещество, до больших и больших плотностей, или, что то же самое, как с увеличением плотности изменяется сопротивление сжатию.

Уилер был прекрасно подготовлен к тому, чтобы задать направление вычислениям Гаррисона уравнения состояния холодного мертвого вещества, поскольку был крупнейшим экспертом в области законов



Джон Арчибальд Уилер, около 1954 г. [Фото Блэкстона-Шелбурна, Нью-Йорк, предоставлено Дж.А.Уилером]

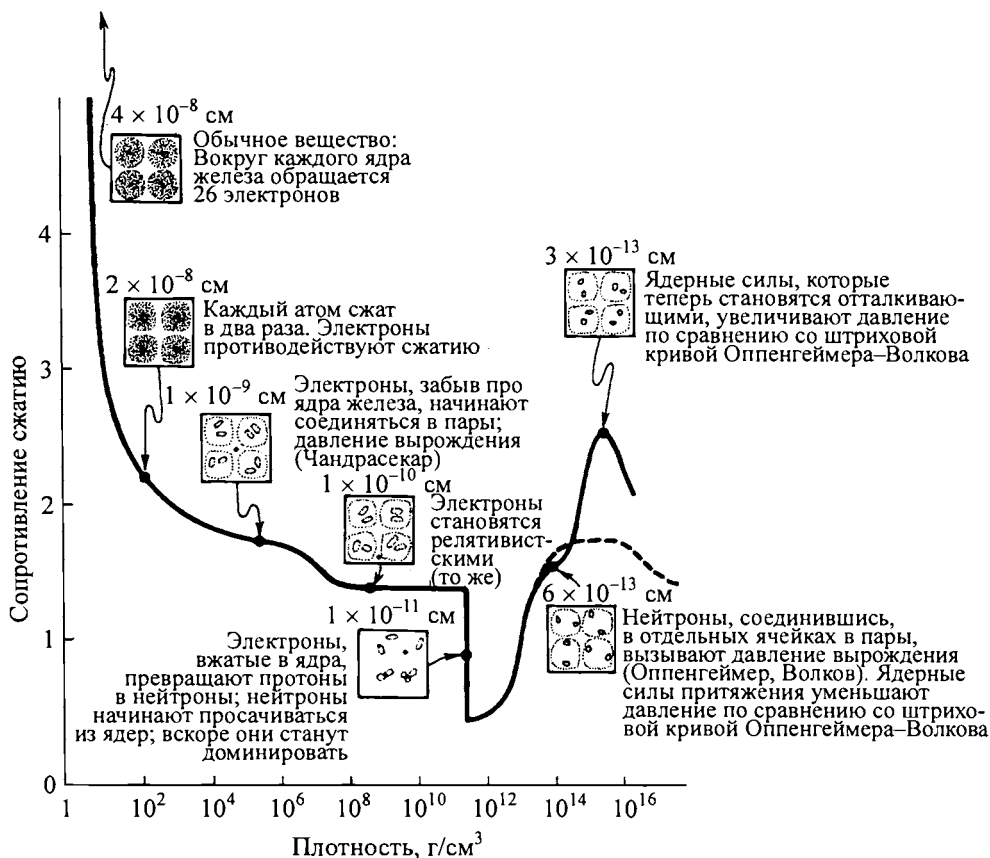
физики, управляющих структурой материи, законов квантовой механики и ядерной физики. В течение предшествующих двадцати лет он создал мощную математическую модель, описывающую поведение атомных ядер; вместе с Нильсом Бором он разработал законы атомного распада (деление на части тяжелых атомных ядер, таких как уран и плутоний, лежащее в основе атомной бомбы); он был также руководителем группы, разработавшей американскую водородную бомбу. Опираясь на свой опыт, он помог Гаррисону обойти все трудности анализа.

Результатом их анализа стало уравнение состояния холодного, мертвого вещества. При плотностях белых карликов это было то же уравнение состояния, что и использованное Чандрасекаром (глава 4); при плотностях нейтронной звезды оно совпадало с результатом Оппенгеймера и Волкова; при плотностях ниже плотности белых карликов и в промежутке между белыми карликами и нейтронными звездами оно было совершенно новым.

Врезка 5.5

Уравнение состояния Гаррисона—Уилера, описывающее холодное мертвое вещество

Рисунок внизу показывает уравнение состояния Гаррисона—Уилера. По горизонтали отложена плотность вещества. По вертикали — сопротивление сжатию (или адиабатический индекс, как обычно называют его физики) — увеличение давления в процентах, сопровождающее 1 %-ное увеличение плотности. В квадратах рядом с кривой показано то, что происходит с веществом на микроскопическом уровне при его сжатии от низких до высоких плотностей. Размер показанной области указан в сантиметрах сверху квадрата.



5. Схлопывание неизбежно

При нормальных плотностях холодное мертвое вещество состоит из атомов железа. Если бы оно состояло из атомов, имеющих более тяжелые ядра, то из него можно было бы извлечь энергию, расщепляя ядра до ядер железа в реакциях деления (как в атомной бомбе). Если же оно состояло бы из более легких атомов, то энергия могла бы выделяться при объединении ядер в ядра железа в реакциях термоядерного синтеза (как в водородной бомбе).

В форме железа вещество уже не может никаким образом высвободить ядерную энергию. Ядерные силы удерживают нейтроны и протоны в железных ядрах сильнее, чем в любых других видах атомных ядер.

При сжатии железа относительно его нормальной плотности 7,6 граммов на кубический сантиметр до 100, а затем до 1000 граммов на кубический сантиметр железо сопротивляется сжатию таким же образом, как и любой камень: электроны каждого атома реагируют на сжатие между электронами ближайших атомов «клаустрофобным» (вырожденным) движением. Сначала сопротивление огромно, не потому что отталкивающие силы особенно сильны, а, скорее потому, что начальное давление при малой плотности очень слабое. (Вспомните, что сопротивление сжатию есть увеличение давления, выраженное в процентах, которое сопровождает 1 %-ное увеличение плотности. Если давление слабое, то его небольшое увеличение приводит к огромному увеличению в процентах и, таким образом, дает огромное сопротивление. Затем, при более высоких плотностях, когда давление становится сильнее, большое увеличение давления порождает намного более скромное увеличение процента и, таким образом, дает более скромное сопротивление.)

Поначалу при сжатии холодного вещества электроны собираются вокруг железных ядер, формируя электронные облака, образованные электронными орбиталями. (На каждой орбитали фактически находятся два электрона, а не один. Эта тонкость была упущена в главе 4, но кратко обсуждается во Врезке 5.1.) С ростом сжатия каждая орбиталь и два ее электрона постепенно заключаются во все меньшую и меньшую ячейку пространства; клаустрофобные электроны препятствуют этому ограничению, становясь все более подобными волне, и развивают все более высокие скорости хаотических клаустрофобных движений («движения вырождения»; см. главу 4). Когда плотность достигает 105 (100000) граммов на кубический сантиметр, движение вырождения электронов и давление вырождения, которое им порождается, становятся настолько большими, что они полностью подавляют электрические силы, с которыми ядра притягивают электроны. Электроны больше не собираются вокруг железных ядер и полностью их игнорируют. Холодное неорганическое вещество, которое вначале было глыбой железа, теперь становится веществом, из которого сделаны белые карлики, а уравнение состояния становится тем уравнением, которое Чандрасекар, Андерсон и Стонер получили в начале 1930-х (рис. 4.3): с сопротивлением $5/3$ и затем с гладким переходом к $4/3$ для плотностей, приблизительно равных 10^7 граммов на кубический санти-

метр, когда скорости хаотических движений электронов приближаются к скорости света.

Переход от вещества белых карликов к веществу нейтронных звезд начинается, согласно вычислениям Гаррисона—Уилера, при плотности 4×10^{11} граммов на кубический сантиметр. Вычисления показывают несколько фаз перехода. В первой фазе электроны начинают вжиматься в атомные ядра, и их заглатывают протоны ядер, превращаясь в нейтроны. Вещество, потеряв, таким образом, часть электронов, поддерживающих давление, внезапно становится намного менее стойким к сжатию. Это вызывает резкий обрыв в уравнении состояния (см. диаграмму выше).

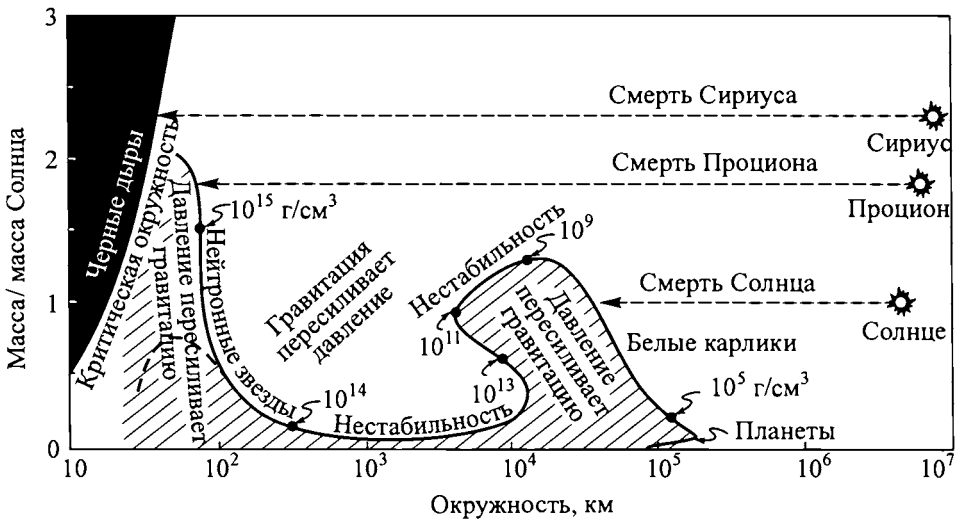
В процессе развития этой фазы сжатия атомные ядра становятся все более насыщенными нейтронами, что вызывает вторую фазу: нейтроны начинают просачиваться (выдавливаться) из ядер в междерное пространство, где еще осталось немного электронов. Эти просочившиеся нейтроны, как и электроны, противодействуют продолжающемуся сжатию собственным давлением вырождения. Это нейтронное давление вырождения прекращает обрыв в уравнении состояния, сопротивление сжатию возвращается и начинает увеличиваться. В третьей фазе, при плотности приблизительно между 10^{12} и 4×10^{12} граммов на кубический сантиметр, все пересыщенные нейтронами ядра полностью распадаются, т. е. разваливаются на отдельные нейтроны, образующие нейтронный газ, изученный Оппенгеймером и Волковым, с малой примесью электронов и протонов. С этого момента при повышении плотности уравнение состояния принимает вид уравнения состояния Оппенгеймера—Волкова нейтронных звезд (штриховая кривая на диаграмме, если ядерные силы игнорируются; сплошная кривая, если воспользоваться лучшим пониманием ядерных сил 1990-х).

* * *

Имея на руках это уравнение состояния холодного мертвого вещества, Джон Уилер попросил Масами Вакано, постдока из Японии, проделать то же, что сделал для нейтронных звезд Волков, а для белых карликов Чандрасекар: соединить уравнения состояния с уравнениями общей теории относительности, описывающими баланс гравитации и давления внутри звезды. Потом из этого соединения получить дифференциальное уравнение, описывающее структуру звезды, а затем численно решить это дифференциальное уравнение. Численные расчеты раскроют детали внутренней структуры всех холодных, мертвых звезд и, что самое важное, определят звездные массы.

Вычисления структуры отдельной звезды (распределение энергии, давления и гравитации внутри звезды) потребовали от Чандрасекара и Волкова многодневного напряженного труда, когда в 1930-х годах

5. Схлопывание неизбежно



5.5. Окружности (по горизонтали), массы (по вертикали) и плотности (обозначены на кривой) в центре холодных мертвых звезд в соответствии с расчетами М.Вакано, сделанными под руководством Дж. Уилера с использованием уравнения состояния. Сплошная линия — современная кривая, полученная по данным 1990-х годов и правильно учитывающая ядерные силы, т. е. при центральных плотностях, превышающих плотность атомного ядра (больше $2 \times 10^{14} \text{ г/см}^3$), штриховая линия — кривая, полученная Оппенгеймером и Волковым без учета ядерных сил

они били по кнопкам своих механических калькуляторов в Кембридже и Беркли. Тогда как Вакано в Принстоне в 50-х имел в своем распоряжении один из первых в мире цифровых компьютеров MANIAC (комнату набитую электронными лампами и проводами), который был сооружен в Принстонском институте передовых исследований для расчетов, связанных с созданием водородной бомбы. С помощью MANIAC Вакано мог «перемалывать» расчеты структуры каждого типа звезд менее чем за час.

Результаты вычислений Вакано показаны на рис.5.5. Этот рисунок представляет собой окончательный каталог холодных мертвых объектов и отвечает на все вопросы, поднимавшиеся ранее в этой главе.

На диаграмме рис.5.5 окружность звезды отложена по оси вправо, а ее масса — вверх. Каждая звезда с окружностью и массой, которые попадают в светлую область рисунка, имеет внутренние силы гравитации, превышающие давление, и потому гравитация звезды будет заставлять звезду сжиматься и перемещаться влево на этой диаграмме. Каждая звезда в заштрихованной области имеет давление, превосходящее гравитацию, и поэтому ее давление будет заставлять звезду расширяться при движении по диаграмме вправо. Лишь на границе

между заштрихованной и светлой областями гравитация и давление точно уравниваются, и, таким образом, граничная кривая представляет собой кривую холодных, мертвых звезд в состоянии равновесия давления и гравитации.

Начав двигаться вдоль *кривой равновесия*, мы будем последовательно проходить мертвые «звезды» все более высокой плотности. При наименьших плотностях (в нижней части рисунка) эти «звезды» — даже и не звезды, а холодные планеты из железа. (Когда Юпитер окончательно исчерпает свой внутренний источник радиоактивного тепла и остынет, хотя он и построен в основном из водорода, а не из железа, он будет, тем не менее, располагаться вблизи самой правой точки на кривой равновесия.) Более высокие плотности, чем у планеты, имеют белые карлики Чандрасекара.

Если, достигнув самой верхней точки кривой в области белых карликов (предел Чандрасекара в 1.4 солнечной массы⁸), начать затем двигаться в сторону еще больших плотностей, то мы неминуемо сталкиваемся с холодными мертвыми звездами, которые не могут существовать в природе, потому что они нестабильны по отношению к взрыву или схлопыванию. При движении от плотностей белых карликов к большим плотностям нейтронных звезд масса этих нестабильных звезд будет уменьшаться, пока не достигнет минимума, примерно равного 0.1 солнечной массы, при окружности 1000 км и центральной плотности 3×10^{13} г/см³. Это та первая *нейтронная звезда*, которую изучали Оппенгеймер и Сербер, и показали, что она не может располагаться в ядре Солнца и иметь массу в 0.001 массы Солнца, как полагал Ландау.

Врезка 5.6

Неустойчивые обитатели промежутка между белыми карликами и нейтронными звездами

На кривой равновесия на рис. 5.5 все звезды между белыми карликами и нейтронными звездами неустойчивы. Примером является звезда с плотностью в центре, равной 10^{13} граммов на кубический сантиметр, масса которой и окружность соответствуют точке на

⁸ На самом деле максимальная масса белого карлика на рис. 5.5 (по расчетам М.Вакано) составляет 1.2 солнечной, что несколько меньше, чем 1.4 по вычислениям Чандрасекара. Разница получается из-за разного химического состава: звезды Вакано построены из «холодного мертвого вещества» (в основном железа), у которого количество электронов составляет 46% от количества нуклонов (протонов и нейтронов), а звезды Чандрасекара состоят из таких элементов, как гелий, углерод, азот и кислород, у которых число электронов составляет 50% от числа нуклонов. Фактически, большинство белых карликов во Вселенной больше похожи на звезды Чандрасекара, чем на звезды Вакано. Поэтому я в этой книге постоянно привожу то значение максимальной массы 1.4, которое получил Чандрасекар.

5. Схлопывание неизбежно

рис. 5.5, обозначенной числом 10^{13} . В точке 10^{13} эта звезда находится в равновесии: ее гравитация и давление полностью уравнивают друг друга. Однако звезда в этой точке так же неустойчива, как карандаш, стоящий на острие.

Если малейшая случайная сила (например, падение межзвездного газа на звезду) совсем немного сожмет звезду, т. е. немного уменьшит ее окружность, так, что она переместится немного влево на рис. 5.5 в белую область, то гравитация звезды начнет подавлять ее давление и приведет к ее схлопыванию. После того как звезда начнет схлопываться, она станет перемещаться строго влево по графику на рис. 5.5, пока не пересечет кривую нейтронных звезд и не попадет в заштрихованную область. Там ее нейтронное давление резко возрастет, остановит схлопывание и будет увеличивать поверхность звезды, пока она не успокоится в могиле нейтронных звезд, на их кривой равновесия.

И наоборот, если у звезды в точке 10^{13} вместо сжатия под действием случайной силы произойдет малейшее увеличение поверхности (например, вследствие случайного увеличения хаотического движения некоторых нейтронов), то это приведет звезду в заштрихованную область, где давление пересиливает гравитацию; давление звезды тогда заставит поверхность взорваться, и звезда будет на графике двигаться направо, поперек кривой белых карликов, и попадет в белую область рисунка; там вступит в силу гравитация, которая вернет звезду обратно к кривой равновесия, которая является могилой белых карликов.

Эта неустойчивость (сожмем чуть звезду в точке 10^{13} , и она начнет схлопываться, превратившись в нейтронную звезду, расширим ее на самую малость, и она взорвется, став белым карликом) означает, что никакая реальная звезда не может сколько-нибудь долгое время существовать в этой точке 10^{13} или в любой другой точке на части кривой равновесия, отмеченной как «неустойчивость».

Двигаясь вдоль кривой равновесия, мы проходим все семейство нейтронных звезд, массы которых изменяются в пределах от 0,1 до 2 солнечных. Максимальная масса нейтронной звезды, равная примерно двум солнечным, все еще остается не совсем определенной, даже в 90-х годах, поскольку поведение ядерных сил при очень высоких плотностях пока недостаточно понято. Этот максимум может быть меньше, около 1,5 масс Солнца, но не намного, или выше, но не более 3 солнечных масс.

В пике кривой равновесия, соответствующем (приблизительно) двум солнечным массам, нейтронные звезды кончаются. Если двигаться вдоль кривой дальше, к еще большим плотностям, равновесные звезды становятся нестабильными, таким же образом, как и в области между белыми карликами и нейтронными звездами. Из-за подобной нестабильности эти «звезды», как и промежуточные состояния между белыми карликами и нейтронными звездами, в природе существовать

не могут. Если они и образуются, то либо немедленно схлопываются с образованием черной дыры, либо взрываются, превращаясь в нейтронные звезды.

Рис.5.5 абсолютно твердо и недвусмысленно показывает: не существует какого-либо третьего семейства стабильных, массивных, холодных, мертвых объектов между черными дырами и нейтронными звездами. Поэтому когда такие звезды, как Сириус, с массой большей двух солнечных, исчерпывают свое ядерной горючее, они должны либо сбросить всю лишнюю массу, либо схлопнуться (превзойдя по плотности белые карлики и нейтронные звезды) до критического размера, и затем, как мы сегодня, в 1990-х годах, совершенно уверены, должны образовывать черные дыры. Схлопывание неизбежно. Для звезд с достаточно большой массой ни вырожденное давление электронов, ни ядерное взаимодействие между нейтронами не могут остановить катастрофическое сжатие. Гравитация преодолевает даже ядерные силы.

Однако существует выход, позволяющий спасти все звезды, даже самые тяжелые, от судьбы черной дыры. Возможно, все массивные звезды либо в последней фазе своей жизни (например, в ходе взрыва), либо в процессе умирания, теряют столь большую часть своей массы, что их масса становится ниже предела, равного двум солнечным массам, и таким образом они могут окончить свое существование на кладбище нейтронных звезд или белых карликов. В течение 40-х, 50-х и в начале 60-х годов астрономы, когда задумывались о конечной судьбе звезд, склонялись к тому, чтобы поддержать подобную точку зрения. (Однако, скорее всего, они об этом почти не думали, поскольку не существовало данных наблюдений, подталкивающих их к соответствующим размышлениям, а собираемые ими данные о других типах объектов — обычных звездах, туманностях, галактиках — были столь богаты, многообещающи и интересны, что полностью поглощали их внимание.)

Сегодня, в 1990-х годах, мы знаем, что тяжелые звезды, старея и умирая, действительно, освобождаются от большей части своей массы; они сбрасывают при этом так много вещества, что большая часть звезд, родившихся с массами около 8 солнечных, теряют достаточно, чтобы оказаться на кладбище нейтронных звезд. Так природа, кажется, полностью защитилась от черных дыр.

Но не совсем. Большое число данных наблюдений позволяет предположить (но это еще не доказано), что большинство звезд, имеющих массу больше, чем 20 Солнц, остаются умирая настолько тяжелыми, что их внутреннее давление не может противостоять гравитации. Когда они исчерпывают свое ядерное горючее и начинают остывать, грави-

5. Схлопывание неизбежно

тация пересиливает давление и они схлопываются с образованием черных дыр.

* * *

Читая об изучении нейтронных звезд и звездных ядер в 1930-х годах, можно многое можно узнать о характере науки и о самих ученых.

Исследованные Оппенгеймером и Волковым объекты были, в сущности, нейтронными звездами Цвикки, а не нейтронными ядрами Ландау, поскольку не имели окружающего «покрова» из звездного вещества. Тем не менее, Оппенгеймер испытывал столь мало уважения к Цвикки, что отказывался связывать его имя с этими объектами и настаивал на использовании имени Ландау. Таким образом, его совместная статья с Волковым, описывающая их результаты и опубликованная в февральском выпуске *Physical Review*, называлась «О массивных нейтронных ядрах». И чтобы быть уверенным в том, что ни у кого не возникнут сомнения в источнике его идей об этих звездах, Оппенгеймер усыпал статью ссылками на Ландау. При этом он ни разу не процитировал ни одну из многочисленных приоритетных публикациях Цвикки о нейтронных звездах.

Со своей стороны, Цвикки с нарастающим негодованием следил в 1938 г. за проводимыми Толманом, Оппенгеймером и Волковым исследованиями структуры нейтронных звезд. «Как они смеют так поступать?» — кипятился он. Нейтронные звезды были его, а не их детищем; это не их дело — работать над нейтронными звездами и, кроме того, хотя Толман иногда с ним и говорил, Оппенгеймер не консультировался с ним вообще никогда!

Однако в пачке статей, написанных Цвикки о нейтронных звездах, содержались лишь одни разговоры и умозрительные рассуждения, но никаких конкретных деталей. Он был настолько занят, углубившись в широкий (и достаточно успешный) наблюдательный поиск сверхновых, чтение лекций и написание статей об идее нейтронных звезд и их роли в возникновении сверхновых, что никогда и не старался разобраться в деталях. Теперь же дух соперничества требовал от него действий. В начале 1938 г. он сделал все, что мог, чтобы разработать подробную математическую теорию нейтронных звезд и связать ее с наблюдениями сверхновых. Плод его усилий был опубликован в выпуске *Physical Review* от 15 апреля 1939 г. под названием «О теории и наблюдении сильно сколлапсировавших звезд». Его работа была в 2,5 раза длиннее, чем у Оппенгеймера и Волкова, и не содержала ни

одной ссылки на опубликованную ими двумя месяцами ранее статью: есть ссылка лишь на вспомогательную маленькую публикацию одного Волкова. Впрочем, в этой статье не содержалось ничего примечательного. В действительности, большая ее часть была просто неверной. Работа же Волкова—Оппенгеймера была мощной, элегантной, полной вдохновения, корректной во всех деталях.

Несмотря на это, сегодня, почти полвека спустя, мы благодарны Цвикки, создавшему концепцию нейтронных звезд и верно понявшему, что нейтронные звезды образуются при взрывах сверхновых и питают их энергией; благодарны за их совместное с Бааде доказательство, основанное на наблюдениях того, что сверхновые действительно являются уникальным классом астрономических объектов, за то, что он инициировал и провел десятилетние наблюдения по определению сверхновых — и за много других, не относящихся к сверхновым и нейтронным звездам, озарений.

Как могло случиться, что человек со столь слабым пониманием физических законов оказался настолько проницательным? Моя точка зрения состоит в том, что он соединял в себе замечательную комбинацию черт характера: достаточное понимание теоретической физики, чтобы если не количественно, то хотя бы качественно оценивать явления; любопытство, развитое настолько, чтобы следить за всем происходящим в физике и астрономии; способность интуитивно распознавать (как мало кто другой) связь между несопоставимыми феноменами; и, что не менее важно, — огромную уверенность в своем собственном пути познания истины, он никогда не боялся выставить себя глупцом, обнародовав плод своих размышлений. Он знал, что прав, хотя часто это было не так, и никакая гора доказательств не могла убедить его в обратном.

Ландау, как и Цвикки, был в высшей мере самоуверен и совершенно не боялся выставить себя глупцом. Например, он не колеблясь опубликовал в 1931 г. идею о том, что звезды подпитываются энергией от сверхплотных ядер, в которых нарушаются законы квантовой механики. В своем владении теоретической физикой Ландау значительно превосходил Цвикки; он входит в первую десятку физиков-теоретиков XX века. Однако его предположения были не верны, а прав был Цвикки. Солнце *не получает* энергию от нейтронного ядра, а *сверхновые получают*. Может быть, Ландау, в отличие от Цвикки, просто не повезло? Частично это так. Но есть и другой фактор. Цвикки был погружен в атмосферу Маунт Вильсона — крупнейшего центра астрономических наблюдений. Он сотрудничал с одним из лучших астрономов Вальтером Бааде, который владел данными наблюдений. В Калтехе

5. Схлопывание неизбежно

он имел возможность почти ежедневно разговаривать с крупнейшими специалистами по наблюдению космических лучей. В противоположность этому Ландау не имел никакого контакта с практическими астрономами, и его статьи подтверждают это. Без такого контакта он не мог развить в себе острого восприятия того, что собой представляют находящиеся не здесь, а далеко вне Земли объекты. Величайшим триумфом Ландау стало его мастерское использование законов квантовой механики для объяснения феномена сверхтекучести (полное исчезновение внутреннего трения в жидком гелии при охлаждении до температур вблизи абсолютного нуля); при этом в своих исследованиях он тесно сотрудничал с экспериментатором Петром Капицей, подробно изучавшим сверхтекучесть.

Для Эйнштейна, в отличие от Ландау и Цвикки, тесное соединение наблюдений и теории не имел особого значения; он открыл законы своей общей теории относительности, почти не имея какой-либо экспериментальной основы. Подобное, однако, было редким исключением. Обогащающее взаимодействие теории и эксперимента существенно для прогресса многих направлений физики и астрономии.

А как же Оппенгеймер, владение которого теоретической физикой было сравнимо с мастерством Ландау? Его совместная с Волковым статья о структуре нейтронных звезд — одна из величайших статей в астрофизике во все времена. Но как бы значительна и красива она ни была, она «просто» дополняла детали концепции нейтронных звезд. В действительности же эта концепция была детищем Цвикки, как и концепции сверхновых и их обеспечения энергией посредством схлопывания звездного ядра с образованием нейтронной звезды. Почему Оппенгеймер, имея так много преимуществ, оказался гораздо меньшим новатором, чем Цвикки? Прежде всего, думаю, произошло это потому, что он отказывался (даже опасался) делать умозаключения. Айседор И. Раби, близкий друг и поклонник Оппенгеймера, описал это гораздо глубже: «...мне кажется, что до некоторой степени Оппенгеймер был более образован в областях, лежащих вне научной традиции, взять хотя бы его интерес к религии, в особенности к религии индуизма, давшей ему чувство того, что тайна Вселенной окутывает нас как туман. Он ясно понимал физику, обращаясь к тому, что уже было сделано, но на границе неизвестного склонялся к ощущению, что здесь существует гораздо больше загадочного и нового, чем в действительности. Он был недостаточно уверен в уже имевшейся в его распоряжении интеллектуальной мощи и не мог устремить свои мысли к самой конечной точке, инстинктивно чувствуя, что нужны какие-то новые идеи и новые методы, чтобы продвинуться дальше того, к чему уже пришел он со своими учениками».

СХЛОПЫВАЕТСЯ ВО ЧТО?

глава, в которой весь арсенал теоретической физики не помогает уйти от вывода — схлопывание порождает черные дыры

Столкновение было неизбежно. Два интеллектуальных гиганта — Дж. Роберт Оппенгеймер и Джон Арчибальд Уилер — придерживались столь отличающихся взглядов на устройство Вселенной и человеческого общества, что зачастую оказывались на противоположных позициях по таким глубоким проблемам, как национальная безопасность, политика атомного вооружения и вот теперь — черные дыры.

Ареной их столкновения стал лекционный зал Брюссельского университета в Бельгии. Оппенгеймер и Уилер, соседи по Принстону (Нью-Джерси), прибыли сюда вместе с другими ведущими физиками и астрономами со всего мира на целую неделю для дискуссий о структуре и эволюции Вселенной.

Это случилось поздним утром в четверг 10 июня 1958 г. Уилер только закончил представление собравшимся здесь ученым результатов своих недавних, совместных с К. Гаррисоном и М. Вакано, вычислений, которые однозначно устанавливали массы и размеры всех возможных холодных мертвых звезд (глава 5). Он заполнил пробелы в расчетах Чандрасекара и Оппенгеймера—Волкова, подтвердив их вывод: схлопывание становится неизбежным, если умирает звезда с массой, большей двух солнечных, и это схлопывание не может породить ни белый карлик, ни нейтронную звезду, ни какой-либо иной тип холодных мертвых звезд, если только умирающая звезда не сбросит достаточно вещества, чтобы опуститься ниже предела двойной солнечной массы.

«Из всех выводов теории относительности о структуре и эволюции Вселенной вопрос о судьбе огромных масс вещества представляется

6. Схлопывается во что?

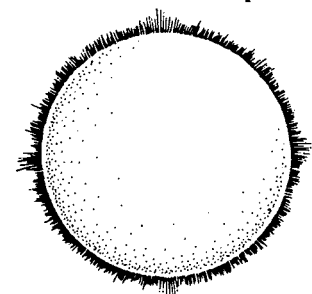
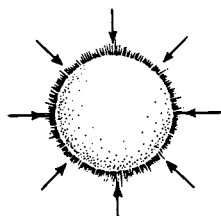
одним из наиболее захватывающих», — утверждал Уилер. С этим выводом аудитория вполне могла согласиться. Затем Уилер, практически воспроизводя атаку Эддингтона на Чандрасекара 24-летней давности, описал взгляд Оппенгеймера, согласно которому тяжелые звезды должны, умирая, схлопываться, образуя черные дыры, а затем, возражая, объявил, что такое схлопывание «не дает приемлемого ответа».

Почему? По-существу, по той же причине, по которой его отверг Эддингтон: «Должен существовать некий закон природы, не позволяющий звездам вести себя столь абсурдным образом». Но между Уилером и Эддингтоном существовало глубокое различие: если умозрительный механизм Эддингтона 1934 г., предложенный им для спасения Вселенной от черных дыр, был немедленно отвергнут как ложный такими экспертами, как Нильс Бор, то придуманный Уилером в 1958 г. механизм тогда не мог быть подтвержден или опровергнут. Лишь через пятнадцать лет будет показано, что он частично правилен (глава 12).

Рассуждения Уилера сводились к следующему: поскольку (с его точки зрения) схлопывание в черную дыру должно быть отвергнуто как физически неправдоподобное, «кажется, не уйти от заключения, что нуклоны (нейтроны и протоны) в центре схлопывающейся звезды должны неизбежно преобразовываться в излучение, которое будет достаточно быстро покидать звезду, сокращая ее массу [до двух солнечных]», и это позволит ей упокоиться на кладбище нейтронной звезды. Уилер охотно соглашался, что подобное превращение нуклонов в излучение лежит за пределами известных законов физики. Однако оно могло бы вытекать из пока еще плохо понимаемого «соединения» законов теории относительности и квантовой механики (главы 12–14). Для Уилера это было самым соблазнительным аспектом «проблемы гигантских масс». Абсурдность схлопывания с образованием черных дыр вынудила его придумать совершенно новый физический процесс (рис. 6.1).

На Оппенгеймера все это не произвело впечатления. Как только Уилер закончил выступление, он первым попросил слово. Оставаясь вежливым (чем он явно не отличался, когда был моложе), Оппенгеймер отстаивал свой взгляд: «Я не знаю, возникают ли в действительности в процессе звездной эволюции невращающиеся массы, гораздо более тяжелые, чем Солнце, но если это так, я верю, что их схлопывание может быть описано в рамках общей теории относительности (т. е. без привлечения новых физических законов). Разве не проще предположить, что такие массы испытывают непрерывное гравитационное сжатие и, в конце концов, все более отсекают себя от остальной Вселенной (т. е. образуют черные дыры)?» (см. рис. 6.1)

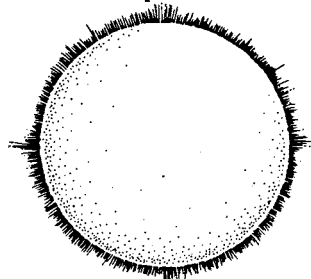
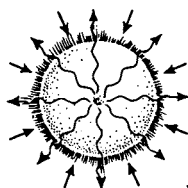
Взгляд Оппенгеймера—Снайдера:

Массивная звезда
истощает ядерное топливо

Звезда схлопывается

Звезда отсекается
от основной Вселенной

Взгляд Уилера 1958 г.:

Массивная звезда
истощает ядерное топливоЗвезда с уменьшившейся
массой приходит к равновесию
давления и гравитации
(нейтронная звезда)

Схлопывание звезды сжимает
ее центр до сверхвысоких плотностей.
Квантовые законы плюс кривизна
пространства-времени превращают
нуклоны в центре в излучение.
Излучение улетает, уменьшая
массу звезды и неся информацию
в союзе квантовой физики и
общей теории относительности

6.1 Сравнение взглядов Оппенгеймера на судьбу больших масс (верхняя последовательность) с взглядами Уилера 1958 г. (нижняя последовательность)

Уилер был также вежлив, но продолжал стоять на своем: «Трудно поверить, что такое «гравитационное отсечение» является удовлетворительным ответом».

Уверенность Оппенгеймера основывалась на тщательных расчетах, проделанных им 19 лет назад.

Рождение черных дыр: первый взгляд

Зимой 1938/39 гг., по завершении совместных с Георгием Волковым вычислений масс и размеров нейтронных звезд (глава 5), Оппенгеймер был твердо уверен, что массивные звезды, умирая, должны схлопываться. Следующий шаг был очевиден — используя физические законы, рассчитать детали этого схлопывания. Как будет выглядеть схлопывание для людей, находящихся на орбите? А каким они увидят

6. Схлопывается во что?

его с поверхности этой звезды? Какова будет последняя фаза схлопнувшейся звезды через тысячи лет после схлопывания?

Расчет оказался непростым. Фактически, составившие его математические преобразования станут для Оппенгеймера и его студентов самым серьезным испытанием из всех, за которые им приходилось браться: если нейтронные звезды Оппенгеймера–Волкова остаются статичными, неизменными, то схлопывающаяся звезда с течением времени быстро меняет свои характеристики. Кривизна пространства-времени внутри схлопывающейся звезды становится чудовищной, в то время как в нейтронных звездах она оставалась достаточно умеренной. Чтобы справиться со всеми этими сложностями, требовался особенный студент. Выбор был очевиден — Хартланд Снайдер. Он отличался от других учеников Оппенгеймера. Все остальные были выходцами из семей среднего класса, Снайдер был из рабочей семьи. В Беркли ходили слухи, что прежде чем заняться физикой, он водил грузовики в Юте. Р. Сербер вспоминает: «Хартланд плевал на многое из того, что было типично для студентов Оппи: любовь к Баху и Моцарту, хождения на струнные квартеты, получение удовольствия от вкусной пищи и либеральной политики».

Ядерщики в Калтехе были куда проще, чем окружение Оппенгеймера, и Хартланд хорошо подходил для ежегодных весенних переездов в Пасадину. Рассказывает У. Фоулер из Калтеха: «Оппи был чрезвычайно культурным человеком: он разбирался в литературе, живописи, музыке, знал санскрит. А Хартланд был таким же бездельником, как и все мы. Он любил наши вечеринки, где Томми Лауритсен играл на пианино, Чарли Лауритсен (глава лаборатории) — на скрипке, а мы распевали студенческие песни. Из всех учеников Оппи Снайдер был самым независимым».

Отличался Снайдер также и в интеллектуальном плане. «Хартланд был более талантлив в сложной математике, чем мы все, — вспоминал Сербер, — он мог изящно подправить те грубые вычисления, которые делали остальные». Именно этот его талант сделал естественным привлечение Снайдера к расчетам процесса схлопывания.

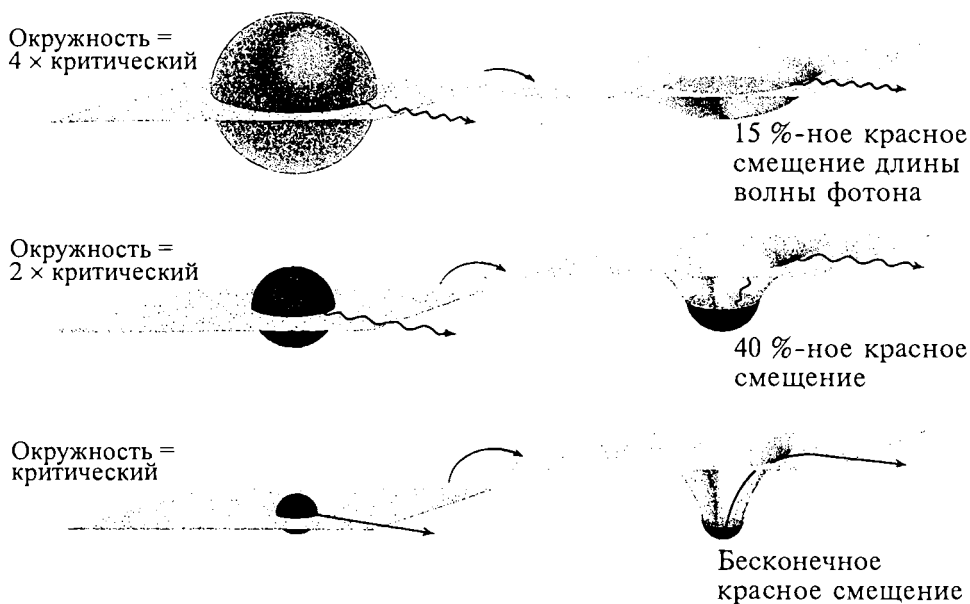
Прежде чем погрузиться в сложные вычисления, Оппенгеймер настоял (как обычно) на том, чтобы сначала сделать первый быстрый обзор проблемы. Что можно получить от задачи малыми усилиями? Ключом для этих первых оценок искривленного пространства-времени в окрестности звезды была геометрия Шварцшильда (глава 3).

Шварцшильд открыл свою геометрию пространства-времени как решение уравнений поля общей теории относительности. Это было решение, описывающее окрестности статичной звезды, не сжимаю-

ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ И СКЛАДКИ ВРЕМЕНИ

Физическое пространство

Гиперпространство



6.2. (См. рис. 3.4.) Предсказания общей теории относительности кривизны пространства и красного смещения длины волны света для последовательности трех очень компактных, статичных (несхлопывающихся) звезд, имеющих одинаковую массу, но разный размер. Верхняя звезда в 4 раза больше критического размера, средняя — в два раза, а нижняя в точности равна ему. На современном языке это означает, что поверхность третьей звезды является горизонтом черной дыры

щейся и не пульсирующей. Однако в 1923 г. гарвардский математик Дж. Бирхофф доказал замечательную математическую теорему: геометрия Шварцшильда описывает окрестности любой звезды, если только она имеет сферическую форму, включая не только статичные, но и схлопывающиеся, взрывающиеся и пульсирующие звезды.

Для своих первых оценок Оппенгеймер и Снайдер просто положили, что сферическая звезда после истощения ядерного топлива будет неограниченно сжиматься, и без учета расчетов внутри звезды провели расчет для удаленного наблюдателя. Они легко получили, что поскольку геометрия пространства-времени вне схлопывающейся звезды такая же, как и вне статичной звезды, схлопывающаяся звезда будет выглядеть во многом похоже на последовательность статичных звезд, каждая из которых компактней предыдущей.

Внешний вид окружающего пространства вокруг таких статичных звезд уже был изучен двумя десятилетиями ранее, примерно в 1920 г. На рис. 6.2 воспроизводятся *вложенные диаграммы*, использованные нами ранее в главе 3, каждая из которых отражает кривизну простран-

6. Схлопывается во что?

ства внутри и вне звезды. Чтобы сделать изображение понятнее, диаграммы выполнены так, что показывают кривизну лишь двух из трех измерений пространства: двух измерений экваториальной плоскости (левая часть рисунка). Кривизна пространства на этих плоскостях показана в предположении, что мы извлекаем звезду из физического пространства, в котором мы живем, и помещаем ее в плоское (неискривленное) фиктивное гиперпространство. В неискривленном *гиперпространстве* плоскость может сохранить свою искривленную геометрию, только выгнувшись вниз подобно чаше (правая часть рисунка).

На рисунке показана последовательность из трех статичных звезд, имитирующая процесс схлопывания, который готовились проанализировать Оппенгеймер и Снайдер. Все звезды имеют одинаковую массу, но разный размер. Длина окружности первой в четыре раза больше критической длины окружности, при которой гравитация звезды становится настолько сильной, что образует черную дыру. Вторая имеет в два раза больший размер, а размер третьей в точности соответствует *критической окружности*. Эти вложенные диаграммы показывают, что чем ближе звезда к критическому размеру, тем сильнее кривизна окружающего ее пространства. Однако эта кривизна не становится бесконечной. Чашеподобная геометрия остается везде гладкой, без резких складок и перегибов, даже когда звезда имеет критический размер, т. е. кривизна пространства-времени не бесконечна. Соответственно, поскольку *приливные гравитационные силы* (тип сил, которые растягивают вас от головы к ногам и которые вызывают приливы на Земле) являются физическим проявлением кривизны пространства-времени, приливная гравитация на критической окружности не бесконечна.

В главе 3 мы также обсуждали судьбу света, излучаемого с поверхности статичных звезд. Поскольку вблизи поверхности время бежит медленнее, чем вдали от нее (*гравитационное замедление времени*), испущенные с поверхности и принимаемые на удалении световые волны будут иметь увеличенный период колебаний и, соответственно, большую длину волны и более красный цвет. Как только свет выбирается из мощного гравитационного поля, его длина волны оказывается сдвинутой к красному краю спектра (*гравитационное красное смещение*). Если статичная звезда имеет размер в четыре раза больший критического, длина волны увеличивается на 15% (световой фотон в верхнем правом углу рисунка); если же звезда имеет размер, превышающий критический в два раза, красный сдвиг составляет 41% (справа в середине); если длина окружности звезды точно равна критической, длина волны света неограниченно смещается вправо, что означает, что у него вообще не остается энергии, и он прекращает свое существование.

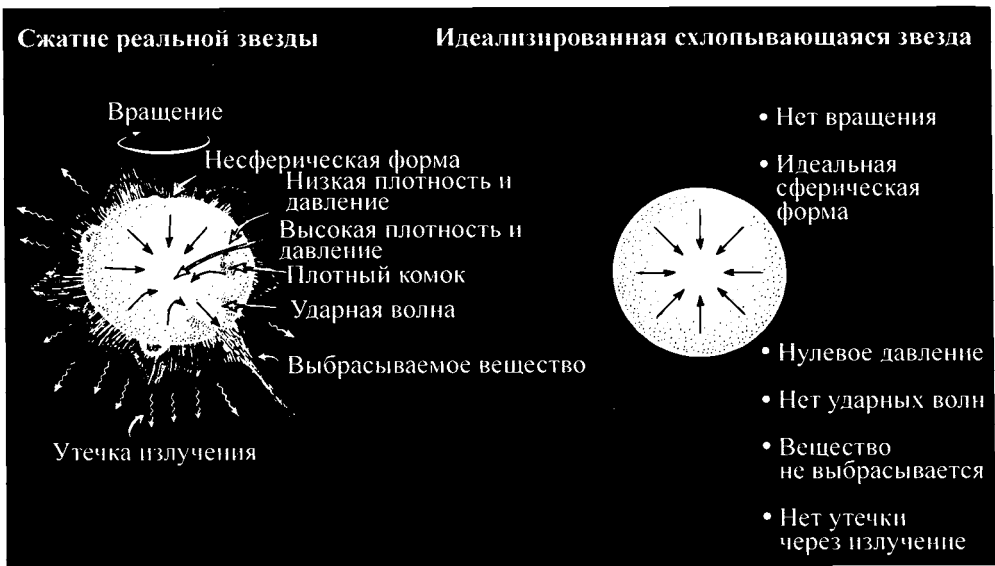
Рассмотрев в своих предварительных расчетах такую последовательность статичных звезд, Оппенгеймер и Снайдер пришли к такому выводу: во-первых, схлопывающаяся звезда, так же как и рассмотренные статичные, вероятно, порождает большое искривление пространства-времени вблизи поверхности при размерах, близких к критическим; но это искривление не бесконечно и потому не бесконечны и приливные гравитационные силы. Во-вторых, когда звезда схлопывается, свет с ее поверхности оказывается все более смещенным в красную область, и как только она достигает критического размера, красное смещение становится бесконечным, делая звезду совершенно невидимой. По словам Оппенгеймера, звезда как бы «сама обрывает» визуальную связь с нашей Вселенной.

Существует ли какой-либо способ, — спросили себя Оппенгеймер и Снайдер, — чтобы внутренние свойства звезды, которые игнорируются в таком быстром расчете, могли спасти звезду от «самоотсечения»? Например, не могло ли схлопывание протекать столь медленно, что критический размер никогда бы не достигался, даже спустя неограниченное время?

Оппенгеймер и Снайдер хотели бы ответить на все перечисленные вопросы, тщательно рассчитав реальное схлопывание звезды, как это показано в левой части рис. 6.3. Однако подобно Земле, любая реальная звезда хоть немного, но вращается. Благодаря такому вращению, центробежные силы, так же как и на Земле, слегка выпячивают экваториальную область звезды, поэтому она не может быть совершенно сферичной. Схлопываясь, звезда должна вращаться все быстрее (как фигурист, прижимающий к себе руки), и это все ускоряющееся вращение вызывает рост центробежных сил внутри звезды, которые делают все более заметным вздутие на экваторе — существенно заметнее, возможно даже настолько, что оно прерывает схлопывание, когда центробежные силы полностью уравновесят гравитационное притяжение. Каждая реальная звезда имеет высокие давление и плотность в центре и меньшие — во внешних слоях; при схлопывании же внутри, то там то здесь, будут формироваться комки с более высокой плотностью (подобно вкраплениям изюма в сладкой булочке). Более того, газообразное вещество звезды при схлопывании порождает ударные волны — аналог разбивающихся о берег океанских волн, и эти удары могут выбрасывать вещество, а значит, и массу с поверхности звезды, так же как волны выбрасывают в воздух водяные брызги. Наконец, истощает звезду, унося массу, и излучение (электромагнитные и гравитационные волны, нейтрино и т.д.)

Оппенгеймеру и Снайдеру хотелось бы учесть в своих расчетах все эти эффекты, но в 1930 г. это было непосильной задачей, лежащей за

6. Схлопывается во что?



6.3. Слева: Физические явления в реалистичной модели звезды. Справа: Идеализации, принятые Оппенгеймером и Снайдером при вычислении схлопывания

пределами возможностей любого физика или вычислительной машины. Ее решение станет возможным лишь в 1980-е годы с появлением суперкомпьютеров. Таким образом, чтобы добиться хоть какого-то прогресса, необходимо было построить идеализированную модель схлопывающейся звезды и затем рассчитать предсказания, даваемые законами физики, для этой модели.

Подобные идеализации были сильной стороной Оппенгеймера: сталкиваясь с ужасающе сложными ситуациями, подобными этой, он мог почти безошибочно определить, какие явления имеют решающее значение, а какие второстепенны.

Что касается схлопывающихся звезд, здесь, как верил Оппенгеймер, среди других особенностей, определяющее значение имела гравитация в том виде, как она описана в общей теории относительности Эйнштейна. Она и только она не могла быть опущена при планировании предстоящего расчета. В противоположность этому, вращением звезд и несферичностью их формы можно было пренебречь (они способны играть заметную роль лишь для *некоторых* схлопывающихся звезд, а для слабовращающихся, вероятно, сильного эффекта не дают). На самом деле, Оппенгеймер не мог это доказать математически точно, но интуитивно это казалось очевидным; так оно и оказалось в действительности. Аналогичным образом, интуиция подсказывала, что утечка через излучение — малосущественная деталь, как, впрочем, и ударные волны, и комки плотности. Более того, поскольку (как пока-

зали Волков и Оппенгеймер) гравитация могла пересилить любое давление в массивной мертвой звезде, казалось безопасным допустить (хотя, конечно, это не так), что в схлопывающейся звезде как будто бы нет внутреннего давления ни теплового, ни давления вырожденно-го (клаустрофобного) движения электронов и нейтронов, ни давления, обусловленного ядерными силами. Настоящая звезда с реальным давлением может схлопываться не так, как идеальная звезда без давления, но отличия в схлопывании должны быть умеренными, не слишком значительными.

Именно поэтому Оппенгеймер предложил Снайдеру для расчетов идеализированную модель: основываясь на точных законах общей теории относительности, рассчитать схлопывание идеально сферичной, невращающейся и неизлучающей звезды с однородной плотностью (одинаковой в середине и на поверхности) и при полном отсутствии внутреннего давления (см. рис. 6.3).

Даже со всеми этими упрощениями (вызывавшими скептицизм у других физиков на протяжении последующих 30 лет) расчет оставался чрезвычайно сложным. К счастью, в Пасадене мог помочь Р. Толман. Часто обращаясь к нему за советом по математике и апеллируя к физической интуиции Оппенгеймера, Снайдер получил систему уравнений, полностью описывающую процесс схлопывания, и, проявив большую изобретательность, решил ее. Теперь в его распоряжении было подробное описание процесса схлопывания, выраженное в формулах! Анализируя эти формулы с разных сторон, физики могут по своему желанию увидеть любые аспекты схлопывания — как это выглядит вне звезды, внутри нее, на ее поверхности.

* * *

Особенно интригующим оказался вид на схлопывающуюся звезду с покоящейся внешней системы отсчета, т. е. то, как ее видит наблюдатель, находящийся снаружи на некотором фиксированном расстоянии, а не движущийся к центру вместе со сжимающимся веществом звезды. Звезда, наблюдаемая из покоящейся внешней системы отсчета, начинает сжатие именно так, как этого и можно было бы ожидать. Подобно камню, брошенному с крыши, поверхность звезды падает вниз (сжимается к центру) сначала медленно, а затем все быстрее. Если бы законы тяготения Ньютона были верны, ускорение схлопывания неуклонно продолжалось бы до тех пор, пока звезда с высокой скоростью, при отсутствии какого-либо внутреннего давления, не свернулась бы в точку. Но согласно релятивистским формулам Оппен-

6. Схлопывается во что?

геймера и Снайдера, все происходит не так. Вместо этого при приближении звезды к критическому размеру ее сжатие чрезвычайно замедляется. Чем меньше становится звезда, тем медленнее она схлопывается, пока не становится совершенно замороженной при точно критической длине окружности. Вне зависимости от того, как долго мы будем ждать, находясь снаружи звезды (т.е. в состоянии покоя во внешней статичной системе отсчета), мы никогда не сможем увидеть, как звезда схлопнется, пройдя критический размер. Таков был недвусмысленный вывод из формул Оппенгеймера и Снайдера.

Обусловлено ли замораживание сжатия некоей неожиданной силой внутри звезды, следующей из общей теории относительности? Нет, это не так, — догадались Оппенгеймер и Снайдер. Скорее всего, оно объясняется гравитационной временной задержкой (замедлением течения времени) вблизи критического размера. Время на поверхности звезды, со стороны покоящегося стороннего наблюдателя, при приближении к критической окружности, должно течь все медленнее и, соответственно, все происходящие внутри звезды процессы, включая само схлопывание, будут протекать все медленнее, пока совсем не остановятся.

Каким бы странным ни казалось это предсказание, другое, даваемое формулами Оппенгеймера и Снайдера, было еще удивительнее. Хотя, с точки зрения покоящегося внешнего наблюдателя, схлопывание замораживается на критической окружности, на взгляд наблюдателя, находящегося на поверхности звезды и движущегося вместе с ней, *оно вовсе не прекращается*. Если звезда имеет массу в несколько солнечных масс и сжимается, начиная примерно с размера Солнца, то для наблюдателя на ее поверхности она сожмется до критической окружности за время порядка часа и затем, пройдя критическую отметку, продолжит схлопывание к все меньшим окружностям.

К 1939 г., когда Оппенгеймер и Снайдер обнаружили все это, физики уже привыкли к тому факту, что время относительно: в системах отсчета, движущихся во Вселенной по-разному, течение времени различно. Но никогда ранее никто не сталкивался с подобной разницей между системами отсчета. Трудно было принять, что *схлопывание навсегда замораживается для наблюдателя в одной покоящейся системе отсчета, но быстро развивается, проходя точку замерзания, при измерении в системе отсчета, связанной с поверхностью звезды*. Зная о таких предсказаниях, все, кто изучал математические расчеты Оппенгеймера и Снайдера, чувствовали неудобство. Можно было, конечно, на это неудобство махнуть рукой и ограничиться эвристическими объяснениями, но ни одно из них не казалось удов-

летворительным. Все это будет оставаться непонятным вплоть до конца 1950-х годов.

Рассматривая формулы Оппенгеймера и Снайдера с точки зрения наблюдателя на поверхности звезды, можно получить не только подробную картину схлопывания, даже после того, как звезда проваливается за критическую окружность (т. е. «сжеживается» до бесконечной плотности и нулевого объема), но также и детали искривления пространства-времени при таком сжатии. Однако в своей статье, описывающей расчет, Оппенгеймер и Снайдер избегали каких-либо деталей сжатия. Возможно, природный научный консерватизм Оппенгеймера и его нежелание строить предположения не позволили ему вдаваться в обсуждения.

Если даже Оппенгеймеру и Снайдеру было трудно принять прочтенную по их же формулам конечную судьбу схлопывающейся звезды, что говорить о других физиках, которым в 1939 г. странными казались даже детали происходящего вне критической окружности. В Калтехе, например, поверил в эти результаты Толман — все-таки предсказания были непосредственным следствием общей теории относительности. Но других в Калтехе все это не слишком убедило. Общая теория относительности была экспериментально проверена лишь в пределах Солнечной системы, где гравитация настолько слаба, что законы Ньютона дают практически те же предсказания, что и уравнения общей теории относительности. В противоположность этому, причудливые предсказания Оппенгеймера—Снайдера обращались к сверхсильной гравитации. Большинство физиков полагали возможным, что общая теория относительности перестает работать, когда тяготение становится настолько велико. Но даже если бы она и продолжала работать, все равно Оппенгеймер и Снайдер могли неправильно интерпретировать то, что пытались сказать полученные ими математические выражения. А если их интерпретация и была верной, расчеты были столь идеализированы (в отношении вращения, комков, ударов и излучения), что их можно было не принимать всерьез.

Подобный скептицизм получил распространение в Соединенных Штатах, Западной Европе, но не в СССР. Здесь Лев Ландау, все еще приходивший в себя после годичного тюремного заключения, вел «Золотой список» наиболее важных теоретических статей по физике, опубликованных во всем мире. Прочтя работу Оппенгеймера—Снайдера, Ландау занес ее в свой список и заявил друзьям и знакомым, что последние открытия Оппенгеймера и Снайдера должны быть верными, хотя человеческому рассудку их чрезвычайно трудно принять. Влияние Ландау было столь сильным, что его взгляд отныне стали разделять и другие ведущие советские теоретики.

Ядерная интерлюдия

Были ли Оппенгеймер и Снайдер правы или они ошибались? Ответ на этот вопрос, возможно, мог быть получен уже в 40-е годы, если бы не вмешались вторая мировая война и программы форсированного создания водородной бомбы. Но война и бомба вмешались, и исследование таких непрактичных, изотерических вопросов, как черные дыры, оказалось временно замороженным — до тех пор, пока физики не обратили все силы на разработку оружия.

Только к концу 1950-х годов гонка вооружения достаточно ослабла для того, чтобы мысли о схлопывающихся звездах смогли вернуться в сознание физиков. Только после этого скептики начали первую серьезную атаку на предсказания Оппенгеймера-Снайдера. Одним из тех, кто первым (правда, недолго) выступал под флагом скептицизма, был Уилер. Лидером же поверивших стал вначале советский двойник Уилера — Я.Б. Зельдович.

Характеры Уилера и Зельдовича закаливались в войне проектов ядерного оружия в течение почти двух десятилетий в 40–50-е годы, пока исследования черных дыр были на время отставлены. Из своих работ над вооружением Уилер и Зельдович вышли с богатым арсеналом средств для анализа черных дыр: мощной компьютерной техникой, глубоким пониманием физических законов и коллективным стилем исследований, состоявшим в постоянном стимулировании более молодых коллег. За ними тянулась и тяжелая ноша гаммы сложных взаимоотношений с основными коллегами: у Уилера — с Оппенгеймером, у Зельдовича — с Ландау и Сахаровым.

* * *

Уилер, только окончивший аспирантуру в 1933 г. и выигравший финансируемую Рокфеллером стипендию Национального исследовательского совета, имел выбор, где и с кем продолжать работу. Он мог бы выбрать Беркли и Оппенгеймера, как поступили большинство постдоков, получивших эту стипендию в то время, но вместо этого он остановил внимание на Университете Нью-Йорка и Грегори Брейте. «Как личности они [Оппенгеймер и Брейт] были крайне разные, — утверждает Уилер, — Оппенгеймер видел вещи в черном и белом цвете и быстро принимал решения. Брейт работал с оттенками серого. Меня привлекали вопросы, требующие всестороннего отражения, и потому я выбрал Брейта».

Из Университета Нью-Йорка в 1933 г. Уилер переехал в Копенгаген, чтобы учиться у Н. Бора. Затем получил место профессора в

Университете Северной Каролины, а после этого — в Принстонском университете в Нью-Джерси. В 1939 г., когда Оппенгеймер с учениками в Калифорнии исследовали нейтронные звезды и черные дыры, Уилер и Бор в Принстоне (Бор переехал сюда) разрабатывали теорию деления ядра — распад тяжелых атомных ядер, таких как уран, на меньшие части при бомбардировке ядер нейтронами. Распад был только что, довольно неожиданно, открыт в Германии Отто Ганом и Фрицем Штрассманом, и последствия этого могли быть зловещими: в результате цепи реакций деления можно было создать оружие беспрецедентной мощности. Но Бора и Уилера не волновали цепные реакции и оружие; они просто хотели понять, как возникает деление, какой механизм лежит в его основе, как оно получается из законов физики?

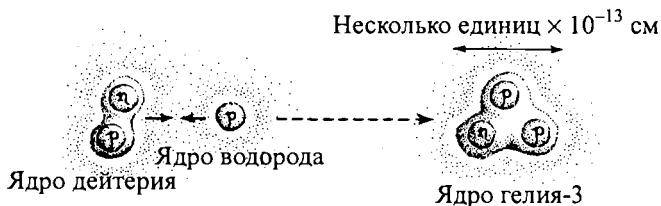
Бор и Уилер достигли замечательного успеха. Они открыли, как физические законы объясняют деление, и предсказали, какие ядра могли бы быть самыми эффективными для поддержания цепных реакций: уран-235 (который станет основой бомбы, разрушившей японский город Хиросиму) и плутоний-239 (ядро, не существующее в природе, но американские физики вскоре узнают, как получать его в ядерных реакторах, и используют, чтобы начинить им бомбу, разрушившую Нагасаки). Однако в 1939 г. Бор и Уилер не думали еще на языке бомб, они просто хотели понять.

Статья Бора—Уилера, объясняющая ядерный распад, была опубликована в том же номере *Physical Review*, что и работа Оппенгеймера—Снайдера, описывающая образование черных дыр. Публикация была датирована 1 сентября 1939 г., тем днем, когда Гитлер вторгся в Польшу, развязав вторую мировую войну.

Врезка 6.1

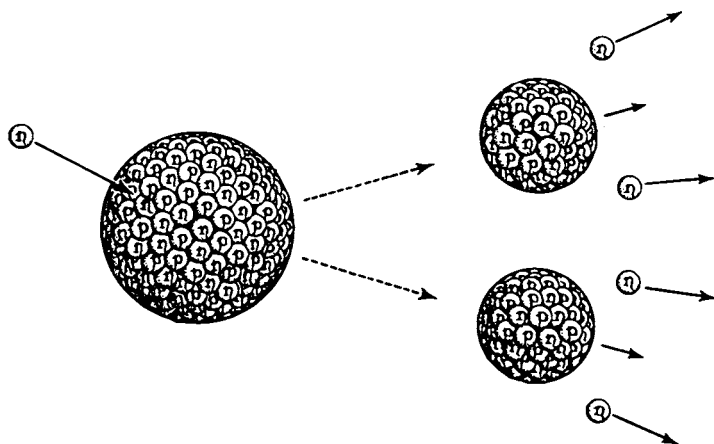
Расщепление, слияние и цепные реакции

Слияние очень легких ядер с образованием ядер среднего размера высвобождает огромное количество энергии. Простой пример был показан во Врезке 5.3 — слияние ядра дейтерия («тяжелого водорода», имеющего один протон и один нейтрон) с обычным водородным ядром (единственный протон) с образованием ядра гелия-3 (два протона и один нейтрон):



Такие реакции синтеза поддерживают жар Солнца и обеспечивают энергией водородную («супербомбу», как ее называли в 1940-х и 1950-х).

Расщепление (распад на части) очень тяжелых ядер с образованием двух ядер среднего размера также высвобождает большое количество энергии — намного большее, чем в ходе химических реакций (поскольку ядерные силы, которые работают в ядрах, значительно сильнее электромагнитных сил, которые управляют химически реагирующими атомами), но намного меньше энергии, выделяющейся



при слиянии легких ядер. Некоторые очень тяжелые ядра могут расщепляться без внешней помощи, естественным образом. Более интересны для этой главы реакции деления, в которых в очень тяжелое ядро типа урана-235 (ядро урана с 235 протонами и нейтронами) ударяется нейтрон и разбивает это примерно пополам.

Есть два тяжелых ядра: уран-235 и плутоний-239, имеющие такую особенность, что их расщепление порождает не только два ядра среднего размера, но и несколько нейтронов (как на рисунке выше). Эти нейтроны делают возможными цепные реакции: если сконцентрировать достаточное количество урана-235 или плутония-239 в достаточно малом объеме, то нейтроны, вылетевшие при одном расщеплении, поразят другие ядра урана или плутония и расщепят их, производя больше нейтронов, которые расщепят больше ядер, производящих еще больше нейтронов, расщепляющих еще больше ядер, и так далее. Результатом такой неконтролируемой цепной реакции будет сильнейший взрыв (взрыв атомной бомбы), а если управлять ей в реакторе, можно получать экономичную электроэнергию.

Яков Борисович Зельдович родился в еврейской семье в Минске в 1914 г., в том же году вся семья переехала в Санкт-Петербург (переименованный тогда же в Петроград, а потом, в 1924 г. — в Ленинград). Зельдович окончил школу в возрасте 15 лет и затем, вместо того чтобы поступать в университет, пошел работать лаборан-

том в Ленинградский физико-технический институт. Здесь он самостоятельно изучил физику и химию и провел настолько впечатляющие исследования, что даже без формального обучения в университете в 1936 г., в возрасте 22 лет, был удостоен степени кандидата наук.

В 1939 г., когда Уилер и Бор разрабатывали теорию ядерного распада, Зельдович вместе с близким другом Юлием Борисовичем Харитоновым развивал теорию цепных реакций, происходящих при ядерном распаде. Эти исследования были инициированы интригующей (хотя и неверной) гипотезой французского физика Франсуа Перрена, предположившего, что извержения вулкана питаются энергией естественных подземных ядерных взрывов, происходящих в результате цепных реакций распада атомных ядер. Однако никто, включая Перрена, пока не проработал деталей таких цепных реакций, и Зельдович с Харитоновым, в числе лучших экспертов по химическим взрывам, погрузились в решение этой проблемы. В течение нескольких месяцев они (как и работавшие параллельно с ними ученые на Западе) показали, что подобные взрывы не могут происходить в природе, поскольку встречающийся в природе уран состоит в основном из урана-238 и незначительного количества урана-235. Однако они пришли к выводу, что если уран-235 искусственно отделить и сконцентрировать, то такую реакцию вполне можно будет провести. (За такое отделение вскоре возьмутся американцы, чтобы создать топливо для атомной бомбы, сброшенной затем на Хиросиму.) Завеса секретности в то время еще не опустилась на ядерные исследования, поэтому Зельдович и Харитон опубликовали свои расчеты в самом престижном советском физическом издании — *Журнале экспериментальной и теоретической физики* для сведения ученых всего мира.

* * *

В течение шести лет пока шла вторая мировая война физики воювавших стран разрабатывали сонары, миноискатели, ракеты, радары и судьбоносную атомную бомбу. Оппенгеймер возглавлял «Манхэттенский проект» в Лос-Аламосе (штат Нью-Мексико) по разработке и созданию американских бомб. Уилер был ведущим ученым при проектировании и конструировании первых в мире промышленных ядерных реакторов в Хэнфорде (штат Вашингтон), которые произвели плутоний-239 для бомбы Нагасаки.

После истребительных бомбардировок Хиросимы и Нагасаки, приведших к гибели сотен тысяч человек, Оппенгеймер испытал сильнейшее душевное потрясение. «Если атомные бомбы будут добавлены

6. Схлопывается во что?

в военные арсеналы воюющих стран или в арсеналы наций, готовящихся к войне, настанет время, когда человечество проклянет Лос-Аламос и Хиросиму». «Остается тяжелое чувство, которое не пригасить ни грубостью, ни юмором, ни оправданиями, что физики несут известный грех — это их знания, которые они не могут утратить».

Но сожаления Уилера имели противоположный характер: «Обращаясь назад (к 1939 г. и моей работе с Бором над теорией распада), я чувствую величайшее сожаление. Как могло случиться, что я рассматривал распад в первую очередь как физик (просто любопытствующий узнать, как этот распад работает) и лишь во вторую как гражданин (озабоченный защитой своей страны)? Почему я не взглянул на проблему иначе как гражданин (пытающийся защитить свою страну), а лишь потом — как физик? Простая оценка показывает, что если в ходе второй мировой войны погибли от 20 до 25 миллионов человек, и при этом большая часть в ее последние годы. Каждый месяц сокращения войны означал бы спасение порядка полумиллиона-миллиона жизней. Среди этих подаренных жизней мог бы быть и мой брат Джо, убитый в октябре 1944 г. в боях за Италию. Насколько бы все было по-другому, если бы критическая дата (бомбардировка Хиросимы) была не 6 августа 1945 г., а 6 августа 1943 г.».

* * *

В СССР с июня 1941 г., когда Германия напала на Россию, физики свернули все ядерные исследования, поскольку другие области физики могли бы дать более быструю отдачу для национальной обороны. В то время, когда немецкая армия продвигалась вперед и окружала Ленинград, Зельдович со своим другом Харитоновым, находясь в эвакуации в Казани, интенсивно работали над теорией взрыва обычных типов бомб, пытаясь увеличить их взрывную силу. Затем, в 1943 г., они были вызваны в Москву. Им сообщили, что как американцы, так и немцы наращивают усилия по созданию атомной бомбы, и им предстоит влиться в руководимую И.В.Курчатовым маленькую, элитную группу советских ученых по разработке бомбы.

Двумя годами позже, когда американцы подвергли атомной бомбардировке Хиросиму и Нагасаки, а команда Курчатова разработала подробное теоретическое описание ядерных реакторов для производства плутония-239 и подготовила несколько возможных конструкций бомбы, Харитон и Зельдович стали ведущими теоретиками проекта.

Узнав о взрывах американских бомб, Сталин гневно отчитал Курчатова за медлительность. Курчатов защищал свою команду: среди

военной разрухи, имея ограниченные ресурсы, они не могли бы продвигаться быстрее. Сталин сердито возразил ему: «Если бы ребенок не кричал, мать не знала бы, что ему нужно. Просите все, что вам нужно, — потребовал Сталин, — и вам не откажут». Сталин распорядился о начале неограниченного никакими преградами форсированного проекта по созданию бомбы, проекта под верховным руководством Берии — грозного главы тайной полиции.

Масштаб усилий, предпринятых Берией, трудно себе представить. Он использовал подневольный труд миллионов советских граждан, находившихся в сталинских лагерях. Именно «зэки», как их обычно называли, построили урановые шахты, фабрики очистки урана, ядерные реакторы, теоретические исследовательские центры, полигоны для проверки оружия и самодостаточные маленькие города для обеспечения всех этих объектов. Все это, рассеянное по территории страны, было окружено таким уровнем секретности, о котором и не слышали в ходе американского манхэттенского проекта.

Зельдович и Харитон были направлены в одно из таких «отдаленных мест»¹, расположение которых хотя и было зачастую хорошо известно западным экспертам к концу 1950-х, было запрещено открывать советским гражданам вплоть до 1990-х. Это место называли просто «Объект». Харитон стал директором, а Зельдович возглавил одну из ключевых групп по разработке бомбы. Направляемый Берией Курчатов сформировал несколько групп физиков для параллельной и совершенно независимой проработки различных аспектов бомбового проекта: дублирование обеспечивало секретность. Группы с «Объекта» снабжали конструкторскими задачами другие команды, включая и небольшую группу Ландау, работавшую в Институте физических проблем в Москве.

Пока неумолимо разворачивались эти массивованные усилия, советские шпионы получили через Клауса Фукса (британского физика, работавшего на американский проект) чертежи американской плутониевой бомбы. Она в некоторых деталях отличалась от разработки Зельдовича с коллегами, поэтому Курчатов, Харитон и остальное руководство оказались перед нелегким выбором: они находились под непрерывным давлением Сталина и Берии, требовавших результатов, и потому боялись последствий возможных неудачных испытаний в эпоху, когда неудача могла означать смерть. Они знали, что американская конструкция сработала в Аламогордо и Нагасаки, но не были

¹ Это место располагается вблизи города Арзамас, между Челябинском и Уральскими горами.

6. Схлопывается во что?

совершенно уверены в собственной разработке; в то же время они располагали запасом плутония только на одну бомбу. Решение было очевидным, но болезненным: они оставили собственную конструкцию² и нацелили проект на реализацию американской разработки.

Наконец, 29 августа 1949 г., после четырех лет громадных усилий, неимоверных страданий, несчетных смертей эков-рабов и скопления отходов ядерных реакторов вблизи Челябинска (которые десятью годами позже взорвутся, заразив сотни квадратных километров окраины страны) форсированная программа принесла результат. Первая советская атомная бомба была взорвана вблизи Семипалатинска в Средней Азии, в ходе испытаний на которых присутствовали руководители государства и верховное командование Советской Армии.

* * *

3 сентября 1949 г. американский самолет погодной разведки WB-29, совершая рядовой полет из Японии на Аляску, обнаружил продукты ядерного распада от советских испытаний. Данные были представлены для оценки комиссии экспертов, включая Оппенгеймера. Вердикт был однозначен: русские испытали атомную бомбу!

Поднялась паника (бомбоубежища на заднем дворе; занятия по защите от атомной опасности в школах; «охота на ведьм» сенатора Маккарти по выкорчевыванию шпионов, коммунистов и их сторонников из правительства, армии, прессы и университетов). На фоне этой паники разгорелись широкие дебаты между физиками и политиками. Эдвард Теллер, отличавшийся новаторским подходом среди американских физиков, разработчиков атомной бомбы, отстаивал форсированную программу разработки и создания «супербомбы» (или водородной бомбы) — оружия, основанного на слиянии водородных ядер с образованием гелия. Водородная бомба, если бы она была создана, была бы ужасна. Казалось, нет ограничений на ее мощность. Хотите бомбу в десять раз более мощную, чем та, которую сбросили на Хиросиму? В сто раз более мощную? В тысячу? В миллион?... Если бы можно было вообще сделать действующую бомбу, она была бы сколь угодно мощной.

Уилер поддержал Теллера: форсированная программа «супербомбы» будет существенным противовесом советской угрозе. Оппенгеймер и его Генеральный консультативный комитет при Комиссии по атом-

² После успешных испытаний бомбы, основанной на американской конструкции, советские ученые вернулись к своей разработке, создали бомбу на ее основе и успешно испытали ее в 1951 г.

ной энергии США высказались против. Совсем не очевидно, действительно ли задуманная супербомба может быть создана, возражал комитет. Более того, даже если она и будет действовать, любая супербомба, гораздо более мощная, чем обычная атомная, скорее всего, будет слишком тяжелой, чтобы ее можно было доставить самолетом или ракетой.

Кроме того, существовали и моральные аспекты, которые Оппенгеймер и его комитет сформулировали следующим образом: «Мы основываем наши рекомендации (против форсированной программы) на вере в то, что чрезвычайная опасность для человечества, содержащаяся в предложении, полностью перевешивает любое военное преимущество, которое может происходить из его развития. Необходимо понять, что речь идет о супероружии, которое относится к другой категории, чем атомная бомба. Причиной для разработки подобной супербомбы могла бы стать потребность опустошить с помощью одной-единственной бомбы обширные пространства. Ее использование означает принятие решения об истреблении огромной части гражданского населения. Мы также обеспокоены возможными глобальными последствиями воздействия радиоактивности, возникающей при взрыве нескольких супербомб существенной мощности. Если супербомба вообще будет создана, не будет принципиального предела разрушительной мощи, которая может быть достигнута с ее помощью. Поэтому супербомба способна стать оружием массового геноцида».

На Теллера и Уилера эти аргументы не произвели впечатления. Русские, несомненно, будут продвигаться вперед по пути создания водородной бомбы; если Америка также не будет двигаться дальше, свободный мир подвергнется чрезвычайной опасности.

Точка зрения Теллера—Уилера победила. 10 марта 1950 г. президент Трумэн приказал развернуть программу разработки супербомбы.

Если смотреть в ретроспективе, американская конструкция супербомбы образца 1949 г., как и подозревал комитет Оппенгеймера, была обречена на неудачу. Однако поскольку тогда это еще не стало очевидным, и так как ничего лучшего придумано не было, ее продолжали разрабатывать вплоть до марта 1951 г., когда Теллер и Станислав Улам изобрели радикально новую конструкцию, выглядевшую весьма многообещающей.

Изобретение Теллера—Улама сначала было лишь идеей конструкции. Как сказал Ганс Бете, «девять из десяти идей Теллера бесполезны. Ему нужны критики, пусть даже менее одаренные, чем он, чтобы выделить эту десятую идею, часто являющуюся печатью гения». Необходимо было проверить, была ли идея гениальным прозрением или лишь обманчивой

6. Схлопывается во что?

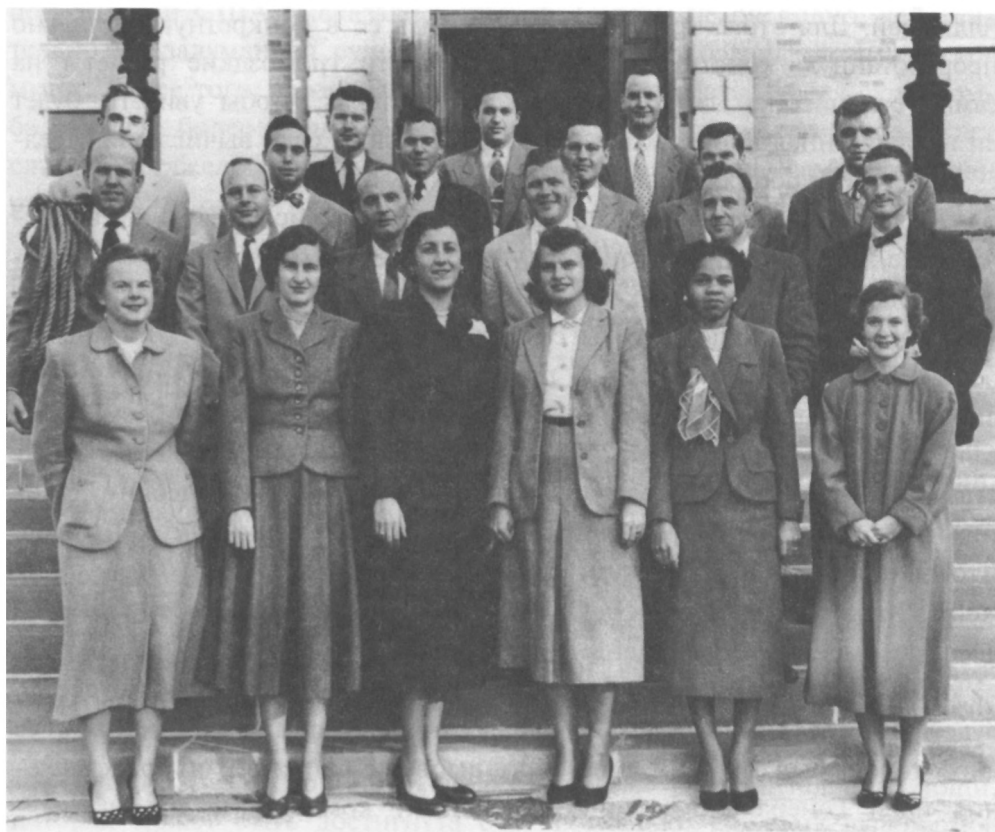
иллюзией. Для этого требовалось воплотить ее в конкретную, детально проработанную конструкцию, затем провести громоздкие расчеты на самых больших из доступных тогда компьютерах, чтобы увидеть, будет ли предложенная конструкция работать. И только если вычисления предскажут успех, построить и испытать реальную бомбу.

Две группы получили задание произвести вычисления: одна в Лос-Аламосе, другая в Принстонском университете. Принстонскую команду возглавлял Уилер. Его команда работала на протяжении нескольких месяцев днем и ночью, чтобы создать полную конструкцию бомбы на основе идеи Теллера—Улама и проверить ее работоспособность моделированием на компьютере. Как вспоминает Уилер, «... это был колоссальный объем вычислений. Мы использовали вычислительные средства Нью-Йорка, Филадельфии и Вашингтона — фактически значительную часть всех вычислительных мощностей Соединенных Штатов. Чтобы получить ответ, Ларри Уиллетс, Джон Толл, Кен Форд, Луис Хени, Карл Хаусман, Дик л'Оливер и другие работали в три шестичасовые смены каждый день».

Когда расчеты показали, что идея Теллера—Улама, судя по всему, будет работать, в Институте передовых исследований в Принстоне (где директором был Оппенгеймер) организовали встречу для представления идеи Генеральному консультативному комитету и его «родителю» — Комиссии по атомной энергии США. Теллер описал идею, а Уилер рассказал об особенностях конструкции, разработанной его группой, и предсказываемого взрыва.

Уилер вспоминает: «Когда я начал свое выступление, Кен Форд подбежал снаружи к окну, опустил его и передал мне большую диаграмму. Я развернул ее и повесил на стену: она демонстрировала развитие термоядерной реакции [как мы ее рассчитали] ... У комиссии не оставалось иного выбора, как заключить, что это заслуживает внимания. ... Наши расчеты перевернули отношение Оппи к проекту».

А вот как описал собственное впечатление Оппенгеймер: «Наша программа в 1949 г. [фугасная бомба] была довольно извращенной штукой, ее легко было оспорить, в техническом смысле она не производила какого-либо впечатления. Поэтому было легко возражать, доказывая ее нежелательность, даже если она получится. Программа 1952 г. [новая конструкция, основанная на идее Теллера—Улама] была настолько технически приятной, что о ней просто нельзя было спорить. Оставались лишь чисто военные и политические, а также гуманистические аспекты проблемы того, что вы собираетесь делать, заполучив эту бомбу».



Часть команды Джона Уилера, работавшей над проектом водородной бомбы в Принстонском университете в 1952 г. *Передний ряд, слева направо:* Маргарет Феллоуз, Маргарет Мюррей, Доротея Райффел, Одри Ойала, Кристин Шэк, Роберта Кейси. *Второй ряд:* Вальтер Арон, Вильям Кленденин, Соломон Бохнер, Джон Толл, Джон Уилер, Кеннет Форд. *Третий и четвертый ряд:* Дэвид Лэйзер, Лоренс Вилетс, Дэвид Картер, Эдвард Фриман, Джей Бергер, Джон Макинтош, Ральф Пеннингтон, не определен, Роберт Герсс. [Фото Говарда Шредера, предоставлено Лоуренсом Уилетсом и Джоном А. Уилером]

Подавив глубокие опасения по поводу возникающих этических вопросов, Оппенгеймер вместе с членами своего комитета примкнул к рядам Теллера, Уилера и других сторонников супербомбы, и проект ускоренными темпами двинулся вперед к созданию и испытанию бомбы. Она работала так, как и предсказывали расчеты группы Уилера и работавшей параллельно лос-аламосской группы.

Обширные расчеты конструкции бомбы, выполненные группой Уилера, в окончательном виде были описаны в секретном документе «Проект Маттерхорн. Раздел В. Доклад 31» или «РМВ-31». «Мне сообщили, — рассказывал Уилер, — что, по крайней мере, в течение десяти лет «РМВ-31» служил библией для разработчиков термоядерных устройств» (водородных бомб).

* * *

В 1949–1950 гг., когда Америка находилась в состоянии паники, а Оппенгеймер, Теллер и другие дискутировали, должна ли страна формировать свою программу разработки супербомбы, соответствующая программа в Советском Союзе шла полным ходом.

Весной 1948 г., за 15 месяцев до испытания первой советской атомной бомбы, Зельдович и его команда, работавшая на «Объекте», провели теоретические расчеты супербомбы — конструкции, аналогичной «обреченной» американской³. В июне 1948 г. в Москве под руководством Игоря Тамма, одного из самых выдающихся советских теоретиков, была организована вторая группа для разработки супербомбы. Ее членами стали Виталий Гинзбург, Андрей Сахаров (который в 1970-х станет диссидентом, а затем — героем и советским святым в конце 1980-х — начале 1990-х годов), Семен Беленький и Юрий Романов. Команде Тамма было поручено проверить и уточнить вычисления группы Зельдовича.

Отношение команды Тамма к этой задаче раскрывается в высказывании Беленького, цитируемом Сахаровым: «Наша работа — лизать Зельдовичу задницу». Зельдович, парадоксальным образом являвшийся одновременно сильной, требовательной личностью и чрезвычайно робким в политике человеком, *не был* самым популярным из советских физиков. Однако *он был* в числе самых блестящих. Ландау, руководивший маленькой вспомогательной группой разработчиков, время от времени получавшей указания от группы Зельдовича проанализировать тот или иной аспект конструкции бомбы, иногда за спиной Зельдовича называл его «эта сука, Зельдович», хотя тот почитал Ландау как лучшего судью корректности физических идей и как своего лучшего учителя, хотя формально никогда не посещал его лекций.

Сахарову и Гинзбургу понадобилось лишь несколько месяцев, чтобы найти гораздо лучшую конструкцию супербомбы, чем та «обреченная на провал», которую разрабатывали Зельдович и американцы. Сахаров предложил создать бомбу в виде слоеного пирога из чередующихся оболочек тяжелого распадающегося ядерного топлива (урана) и легкого термоядерного топлива, а Гинзбург придумал использовать в качестве топлива для реакции синтеза дейтерид лития (LiD). В про-

³ Сахаров полагал, что эта конструкция была непосредственно инспирирована информацией, полученной в Америке с помощью разведки, возможно, от Клауса Фукса. Зельдович, напротив, утверждал, что ни Фукс, ни какой-нибудь другой шпион не передавал сколько-нибудь существенной информации или идеи, которая бы уже не была известна его исследовательской команде; принципиальное значение советской разведки состояло в том, чтобы убедить советских политических лидеров, что физики знают, что делают.

цессе мощного взрыва ядра лития в LiD распадаются на два ядра трития, который соединяется с остающимся дейтерием, образуя ядра гелия, при этом высвобождается колоссальное количество энергии. Тяжелый уран усиливает взрыв, не позволяя слишком быстро уходить его энергии, помогая сжимать термоядерное топливо и добавляя к энергии синтеза энергию ядерного распада. Когда Сахаров представил свою идею, Зельдович сразу оценил ее перспективность. Слоеный пирог Сахарова и LiD Гинзбурга быстро переместились в фокус усилий по разработке советской супербомбы.

Чтобы еще более форсировать разработку супербомбы, Сахаров, Тамм, Беленький и Романов были переправлены на «Объект». Но не Гинзбург. Причина этого казалась очевидной: тремя годами ранее Гинзбург женился на Нине Ивановне, жизнерадостной прекрасной женщине, которая в начале 1940-х годов была брошена в тюрьму по сфабрикованному обвинению в заговоре с целью убийства Сталина. Она и ее предполагаемые сообщники якобы планировали застрелить Сталина из окна комнаты, в которой она жила, когда тот будет проезжать по Арбату. Во время заседания тройки, решавшей ее судьбу, вдруг выяснилось, что в ее комнате вообще нет окон, выходящих на Арбат, поэтому было проявлено необычное милосердие, и ее жизнь была спасена. Ее приговорили лишь к тюремному заключению и затем ссылке, а не к смерти. Однако заключения и ссылки оказалось достаточно, чтобы «запятнать» Гинзбурга, изобретателя LiD топлива для бомбы, и захлопнуть перед ним ворота «Объекта».

Гинзбург, предпочитавший фундаментальные физические исследования разработке бомбы, был этому только рад, а мир науки тоже выиграл: пока Зельдович, Сахаров и Уилер сконцентрировались на бомбах, Гинзбург решил загадку распространения в нашей Галактике космических лучей и вместе с Ландау, воспользовавшись законами квантовой механики, объяснил природу сверхпроводимости.

* * *

В 1949 г., когда советский проект атомной бомбы принес свой результат, Сталин приказал незамедлительно переключить все ресурсы советского государства на усилия по созданию супербомбы. Рабский труд зеков, центры теоретических исследований, промышленность, испытательные полигоны, многочисленные команды физиков по каждому аспекту конструкции — все должно было быть сфокусировано на попытке обогнать американцев в создании водородной бомбы. Обо всем этом американцы, вовлеченные в дебаты о том, стоит ли фор-

6. Схлопывается во что?

сировать разработку супербомбы, ничего не знали. Однако Америка имела лучшую технологию и мощный задел.

1 ноября 1952 г. американцы взорвали устройство типа водородной бомбы под кодовым названием *Майк*. Оно было создано для проверки изобретения Теллера—Улама и основывалось на теоретических расчетах команды Уилера и работавшей параллельно лос-аламосской группы. Основным топливом в нем был жидкий дейтерий. Для его сжижения и перекачки к месту взрыва использовалась огромная установка промышленных масштабов. В этом смысле устройство это не было бомбой, которую можно было бы доставить на самолете или ракете. Тем не менее, оно полностью разрушило остров Элуджлаб в атолле Эниветок в Тихом океане; оно было в 800 раз мощнее бомбы, убившей более 100 тысяч человек в Хиросиме.

5 марта 1953 г. в сопровождении траурной музыки радио Москвы объявило о смерти Иосифа Сталина. В Америке царила радость, а в СССР — горе. Андрей Сахаров писал жене Клавде: «Я нахожусь под влиянием смерти великого человека. Я думаю о его человечности».

12 августа 1953 г. в Семипалатинске Советы взорвали свою первую водородную бомбу. Американцы окрестили ее *Джо-4*, в ней использовалась конструкция слоеного пирога Сахарова и LiD термоядерное топливо, и она была достаточно малой, чтобы ее можно было доставить самолетом. Однако топливо Джо-4 зажигалось способом отличным от метода Теллера—Улама, и в результате Джо-4 была гораздо менее мощной, чем американский Майк: «только» 30 Хиросим по сравнению с 800 Майка.

Фактически, на языке американских физиков-разработчиков бомб, Джо-4 вообще не была водородной бомбой; она представляла собой усиленную атомную бомбу, т. е. атомную бомбу, энергия которой усилилась включением некоторого количества термоядерного топлива. Подобные усиленные атомные бомбы уже входили в американские боевые арсеналы, и американцы отказывались считать их водородными бомбами, поскольку конструкция слоеного пирога не позволяла поджигать произвольно большое количество термоядерного топлива. При такой конструкции, например, нельзя было создать оружие «страшного суда», в тысячи раз более мощное, чем в Хиросиме.

Но и 30 Хиросимами нельзя было пренебрегать, так же как и возможностью их доставки. И хотя Джо-4 было действительно грозным оружием, Уилер и другие американцы вздохнули с облегчением, поскольку новый советский руководитель, Георгий Маленков, больше не сможет им угрожать, так как у них есть новая настоящая супербомба.

1 марта 1954 г. американцы взорвали свою первую наполненную LiD бомбу. Она получила кодовое название *Браво* и, как и Майк, основывалась на расчетах групп Уилера и Лос-Аламоса и использовала изобретение Теллера—Улама. Мощность взрыва равнялась 1300 Хиросимам.

В марте 1954 г. Сахаров и Зельдович вместе пришли (независимо от американцев) к идее Теллера—Улама, и в течение нескольких месяцев все советские ресурсы были нацелены на ее воплощение в реальную супербомбу, которая имела бы столь большую разрушительную силу, какую можно было только пожелать. Для полной разработки и создания бомбы потребовалось лишь 18 месяцев. 23 ноября 1955 г. она была испытана. Сила взрыва составила 300 Хиросим.

Как и подозревал оппенгеймеровский Генеральный консультативный комитет, противясь форсированной программе разработки супербомбы, эти немисливо мощные бомбы, включая и монстра в 5000 Хиросим, взорванного позднее Советами в попытке запугать Джона Кеннеди, не были особенно привлекательны для военных ни в США, ни в СССР. Мощность оружия, имеющегося сейчас в российских и американских арсеналах, составляет примерно 30 бомб Хиросимы, а не тысячи. И хотя это настоящие водородные бомбы, их мощность не превышает мощности обычных больших атомных бомб.

Врезка 6.2

Почему советские физики делали для Сталина бомбу?

Почему Зельдович, Сахаров и другие великие советские физики так напряженно работали, чтобы сделать для Иосифа Сталина атомную и водородную бомбу? Сталин нес ответственность за гибель миллионов советских граждан: 6 или 7 млн крестьян и кулаков в период насильственной коллективизации в начале 1930-х годов, 2,5 млн человек из высших слоев военнослужащих, правительства и общества в период Великого террора в 1937–1939 гг., 10 млн из всех общественных слоев в тюрьмах и лагерях в 1930-х, 40-х и 50-х. Как мог физик, находящийся в здравом уме, вложить это *сверхоружие* в руки столь *злонамеренного* человека?

Задающие подобные вопросы забывают или ничего не знают об условиях — как физических так и психологических, — определявших жизнь в Советском Союзе в конце 40-х — начале 50-х годов.

1. Не успел Советский Союз выйти из самой кровавой и разрушительной войны в своей истории (войны с Германией, агрессором, убившим 27 млн советских людей и принесшим опустошение на их родную землю), как Уинстон Черчилль произвел первый залп в «холодной войне»: 5 марта 1946 г. в своей знаменитой речи в Фултоне (Миссури) Черчилль предупредил Запад о советской угрозе, употре-

бив выражение «железный занавес» для характеристики границ, установленных Сталиным вокруг своей империи. Сталинская пропагандистская машина «выдоила» из речи Черчилля все, что было можно, посеяв у советских граждан глубокий страх, что англичане и американцы могут внезапно напасть на них. Америка (внушала советская пропаганда*) запланировала внезапный удар с помощью 300 атомных бомб, доставляемых на самолетах и нацеленных на 300 советских городов. Большинство советских физиков верили этой пропаганде и безоговорочно принимали абсолютную необходимость того, чтобы СССР создал свое ядерное оружие для защиты от возможного повторения гитлеровского опустошения.

2. Сталинский государственный механизм контроля над информацией и промывания мозгов был настолько эффективен, что даже среди ведущих ученых мало кто мог понять жестокость этого человека; большинство советских физиков (включая и Сахарова), как и большинство советских граждан, почитали Сталина как Великого Вождя — строгого, но справедливого диктатора, который обеспечил победу над Германией и теперь защитит людей от враждебного окружения. Советские физики ужасались тому, что зло поразило нижние этажи власти: малейшего обвинения со стороны кого-то, кого вы едва знали, могло оказаться достаточно, чтобы обречь вас на тюремное заключение, а часто и на смерть. (В конце 1960-х Зельдович при мне вспоминал, как это было: «Сейчас такая замечательная жизнь, среди ночи больше не раздается стук в дверь, и ничьи друзья больше не пропадают без вести».)

Однако большинство физиков не верило, что источником этого зла мог быть Великий Вождь, это кто-то другие, ниже его. (Ландау понимал больше; он о многом узнал в тюрьме. Однако психологически подавленный заключением, он редко заговаривал о вине Сталина, а когда говорил, друзья ему не верили.)

3. Хотя все жили в страхе, информация контролировалась настолько тщательно, что никто не мог себе даже представить масштаба потерь, нанесенных Сталиным. Эти потери станут известны лишь в горбачевскую эпоху гласности, в конце 1980-х.

4. Многие советские физики были «фаталистами». Они вообще об этом не задумывались. Жизнь была настолько тяжела, что приходилось сражаться лишь за то, чтобы она продолжалась, выполняя любую работу, какой бы она ни была, наилучшим образом. Кроме того, техническая задача — понять, как сделать работающую бомбу, — казалась захватывающей, да и сама работа в коллективе талантливых разработчиков приносила удовольствие, престиж и хорошую зарплату.

Военным никогда не требовалось оружие «конца света». Единственным применением таких устройств могло бы быть лишь психологическое запугивание противника, но такое запугивание может быть серьезной проблемой в мире лидеров, подобных Иосифу Сталину.

* Начиная с 1945 г. американские стратегические планы действительно включали положение о массированных ядерных атаках на советские города, военные и промышленные объекты, в случае если СССР развязывал обычную войну; см. Браун (1978).

2 июля 1953 г. Комиссию по атомной энергии возглавил Леви Штраусс, который будучи рядовым членом комиссии, жестко боролся с Оппенгеймером за форсированную разработку супербомбы. Первым его актом власти стало изъятие соответствующих материалов из кабинета Оппенгеймера в Принстоне. У Штраусса, как и у многих других в Вашингтоне, имелись глубокие сомнения в лояльности Оппенгеймера. Как человек, преданный Америке, мог противодействовать сверхусилиям Уилера и его команды воплотить изобретение Теллера—Улама? Будучи во время этих широких дебатов главным консультантом Объединенного комитета по атомной энергии конгресса США, Уильям Борден послал Дж. Эдгару Гуверу (руководителю ФБР) письмо, в котором, в частности, утверждалось: «Целью этого письма является выражение окончательно сформировавшегося у меня убеждения, основанного на многолетнем изучении доступных свидетельств, что более вероятно то, что Дж.Роберт Оппенгеймер агент Советского Союза, чем то, что он им не является». Результаты предыдущей проверки благонадежности Оппенгеймера были аннулированы, и в апреле и мае 1954 г., одновременно с началом первых испытаний американской доставляемой водородной бомбы, Комиссия по атомной энергии провела слушания с целью определить, представлял ли Оппенгеймер или нет опасность для национальной безопасности.

Уилер во время слушаний находился в Вашингтоне по какому-то другому делу и в них не участвовал. Однако его близкий друг Теллер вечером накануне своего выступления со свидетельскими показаниями зашел к нему в отель и в течение нескольких часов мерил шагами комнату. Если бы Теллер изложил то, что он в действительности думал, это могло бы серьезно повредить Оппенгеймеру. Но мог ли он этого не делать? У Уилера не было сомнений — честность Теллера обязывала его дать все свидетельские показания.

Уилер был прав. На следующий день Теллер, согласившись с точкой зрения Уилера, заявил: «В огромном числе случаев я наблюдал, что доктор Оппенгеймер действовал ... таким образом, что мне это было довольно трудно понять. Во многих случаях я был с ним серьезно не согласен, а его поведение, честно говоря, казалось мне странным и сложным. Исходя из этого... я хотел бы видеть жизненные интересы страны в руках того, кого я лучше понимаю и поэтому больше доверяю. ... Я верю (а это в основном вопрос веры, и за ним не стоит какой-то опыт или реальная информация), что характер доктора Оппенгеймера таков, что он не стал бы делать чего-то, что бы, по его мнению, подвергло бы риску безопасность нашей страны. В этом смысле, если ваш вопрос касается его целей, я не вижу никаких причин отвергать

6. Схлопывается во что?

его благонадежность. Если же это вопрос мудрости и здравого смысла, продемонстрированного им в действиях, начиная с 1945 г., то я бы сказал, что было бы умнее не доверять ему».

Почти все остальные физики, дававшие показания, безоговорочно поддержали Оппенгеймера и были поражены свидетельством Теллера. Несмотря на это и несмотря на отсутствие убедительных свидетельств того, что Оппенгеймер был «агентом Советского Союза», климат того времени возобладал, было объявлено, что Оппенгеймер представляет риск для безопасности страны, и ему было отказано в восстановлении допуска к секретным сведениям.

Для большинства американских физиков Оппенгеймер стал невинной жертвой, а Теллер — настоящим злодеем. До конца жизни Теллер будет подвергаться остракизму со стороны физического сообщества. Но Уилер считал, что жертвой стал именно Теллер. Уилер верил, что Теллер «имел мужество честно выразить свое мнение, поставив национальную безопасность выше солидарности сообщества физиков». Такие свидетельства с точки зрения Уилера «заслуживают признательности», а не остракизма. С этим согласился 35 годами позже Андрей Сахаров⁴.

Рождение черных дыр: все более глубокое понимание

Глубокие различия между Оппенгеймером и Уилером состояли не только в их отношении к проблемам национальной безопасности, но и в подходе к теоретической физике. Если Оппенгеймер прокладывал свой путь вблизи предсказаний утвердившихся физических законов, то Уилера толкала вперед жажда узнать, что лежит за пределами установленных законов. Он постоянно вторгался в области, где не срабатывали известные законы и в игру вступали новые. Он пытался проскочить в XXI век, взглянуть на то, как могли бы выглядеть законы физики за пределами ограничений текущего века.

Из всех мест, откуда можно было бросить такой взгляд, ни одно не казалось Уилеру в 1950-х годах и позднее столь же многообещающим, как стык общей теории относительности (область большого) и квантовой механики (область малого). Общая теория относительности

⁴ К слову, я совершенно не согласен с Уилером (хотя он был моим близким другом и учителем) и Сахаровым. Для вдумчивого и внимательного разбора споров Теллера с Оппенгеймером и всех pro и contra в американских дебатах о создании супербомбы я рекомендую прочесть книги Бете (1982) и Йорка (1976). Точка зрения Сахарова изложена в его книге воспоминаний (1990); с критикой Сахарова выступает Бете (1990). Изложение слушаний по делу Оппенгеймера можно прочесть в USAEC (1954).

и квантовая теория никак логически и последовательно не увязывались друг с другом. Они были как ряды и колонки кроссворда при первых попытках его разгадать, когда между вписанными наугад словами по горизонталям и вертикалям обнаруживается логическая несогласованность:

					М	
	К				Е	
Т	Е/В	О	Р	И	Я/Х	
	А				А	
	Н				Н	
О	Т	Н	О	С	И	Т Е Л Ь Н О С Т И
	О				К	
	В				А	
	А					
	Я					

Там, где слово ТЕОРИЯ по горизонтали требовало букву Е, слово КВАНТОВАЯ хотело В, а где слову ТЕОРИЯ нужна буква Я, слово по вертикали МЕХАНИКА требует Х. Глядя на горизонтали и вертикали, мы замечаем, что или то, или другое, или все слова одновременно для согласованности должны быть заменены. Точно так же при взгляде на законы общей теории относительности и квантовой механики становилось очевидно, что либо одна, либо другая, либо обе теории вместе должны быть изменены для получения логического согласия между ними.

Если бы такого согласия удалось достигнуть, то возникшее в результате объединение общей теории относительности и квантовой теории дало бы новый набор мощных физических законов, названный физиками «квантовая гравитация». Однако понимание того, как «поженить» общую теорию относительности с квантовой теорией, в 1950-х годах было еще настолько примитивно, что, несмотря на приложенные весьма значительные усилия, никому не удалось добиться какого-либо прогресса.

Медленным было и продвижение в понимании фундаментальных строительных блоков атомных ядер — нейтронов, протонов, электронов и множества других элементарных частиц, полученных на ускорителях.

Уилером владела мечта — пробраться через все эти дебри и одним взглядом охватить природу квантовой гравитации и элементарных

6. Схлопывается во что?

частиц. По его мнению, такая возможность возникает в процессе поиска парадоксов в теоретической физике. С решением парадокса приходит более глубокое понимание. Чем глубже парадокс, тем скорее такое новое понимание поможет вырваться за границы XX века.

Поэтому вполне в духе сказанного было то, что, вынырнув из проекта супербомбы, Уилер вместе с Гаррисоном и Вакано вскоре заполнил провалы в нашем знании о холодных мертвых звездах (глава 5); по этой же причине он задумался о конечной «судьбе гигантских масс». Здесь был заключен парадокс как раз такого типа, какой искал Уилер: никакая холодная мертвая звезда не может быть тяжелее примерно двух солнечных масс. И в то же время космос, кажется, изобилует гораздо более массивными тяжелыми звездами — звездами, которые когда-нибудь должны остыть и умереть. Оппенгеймер, в свойственной ему прямолинейной манере, спросил у известных физических законов: что происходит с такими звездами? И получил (совместно со Снайдером) ответ, весьма взбудораживший Уилера. Была подкреплена уверенность Уилера в том, что, разобравшись в судьбе гигантских масс, он сможет бросить взгляд за пределы физики XX века. Как мы увидим в главах 12 и 13, Уилер оказался прав.

В душе Уилера разгорелся огонь — непрерывное страстное желание понять судьбу больших гигантских масс и узнать, не поможет ли эта их судьба открыть загадку квантовой гравитации и элементарных частиц. Оппенгеймера же в 1958 г. все это, казалось, мало заботило. Он был уверен в своих совместных со Снайдером расчетах, но не выказывал желания продвигаться дальше, к более глубокому пониманию. Возможно, он устал от напряженных сражений предыдущих двух десятилетий: борьбы за создание нового оружия, политических и личных схваток. Может быть, был сыт загадками неведомого. В любом случае он больше уже не будет участвовать в получении ответов. Факел был передан новому поколению. Наследие Оппенгеймера станет основой для исследований Уилера, а в Советском Союзе наследие Ландау станет фундаментом для работы Зельдовича.

* * *

В брюссельском споре 1958 г. с Оппенгеймером Уилер утверждал, что расчетам Оппенгеймера—Снайдера нельзя доверять. Почему? Из-за слишком сильной идеализации. Конкретнее, Оппенгеймер изначально полагал, что схлопывающаяся звезда вообще не имеет давления. Без давления в схлопывающемся веществе звезды не могли образоваться ударные волны (аналог разбивающихся и пенящихся океанских волн).

При отсутствии давления и ударных волн схлопывающееся вещество не могло бы нагреться. Без тепла и давления не может начаться ядерная реакция и невозможно излучение. Без исходящего излучения, сбрасываемого в ядерных реакциях вещества, давления и ударных волн у звезды нет другого способа потерять свою массу. При изначальном запрете на потерю массы у тяжелой звезды не остается возможностей когда-нибудь уменьшить свою массу до двух солнечных и стать холодной мертвой нейтронной звездой. Не удивительно поэтому, что схлопывающиеся звезды Оппенгеймера порождали черные дыры. Такая идеализация, как решил Уилер, и не позволила звездам сделать ничего больше рассчитанного!

В 1939 г., когда Оппенгеймер и Снайдер делали свою работу, было абсолютно безнадежно надеяться рассчитать во всех деталях схлопывание с реальным давлением (термическое давление, давление вырождения и давление, порождаемое ядерными силами), с ядерными реакциями, ударными волнами, нагревом, излучением и выбросом массы. Однако за прошедшее двадцатилетие усилия, направленные на создание ядерного оружия, обеспечили ученых подходящими для этого инструментами. Давление, ядерные реакции, ударные волны, нагрев, излучение, выброс массы — все это является основными характеристиками водородной бомбы, без этого бомба не взорвется. Чтобы разработать водородную бомбу требовалось все это учесть в компьютерных вычислениях.

Группа Уилера, конечно, этим занималась. Поэтому теперь казалось совершенно естественным переписать компьютерные программы так, чтобы вместо моделирования взрыва водородной бомбы они моделировали взрыв массивной звезды. Это было бы вполне естественно при условии, если бы группа Уилера все еще существовала. Однако теперь команда была распущена; они вместе написали доклад РМВ-31 и рассеялись, чтобы учить, проводить физические исследования или стать администраторами в различных университетах и правительственных лабораториях.

Опыт создания американской бомбы теперь сконцентрировался в Лос-Аламосе и новой правительственной лаборатории в Ливерморе (Калифорния). В Ливерморе в конце 1950-х Стирлинга Колгейта пленила проблема схлопывания звезд с образованием черной дыры. С одобрения Эдварда Теллера и в сотрудничестве с Ричардом Уайтом (а позднее с Майклом Мэем) Колгейт принялся за моделирование процесса схлопывания на компьютере. Модель Колгейта–Уайта–Мэя сохраняла часть идеализаций Оппенгеймера. Они взяли за основу предположение, что схлопывающаяся звезда является сферической и не вращается. Без этих

6. Схлопывается во что?

ограничений расчеты были бы невообразимо более сложными. Однако их модель принимала в расчет все то, что волновало Уилера: давление, ядерные реакции, ударные волны, нагрев, излучение, выброс массы — и делала это основательно, опираясь на опыт разработки бомбы и машинные коды. Для отладки программ моделирования потребовалось несколько лет, но к началу 1960-х они уже хорошо работали.

Однажды в начале 1960-х годов Джон Уилер ворвался в аудиторию Принстонского университета, где он вел занятия по теории относительности и которые я, в то время аспирант, посещал. Он немного опоздал, но сиял от удовольствия. Уилер только что вернулся из поездки в Ливермор, где увидел результаты последних расчетов Колгейта, Уайта и Мэя. Взволнованно он чертил на доске диаграмму за диаграммой, объясняя то, что обнаружили его ливерморские друзья.

Если схлопывающаяся звезда имеет малую массу, то она вызывает взрыв сверхновой и формирует черную дыру именно так, как предполагал тридцатью годами ранее Цвикки. Когда масса звезды много больше максимума, равного 2 солнечным массам, схлопывание (несмотря на давление, ядерные реакции, ударные волны, нагрев и излучение) порождает черную дыру. Процесс рождения черной дыры замечательным образом совпадал с сильно идеализированной моделью, рассчитанной почти 25 лет назад Оппенгеймером и Снайдером. Наблюдаемое снаружи схлопывание замедляется и совершенно замораживается при критической длине окружности, но если наблюдать с поверхности звезды, никакого замораживания не происходит. Поверхность звезды непрерывно, без всяких отклонений продолжает сжиматься все дальше, проходя критический размер.

Фактически для Уилера это не явилось неожиданностью. Другие (о них речь пойдет позже) уже превратили его из критика черных дыр Оппенгеймера в их восторженного сторонника. Но здесь впервые появилось конкретное доказательство, полученное в ходе реалистичного компьютерного моделирования: схлопывание должно порождать черные дыры.

Был ли Оппенгеймер доволен подобным превращением, произошедшим с Уилером? Нет, он не проявлял особого интереса и не выказывал удовлетворения. На международной конференции в Далласе (Техас) в декабре 1963 г. по случаю открытия квазаров Уилер сделал большой доклад о схлопывании звезд. В нем он восторженно описал расчеты 1939 г. Оппенгеймера и Снайдера. Оппенгеймер присутствовал на конференции, но во время доклада Уилера сидел в холле на скамейке и болтал с друзьями на посторонние темы. Через 30 лет Уилер с грустью вспоминал об этом событии.

В конце 1950-х годов Зельдовичу начала надоедать его работа по разработке оружия. Большая часть интересных проблем уже была решена. В поиске новых задач, продолжая руководить командой разработчиков бомбы на «Объекте», а также другой группой, проводящей вспомогательные расчеты в Институте прикладной математики в Москве, он часть своего времени обращал сначала на теорию элементарных частиц, а затем на астрофизику. В работе по созданию бомб Зельдович «бомбардировал» свою команду идеями, а члены группы проводили вычисления, чтобы проверить, будут ли идеи работать. «Искры Зельдовича, бензин его группы», — так это описывал Гинзбург. Обратившись к астрофизике, Зельдович сохранил свой стиль.

Схлопывание звезд было одной из астрофизических проблем, захвативших его воображение. Так же как и Уилеру, Колгейту, Мэю и Уайту в Америке, ему было очевидно, что методы, разработанные при конструировании водородной бомбы, идеально подходили для математического моделирования схлопывающихся звезд.

Чтобы детально разобраться в загадке схлопывания, Зельдович взял в оборот нескольких молодых коллег: Дмитрия Надеждина, Владимира Имшенника из Института прикладной математики и Михаила Подурца с «Объекта». В ходе интенсивных дискуссий он передал им свое видение того, как схлопывание звезд может моделироваться на компьютере, при учете всех ключевых эффектов, которые были столь же важны и для водородных бомб: давления, ядерных реакций, ударных волн, теплоты, излучения, выброса массы. Вдохновленные этими дискуссиями, Имшенник и Надеждин смоделировали схлопывание звезд малой массы, а также — независимо от Колгейта и Уайта в Америке — представления Цвикки о сверхновых. Параллельно Подурец смоделировал схлопывание массивных звезд. Результаты Подурца, опубликованные почти одновременно с результатами Мэя и Уайта, были почти идентичны американским. Сомнений не оставалось: схлопывание порождает черные дыры, и именно таким образом, как предсказали Оппенгеймер и Снайдер.

Адаптация машинных программ разработки бомбы для моделирования схлопывания звезд — лишь одна из многих близких связей между ядерным оружием и астрофизикой. Эти связи были очевидны и Сахарову в 1948 г. Когда ему приказали вступить в группу разработчиков

6. Схлопывается во что?

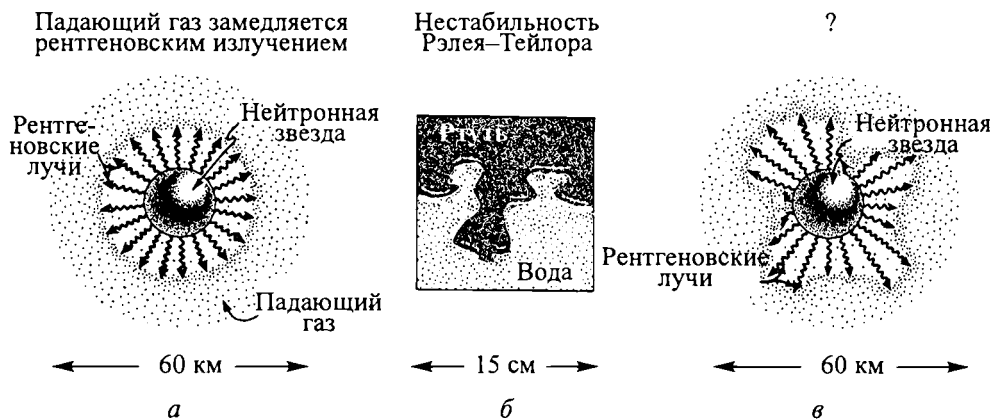
бомбы под руководством Тамма для освоения проблемы, он погрузился в изучение астрофизики. В 1969 г. неожиданно и я наткнулся на эту взаимосвязь.

Я никогда не стремился узнать, в чем именно состояла идея Теллера—Улама/Сахарова—Зельдовича. Супербомба, которая (если исходить из главного достоинства их идеи) могла быть «сколь угодно мощной», казалась мне чем-то непристойным, и мне даже не хотелось рассуждать о том, как она работает. Однако в процессе поиска понимания роли нейтронных звезд во Вселенной идея Теллера—Улама проникла в мое сознание.

За несколько лет до этого Зельдович обратил внимание на то, что газ из межзвездного пространства или от близлежащей звезды, падая на нейтронную звезду, должен нагреваться и ярко светиться. Фактически газ должен стать настолько горячим, что сможет испускать в основном рентгеновские лучи высокой энергии, а не обычный, менее энергетичный свет. Падающий газ определяет уровень испускания рентгеновских лучей. Зельдович доказывал, что верно и обратное: рентгеновское излучение контролирует количество падающего газа. Таким образом, оба фактора — газ, и рентген, работая вместе, дают устойчивый, *саморегулирующийся поток*. Если скорость газа при падении слишком велика, то он будет порождать сильное рентгеновское излучение, и испускаемые рентгеновские лучи будут ударяться о падающий газ, создавая давление, направленное наружу, которое замедлит падение газа (рис. 6.4а). Если же газ падает с малой скоростью, он дает так мало рентгеновских лучей, что они не смогут тормозить падение газа, и поток будет увеличиваться. Существует только определенная скорость падения газа, не слишком высокая и не слишком низкая, при которой рентгеновское излучение и газ находятся во взаимном равновесии.

Эта картина падения газа и рентгеновского излучения не давала мне покоя. Я хорошо знал, что если на Земле попытаться удержать плотную жидкость, такую, как жидкая ртуть, с помощью менее плотной жидкости, такой, как вода, находящаяся ниже, то языки ртути в воде быстро проложат себе дорогу, и ртуть моментально проскочет вниз, а вода поднимется вверх (рис. 6.4б). Это явление называется *неустойчивостью Рэлея—Тейлора*. В картине Зельдовича рентгеновские лучи подобны воде, имеющей малую плотность, а падающий газ — плотной ртути. Не «проложат» ли себе дорогу языки газа сквозь рентгеновские лучи, и не будет ли после этого газ свободно падать вдоль этих языков, разрушая саморегулирующийся поток Зельдовича (рис. 6.4в)?

Тщательный расчет, проведенный на основании физических законов, помог бы мне узнать, происходит ли все это в действительности.



6.4. (а) Газ, падающий на нейтронную звезду, замедляется давлением рентгеновского излучения. (б) Пытающаяся упасть в гравитационном поле Земли жидкая ртуть удерживается лежащей ниже водой; в результате проявляется неустойчивость Рэлея–Тейлора. (в) Может ли возникнуть неустойчивость Рэлея–Тейлора и для падающего газа, сдерживаемого рентгеновским излучением нейтронной звезды?

Однако подобный расчет был бы очень сложен и отнял бы много времени, поэтому вместо того чтобы браться за него, я однажды решил поговорить об этом с Зельдовичем, когда мы обсуждали различные вопросы физики на его квартире в Москве, в 1969 г.

Я задал вопрос, Зельдович выглядел немного смущенным, но его ответ был уверенным: «Нет, Кип, это не происходит. В рентгеновских лучах нет языков. Поток газа стабилен». «Откуда вы знаете, Яков Борисович?» — спросил его я. Удивительно, но ответа я добиться не смог. Казалось ясным, что Зельдович (или кто-то еще) проделал детальный расчет или эксперимент, показывающий, что рентгеновское излучение может оказывать давление на газ без образования языков Рэлея–Тейлора, разрушающих это давление. Но Зельдович не мог мне указать на такой расчет или эксперимент, описанный в опубликованной работе, не мог он мне описать и физику происходящего. Как это было для него нехарактерно!

Несколькими месяцами позже я путешествовал с Колгейтом в горах Калифорнии. (Колгейт — один из лучших экспертов в Америке по течению жидкости и излучению, был глубоко вовлечен в американский проект супербомбы на его последнем этапе и был одним из тех трех ливерморских физиков, которые моделировали схлопывание звезд на компьютере.) Когда мы там путешествовали, я поставил перед Колгейтом тот же самый вопрос, который раньше задавал Зельдовичу, и мне был дан тот же самый ответ: поток устойчив; газ не

6. Схлопывается во что?

может обойти силы давления рентгеновского излучения образованием языков. «Откуда ты знаешь, Стирлинг?» — спросил я. «Это было показано», — ответил он. «Где я могу найти этот расчет или результаты эксперимента?» — спрашиваю я. «Не знаю» ... «Это очень странно, — заявил я Стирлингу, — Зельдович сказал мне в точности то же самое — поток стабилен. Но он, как и ты, не представил мне никаких доказательств». «О! Это очаровательно. Значит, Зельдович действительно знал», — ответил Стирлинг.

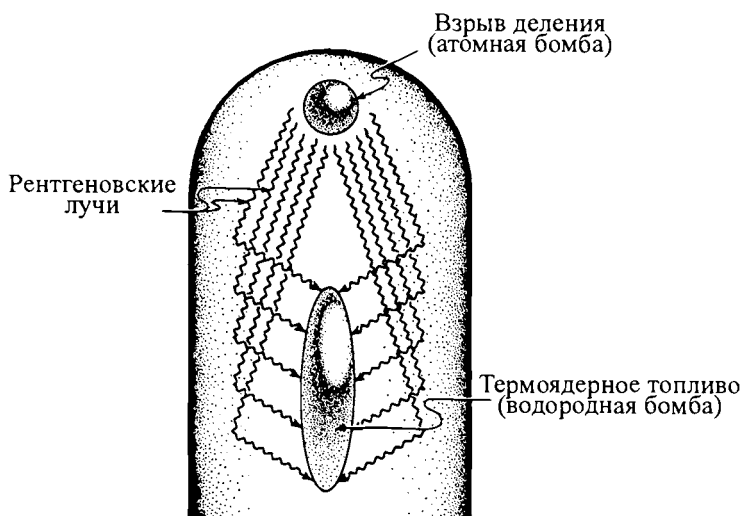
И тогда я все понял. Я не хотел знать, но вывод напрашивался сам собой. Идея Теллера—Улама, судя по всему, состояла в использовании рентгеновского излучения, испущенного в первую микросекунду начала распада [атомной бомбы] для того, чтобы помочь сжать и поджечь термоядерное топливо супербомбы (рис. 6.5). То, что это действительно было частью идеи Теллера—Улама, было подтверждено в 1980-х несколькими открытыми публикациями в Америке, иначе я бы об этом здесь не упоминал.

Что заставило Уилера превратиться из скептика по отношению к черным дырам в их сторонника и защитника? Компьютерная модель схлопывающихся звезд стала лишь окончательным подтверждением этого превращения. Гораздо более важным было разрушение ментального барьера. Этот ментальный барьер был распространен в среде физиков-теоретиков с 1920 по 1950-е годы. Частично на него повлияла та самая сингулярность Шварцшильда, перенесенная затем на черные дыры. Частично повлиял и загадочный, кажущийся парадоксальным вывод из упрощенных расчетов Оппенгеймера и Снайдера, состоящий в том, что схлопывающаяся звезда оказывается навсегда замороженной на критической окружности («сингулярность Шварцшильда») с точки зрения покоящегося внешнего наблюдателя, но быстро схлопывается, пройдя через точку замораживания и далее, — при наблюдении с поверхности звезды.

В Москве Ландау и его коллеги, хотя и верили в расчеты Оппенгеймера и Снайдера, столкнулись с серьезными проблемами, пытались примирить эти две системы отсчета. «Трудно смириться с тем, насколько тяжело человеческому уму понять, как эти две точки зрения могут быть одновременно правильными», — рассказывал мне несколько лет спустя Евгений Лифшиц — ближайший друг Ландау.

В один из дней 1958 г., года, в котором Уилер атаковал выводы Оппенгеймера и Снайдера, в Москву пришел выпуск *Physical Review* со статьей Дэвида Финкельштейна — неизвестного постдока из малоизвестного американского университета — Стивенсовского института

ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ И СКЛАДКИ ВРЕМЕНИ



6.5. Схематический рисунок, показывающий один из аспектов идеи конструкции водородной бомбы Теллера–Улама/Сахарова–Зельдовича: ядерный взрыв (атомная бомба как запал) порождает интенсивное рентгеновское излучение, которое каким-либо образом фокусируется на термоядерном топливе (дейтериде лития, LiD). Рентгеновское излучение предположительно должно нагреть топливо и помочь сжимать его в течение времени, достаточного для начала реакции термоядерного синтеза. Технология фокусировки рентгеновских лучей и другие практические проблемы настолько труднопреодолимы, что знание этой доли «секрета» Теллера–Улама составляет бесконечно малый отрезок пути к созданию действующей супербомбы

технологии в Хобокене (Нью-Джерси). Ландау и Лифшиц прочли статью. Это было как откровение. Неожиданно все стало ясно⁵.

В том же году Финкельштейн посетил Англию и прочел лекции в Королевском колледже в Лондоне. Роджер Пенроуз (позже он таким же образом изменит наше понимание того, что происходит внутри черной дыры) поездом приехал в Лондон, чтобы послушать лекцию Финкельштейна, и восторженный вернулся в Кембридж.

Уилера в Принстоне идея Финкельштейна сначала заинтриговала, но полностью он ее не принял. Со временем, но лишь постепенно, в ходе исследований через несколько лет он с ней согласится. Уилер все воспринимал медленнее, чем Ландау или Пенроуз и, как мне кажется, потому, что заглядывал глубже. Он был заиклен на предположении о том, что квантовая гравитация может вынуждать нуклоны (нейтроны и протоны) внутри схлопывающейся звезды превращаться в излучение

⁵ Открытие Финкельштейна в действительности было сделано еще раньше, в другой связи, другими физиками, включая Эддингтона, но они не поняли его важности, и все было быстро забыто.

6. Схлопывается во что?

и предотвращать таким образом схлопывание. Казалось, что это представление невозможно совместить с идеей Финкельштейна. Тем не менее, в определенном глубоком смысле и предположение Уилера, и идея Финкельштейна были верны.

* * *

Так в чем же состояла идея Финкельштейна? Финкельштейн довольно случайно открыл укладывающуюся всего в две строчки математических преобразований новую систему отсчета, в которой можно описывать геометрию пространства-времени Шварцшильда. Мотивы исследования у Финкельштейна были другие, и он не провел связи между своей новой системой отсчета и схлопыванием звезд. Однако для других исследователей выводы его новой системы отсчета были ясны: она открыла им совершенно новую перспективу на схлопывающиеся звезды.

Геометрия пространства-времени вне сжимающейся звезды при этом совпадает с геометрией Шварцшильда и, таким образом, схлопывание звезды может быть описано с использованием новой системы отсчета Финкельштейна. Его система существенно отличалась от тех, с которыми мы ранее встречались (главы 1 и 2). Большинство из них (воображаемые лаборатории) были малы, и все составляющие каждой системы отсчета (верх, низ, стороны, середина) покоились друг относительно друга. Напротив, система отсчета Финкельштейна была настолько велика, что одновременно включала области пространства-времени далеко от звезды, области вблизи нее, и все промежуточные области. Еще важнее то, что различные части этой системы отсчета находятся в движении друг относительно друга. Части, расположенные далеко от звезды остаются статичными, т. е. не сжимаются, тогда как части вблизи звезды падают внутрь, вместе с ее поверхностью. Соответственно, система отсчета Финкельштейна могла быть использована для одновременного описания схлопывания звезды, как с точки зрения удаленного покоящегося наблюдателя, так и с точки зрения наблюдателей, падающих внутрь вместе со схлопывающейся звездой. Получающееся описание прекрасно примиряло замораживание схлопывания для удаленного наблюдателя и продолжающееся движение при наблюдении с поверхности звезды.

В 1962 г. два члена принстонской исследовательской группы Уилера — Дэвид Бекедорф и Чарльз Мизнер — построили последовательность вложенных диаграмм с целью проиллюстрировать это согласие. А в 1967 г. для статьи в *Scientific American* я преобразовал их вложенные диаграммы в следующую причудливую аналогию.

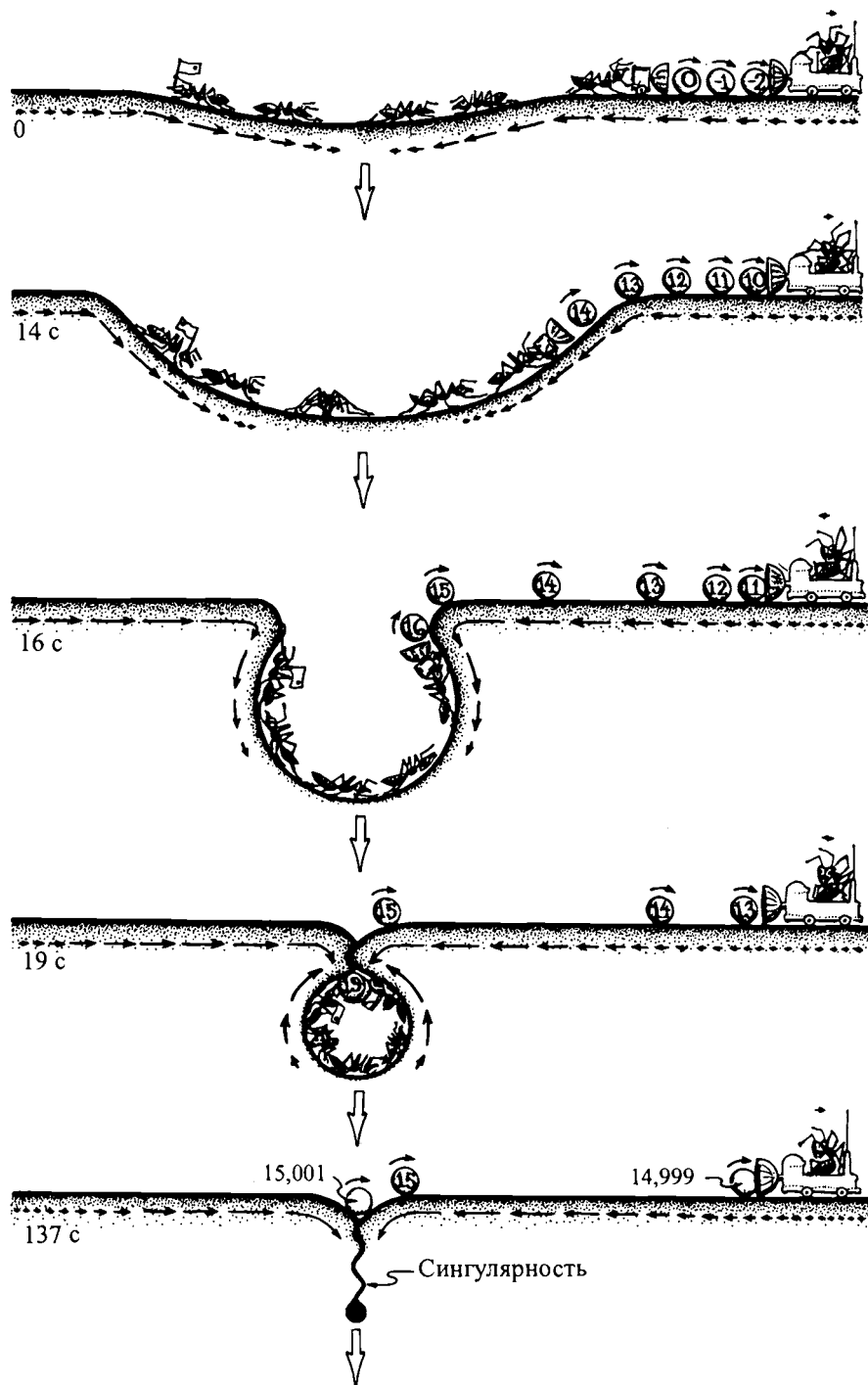


Дэвид Финкельштейн в 1958 г. [Фото Герберта С. Зонненфельда, предоставлено Дэвидом Финкельштейном]

Однажды на поверхности большой резиновой мембраны жили шесть муравьев (рис. 6.6). Эти муравьи, будучи весьма умными, научились общаться с помощью сигнальных мячей, катящихся с постоянной скоростью («скоростью света») по поверхности мембраны. К сожалению, муравьи не могли вычислять натяжение мембраны.

Однажды пять муравьев собрались вблизи центра мембраны, и их общий вес привел к тому, что мембрана начала под ними проваливаться. Они оказались в ловушке, из которой не смогли выбраться, поскольку не могли достаточно быстро уползти. Шестой муравей — муравей-астроном находился достаточно далеко, вместе со своим телескопом, работающим по принципу сигнальных мячей. Как только мембрана начала проваливаться (схлопываться, коллапсировать), пойманные муравьи стали отправлять сигнальные шарики муравью-астроному так, что он мог следить за их судьбой.

6. Схлопывается во что?



6.6. Проваливающаяся резиновая мембрана, населенная муравьями, дает наглядную аналогию гравитационного схлопывания звезды с образованием черной дыры [К.Торн, 1967]

Коллапс мембраны приводит к двум эффектам. Во-первых, ее поверхность сжимается, затягивая окружающие объекты к центру провала — точно так же, как гравитация схлопывающейся звезды притягивает объекты к своему центру. Во-вторых, мембрана прогибается и становится искривленной, чашеобразной формы аналогично искривленной форме пространства вокруг схлопывающейся звезды (ср. с рис. 6.2).

По мере развития коллапса поверхность мембраны сжимается все быстрее и быстрее. В результате сигнальные мячи, которые с одной и той же скоростью посылают попавшиеся муравьи, муравей-астроном получает через все большие интервалы времени. (Что аналогично покраснению света от схлопывающейся звезды.) Мяч номер 15 был послан через 15 с после начала обвала, точно в момент, когда попавшиеся муравьи проходили критическую длину окружности мембраны. Этот мяч навсегда остался на этой критической окружности, поскольку здесь мембрана сжималась точно со скоростью движения мячей (скоростью света). Лишь за 0,001 долю секунды до достижения критической окружности муравьи послали мяч номер 14,999. Этот мяч, едва опережающий сжатие мембраны, не достиг муравья-астронома вплоть до наступления 122-й секунды после начала катастрофы. Мяч номер 15,001, посланный через 0,001 секунды после прохождения критической окружности, оказался неумолимо затянут в сильно искривленную область и обрушился вместе с пятью попавшимися муравьями.

Однако муравей-астроном никогда не сможет узнать о катастрофе, он никогда не получит сигнальный мяч номер 15 или любой другой, пущенный после него. А тем, которые пущены как раз до него, понадобится настолько много времени, чтобы долететь, что этому муравью будет казаться, что обвал замедлился и заморозился как раз при критической длине окружности.

Эта аналогия замечательно достоверно воспроизводит поведение схлопывающейся звезды:

1. Форма мембраны в точности воспроизводит искривление пространства вокруг звезды (как это отражено на последовательных диаграммах).
2. Движение сигнальных мячей по мембране в точности такое же, как и движение фотонов света в искривленном пространстве схлопывающейся звезды. А именно, сигнальные мячи движутся со скоростью света, локально измеренной любым муравьем по отношению к мембране, и, тем не менее, мячам, пущенным как раз перед номером 15, требуется очень много времени, чтобы вылететь, — так много, что муравью-астроному кажется, что обвал прекратил-

6. Схлопывается во что?

ся. Точно так же фотоны, испущенные с поверхности звезды, движутся со скоростью света, если любой наблюдатель проведет локальные измерения, и, тем не менее, фотонам, излученным как раз перед тем, как звезда сожмется до критической окружности (ее горизонта), понадобится очень много времени, чтобы вылететь, поэтому внешнему наблюдателю схлопывание будет казаться замороженным.

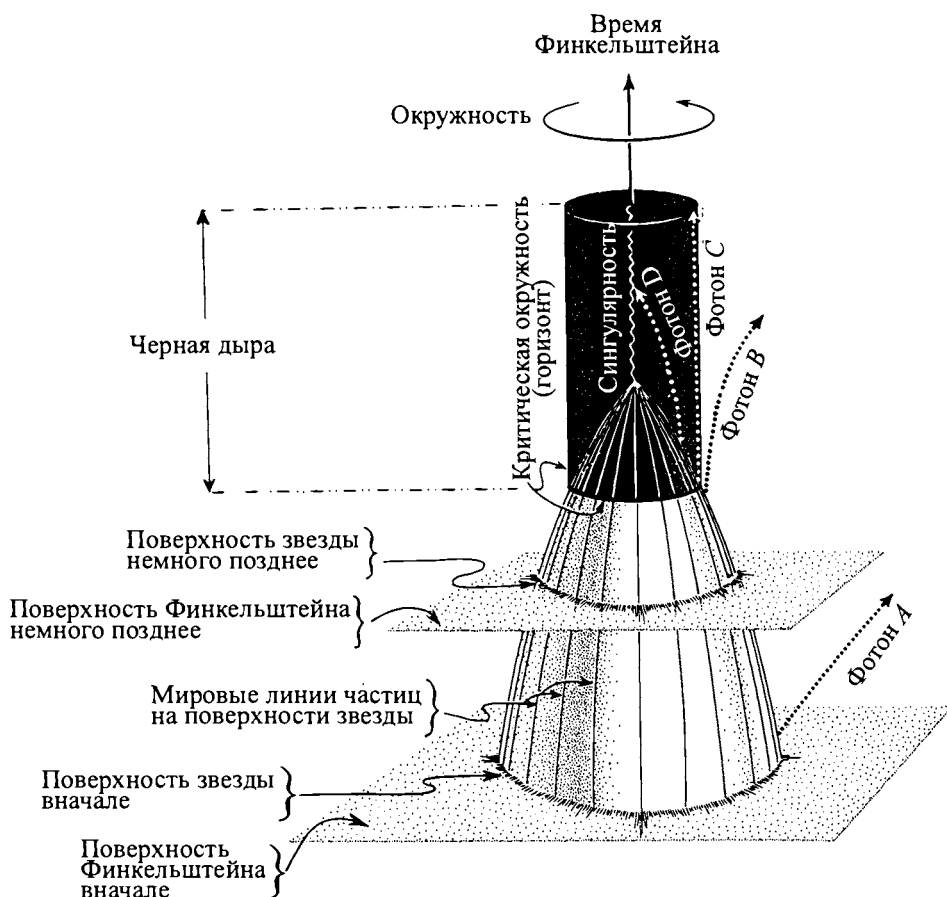
3. Попадавшие муравьи вообще не видят замедления при критической окружности. Они безостановочно затягиваются мембраной, проходя через критическую окружность, проваливаясь вниз. Точно так же каждый находящийся на поверхности схлопывающейся звезды не увидит замораживания сжатия. Он будет испытывать безостановочное схлопывание и будет раздавлен приливными силами.

Аналогия эта, переведенная в последовательные диаграммы, и была тем самым новым пониманием, рожденным новой системой координат Финкельштейна. При таком подходе к схлопыванию в нем больше не остается никакой тайны. Схлопывающаяся звезда действительно сжимается, без колебаний пересекая критическую окружность. А то, что она кажется замерзшей при наблюдении издалека, — просто иллюзия.

* * *

Последовательные диаграммы нашей притчи попавшихся муравьев раскрывают только некоторые стороны понимания, пришедшего с новой системой координат Финкельштейна, однако, отнюдь не все. Дальнейшее проникновение в суть проблемы отражено на рис. 6.7, который является *пространственно-временной диаграммой* схлопывающейся звезды.

Те пространственно-временные диаграммы, с которыми мы сталкивались до сих пор, например на рис. 1.3, лежали в плоском пространстве-времени специальной теории относительности. На рис.1.3 мы рассматривали эти диаграммы с двух точек зрения (игнорируя направленное вниз гравитационное притяжение Земли): относительно инерциальной системы отсчета, покоящейся относительно города Пасадена на рис. 1.3в, и относительно инерциальной системы отсчета, связанной со спортивной машиной, мчащейся по бульвару Колорадо в Пасадене на рис. 1.3б. На каждой диаграмме мы откладывали пространство системы отсчета по горизонтали, а время — по вертикали.



6.7. Пространственно-временная диаграмма, показывающая схлопывание звезды в черную дыру. По вертикали отложено время, измеренное в системе отсчета Финкельштейна. По горизонтали отложены два из трех измерений пространства в этой системе отсчета. Горизонтальные срезы являются двумерными мгновенными «снимками» схлопывающейся звезды и порождаемой черной дыры в выбранные моменты времени по Финкельштейну без учета пространственной кривизны

На рис. 6.7 выбрана система отсчета Финкельштейна. Соответственно, по горизонтали мы отложим две из трех пространственных координатных осей, измеренных в системе Финкельштейна («пространство Финкельштейна»), а по вертикали — время в этой системе («время Финкельштейна»). Так как вдали от звезды система отсчета Финкельштейна статична (не схлопывается), время Финкельштейна здесь то же, что и у неподвижного наблюдателя. И поскольку вблизи звезды система отсчета Финкельштейна падает внутрь вместе со схлопывающейся поверхностью, время Финкельштейна здесь то же, что и время, испытываемое падающим наблюдателем.

6. Схлопывается во что?

На схеме приведены два горизонтальных сечения. Они изображают два размера звезды в отдельные моменты времени, но с убранной пространственной кривизной, так что пространство выглядит плоским. В частности, окружности вокруг центра звезды на этих срезах показаны правильно, а радиусы (расстояния от центра) — неверно. Чтобы правильно отобразить и радиусы, и окружности, нам следует использовать вложенные схемы подобные тем, которые были приведены на рис. 6.2, или тем, что присутствовали в притче про муравьев (рис. 6.6). Тогда кривизна пространства была бы ясно видна: окружности были бы меньше, чем умноженный на 2π радиус. Рисуя горизонтальные разрезы плоскими, мы искусственно убираем их кривизну. Такое некорректное уплощение пространства — цена, которую мы платим за наглядность схемы. В обмен мы получаем возможность видеть и пространство, и время одновременно на одной и той же наглядной диаграмме.

На самом раннем этапе, показанном на схеме (нижний горизонтальный срез), звезда, при отсутствии одного пространственного измерения, представляет собой область внутри большой окружности. Если вернуть недостающее измерение, то звезда будет изображаться как внутренняя область большой сферы. Позднее (второй срез) звезда уменьшается в размерах и теперь она изображается внутренней областью меньшего круга. Затем звезда проходит критическую длину окружности, а еще позже она схлопывается до нулевой окружности, создавая в этом месте *сингулярность*, в которой, в соответствии с общей теорией относительности, звезда прекращает существование. Мы не будем пока обсуждать детали этой сингулярности, отложив это до главы 13, но важно понять, что это нечто совершенно отличное от «сингулярности Шварцшильда», о которой физики говорили с 20-х по 50-е годы. «Сингулярность Шварцшильда» была обозначением плохо представляемой ими критической окружности или черной дыры; а наша «сингулярность» — объект, расположенный в центре черной дыры.

Собственно, черная дыра — это область пространства-времени, показанная на диаграмме черным, т. е. область внутри критической окружности и в будущем поверхности схлопывающейся звезды. Поверхность черной дыры (ее *горизонт*) находится на критической окружности.

На диаграмме также показаны мировые линии (траектории в пространстве-времени) некоторых частиц, закрепленных на поверхности звезды. Если следовать глазом вверх по схеме (т. е. по течению времени), становится видно, что эти линии сходятся все ближе и ближе к центру звезды (к центральной оси диаграммы). Подобное движение демонстрирует сжатие звезды во времени.

Наибольший интерес представляют мировые линии четырех фотонов (четырёх частиц света), которые аналогичны сигнальным мячам в истории с муравьями. Фотон A излучается наружу с поверхности звезды в тот момент, когда звезда начинает схлопывание (нижнее сечение). Он с течением времени легко выбирается наружу (при движении глаза вверх по схеме), достигая все больших окружностей. Фотону B , испущенному незадолго до того, как звезда пересечет критическую окружность, потребуется много времени, чтобы вылететь; в истории про муравьев он аналогичен мячу номер 14,999. Фотон C , испущенный точно с критической окружности, навсегда здесь и останется, так же как и сигнальный мяч номер 15. А фотон D , выпущенный изнутри критической окружности (изнутри черной дыры), никогда не выберется наружу; он окажется затянутым в сингулярность интенсивной гравитацией черной дыры, в точности, как мяч номер 15,001.

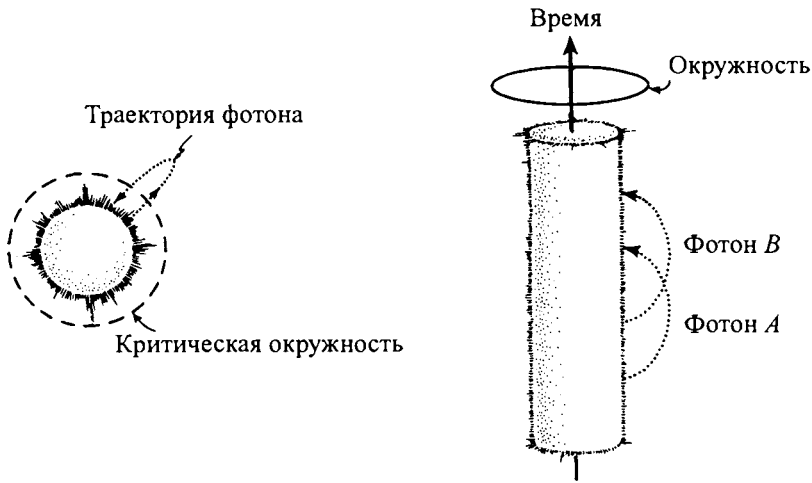
Интересно противопоставить такое современное понимание распространения света, испущенного с поверхности схлопывающейся звезды, предсказаниям поведения света, излученного звездой, размер которой меньше, чем ее критическая окружность, сделанным в XVIII веке.

Вспомним (глава 3), что в конце XVIII столетия Джон Митчелл в Англии и Пьер Симон Лаплас во Франции воспользовались законами гравитации Ньютона и корпускулярным описанием света Ньютона, чтобы предсказать существование черных дыр. Эти «ньютоновские черные дыры» фактически представляли собой статичные звезды столь малого размера (меньше, чем критическая длина окружности), что гравитация не позволяла свету покинуть окрестность звезды.

Левая часть рис. 6.8 (диаграмма пространства, а не пространства-времени) показывает такую звезду внутри критической окружности, а также пространственную траекторию фотона (левая частица), испущенного почти вертикально (по радиусу) с поверхности звезды. Вылетающий подобно камню фотон замедляется притяжением гравитации звезды, останавливается и затем падает на звезду.

Правая часть рисунка изображает пространственно-временную диаграмму движения двух таких фотонов. Вверх отложено универсальное ньютоновское время, в стороны ньютоновское абсолютное пространство. Круглая звезда на диаграмме выглядит вертикальным цилиндром. В любой момент времени (если на диаграмме провести горизонтальное сечение) звезда изображается точно таким же кругом, как на левой картинке. Фотон A , выпущенный с поверхности звезды, падает по прошествии некоторого времени обратно, фотон B , выпущенный позже, ведет себя аналогично.

6. Схлопывается во что?



6.8. Предсказания движения световых корпускул (фотонов), испущенных звездой внутри критической окружности, вытекающие из законов физики Ньютона. *Слева:* пространственная диаграмма. *Справа:* пространственно-временная диаграмма

Поучительно сравнить это (неверное) ньютоновское представление звезды внутри ее критической окружности и излучаемых ею фотонов с (правильной) релятивистской версией, приведенной на рис. 6.7. Сравнение выявляет два существенных различия между предсказаниями законов Ньютона и законов Эйнштейна:

1. Законы Ньютона (рис. 6.8) разрешают звезде, имеющей размеры, меньшие, чем ее критическая окружность, вести счастливую жизнь, не схлопываясь, с гравитационным сжатием, полностью уравновешенным внутренним давлением. Законы Эйнштейна (рис. 6.7) настаивают, что в любой звезде, имеющей размер, меньший ее критической окружности, гравитационное сжатие будет настолько сильным, что никакое внутреннее давление не сможет его уравновесить. У звезды нет другого выбора, как схлопываться.
2. Законы Ньютона (рис. 6.8) предсказывают, что фотоны, испущенные с поверхности звезды, сначала будут отлетать к большим окружностям, даже в некоторых случаях к окружностям, большим критической, и затем будут притянуты назад. Законы Эйнштейна (рис. 6.7) требуют, чтобы любой фотон, испущенный внутри критического радиуса, двигался все время ко все меньшим и меньшим окружностям. Единственная возможность для такого фотона покинуть поверхность звезды состоит в том, что сама звезда будет сокращаться быстрее, чем движется к центру направленный наружу фотон (рис. 6.7).

Несмотря на то, что открытие Финкельштейна и результаты компьютерного моделирования с помощью программ, написанных для разработки бомбы, полностью убедили Уилера в том, что схлопывание массивной звезды должно приводить к образованию черной дыры, судьба схлопывающегося звездного вещества в 60-е годы продолжала его беспокоить, так же, как она беспокоила его и в Брюсселе в 1958 г., во время их встречи с Оппенгеймером. Общая теория относительности настаивала на том, что звездное вещество будет раздавлено и перестанет существовать в сингулярности в центре звезды, но такое предсказание представлялось физически неприемлемым. Уилеру казалось ясным, что законы общей теории относительности в центре черной дыры должны перестать работать, и потому их необходимо заменить новыми законами — законами квантовой гравитации, которые должны прекратить раздавливание. Возможно, рассуждал Уилер, основываясь на взглядах, изложенных им в Брюсселе, новые законы превратят схлопывающееся вещество в излучение, которое квантово-механически «туннелирует» из черной дыры, и вылетит в межзвездное пространство. Чтобы проверить эти рассуждения, требовалось глубокое проникновение в союз квантовой механики и релятивистской теории. В этом состояла красота умозаключений. Они были пробным камнем и помогали открыть новые законы квантовой гравитации.

Будучи студентом Уилера в 1960 г., я думал, что рассуждения о веществе, превращающемся в излучение в сингулярности и затем туннелирующим из черной дыры, являются весьма еретическими. Как мог Уилер верить в такое? Новые законы квантовой гравитации, конечно, были важны в сингулярности в центре звезды, как и утверждал Уилер. Но не вблизи критической окружности. Критическая окружность лежала в «области большого», где общая теория относительности должна быть очень точна, а законы общей теории относительности были однозначны: ничто не может вылететь из критической окружности. Гравитация удерживает все внутри. Поэтому никакого «квантовомеханического туннелирования» (что бы оно собой ни представляло), позволяющего вылететь излучению, не может быть. Я был в этом твердо убежден.

В 1964 и 1965 гг. Уилер и я вместе с Кентом Гаррисоном и Масами Вакано написали специальную книгу о холодных, мертвых звездах и звездном схлопывании. Я был шокирован, когда Уилер настоял на включении в последнюю главу своих рассуждений о том, что излучение может туннелировать из черной дыры в межзвездное пространство. В последнем сражении, пытаясь убедить Уилера удалить из книги эти

6. Схлопывается во что?

его рассуждения, я обратился за помощью к Дэвиду Шарпу, одному из постдоков Уилера. Дэвид и я энергично спорили с Уилером в трехстороннем телефонном разговоре, пока, наконец, Уилер не сдался.

Уилер оказался прав, а Дэвид и я ошибались. Десятью годами позже Зельдович и Стивен Хокинг используют вновь разработанное частичное соединение общей теории относительности и квантовой механики, чтобы математически доказать, что излучение может туннелировать из черной дыры, хотя и очень, очень медленно (глава 12). Другими словами, черные дыры могут испаряться, но настолько медленно, что сформировавшейся при схлопывании звезды черной дыре, чтобы исчезнуть, потребуется время, гораздо большее, чем возраст нашей Вселенной.

* * *

Имена, которые мы даем разным вещам, действительно важны. Агенты кинозвезд, менявшие имена своим клиентам: Норма Джин Беккер — на Мерилин Монро, а Бела Бласко — на Бела Лугоси, хорошо это знали. То же и у физиков. В киноиндустрии имя помогает задать тон, настрой, в котором зритель воспринимает кинозвезду — очарование в случае с Мерилин Монро и ужас — с Бела Лугоси. В физике название помогает установить угол зрения, под которым мы смотрим на физическую концепцию. Хорошее название может вызвать мысленный образ, который подчеркнет самые важные свойства этой концепции, и потому поможет включиться на уровне подсознания, некоторым интуитивным образом, процессу исследования. Плохое имя может установить ментальные блоки, которые будут препятствовать исследованиям.

Возможно, ничто так не мешало физикам в период с 1939 по 1958 гг. понять схлопывание звезд, как название, которое они использовали для обозначения критической окружности: «сингулярность Шварцшильда». Слово «сингулярность» вызывало образ области, где гравитация становится бесконечно велика, что ломало все известные законы физики, — образ, который, как мы теперь понимаем, справедлив лишь для объекта в центре черной дыры, но не для критической окружности. Этот образ сделал для физиков трудным принятие вывода Оппенгеймера–Снайдера, что находящийся на схлопывающейся звезде и проходящий через сингулярность Шварцшильда (критическую окружность) не почувствует бесконечной гравитации и не увидит крушения физических законов.

То, насколько *несингулярна* в действительности была сингулярность Шварцшильда (критическая окружность), не было ясно до тех пор, пока Дэвид Финкельштейн не открыл свою новую систему координат и не использовал ее, чтобы показать, что сингулярность Шварцшильда является ничем иным, как местом, в которое все проваливается, но откуда ничего не может выйти и в которое мы снаружи никогда не сможем заглянуть. Как показывает система отсчета Финкельштейна, схлопывающаяся звезда продолжает существовать после того, как погружается в сингулярность Шварцшильда, точно так же, как и Солнце продолжает существовать после того, как оно на Земле скрывается за горизонт. Но так же как и мы, сидя на Земле, не можем видеть Солнце за горизонтом, так и наблюдатели вдали от схлопывающейся звезды не могут ее видеть после того, как она сожмется до размера, меньшего сингулярности Шварцшильда. Эта аналогия в 1950 г. послужила мотивом Вольфгангу Риндлеру, физику из Корнельского университета, давшему сингулярности Шварцшильда (критической окружности) новое название, название, с тех пор прочно утвердившееся, — *горизонт*.

Оставался еще вопрос, как именовать объект, образующийся при схлопывании звезды. С 1958 по 1968 гг. на Востоке и на Западе применяли различные названия: советские физики использовали название, которое обращало внимание на то, как выглядит схлопывание для удаленного астронома. Вспомним, что поскольку свету невероятно трудно вырваться из гравитационных тисков, издали будет казаться, что схлопывание будет продолжаться вечно, поверхность звезды никогда не достигнет критической окружности, а горизонт никогда не образуется. Астрономам будет казаться (если у них будут достаточно мощные телескопы, способные рассмотреть схлопывающиеся звезды), что звезда оказывается замороженной как раз около критической окружности. По этой причине советские физики называли объект, образующийся при схлопывании, *замороженной звездой*, и это название помогло им задать тон и угол зрения в их исследованиях схлопывания в 1960-х годах.

Наоборот, на Западе акцентировалась точка зрения наблюдателя, находящегося на поверхности схлопывающейся звезды и движущегося вместе с ней через горизонт внутрь, к настоящей сингулярности, соответственно создающийся при этом объект называли *схлопывавшейся звездой* — *коллапсара*. Это название помогло сфокусировать внимание физиков на вопросах, ставших главной заботой Джона Уилера: природе сингулярности, в которой соединятся квантовая физика и кривизна пространства-времени.

6. Схлопывается во что?

Но ни одно название не было вполне удовлетворительно. Ни одно не акцентировало внимание на горизонте, окружающем схлопывающуюся звезду, который отвечает за иллюзию «замораживания» звезды. В течение 60-х годов расчеты физиков последовательно открывали огромную важность горизонта, и постепенно Джон Уилер (которого, как никого другого, волновала проблема оптимального названия) стал ощущать всё большее неудовлетворение.

* * *

Медитировать о названиях, которыми мы называем различные вещи, расслабляясь в ванной или лежа вечером в постели, было вполне в духе Уилера. Иногда он мог искать для чего-нибудь подходящее имя месяцами. Так было и в случае поиска замены имени для «замерзшей»/«сколлапсировавшей» звезды. Наконец, в конце 1967 г. он нашел совершенное название.

В типичном для Уилера стиле он не побежал к своим коллегам со словами: «Я нашел потрясающее новое название, давайте отныне будем называть это та-та-та-та». Вовсе нет, он просто начал применять его так, как будто никакого другого названия раньше никогда не существовало, как будто все уже согласились, что это как раз самое подходящее название. Он опробовал его на конференции по пульсарам в Нью-Йорке поздней осенью 1967 г. и затем прочно утвердил его на лекции в декабре 1967 г. в Американской ассоциации успехов науки, озаглавленной «Наша Вселенная — известное и неизвестное». Те из нас, кто там не присутствовал, впервые столкнулись с этим новым названием в печатной версии его лекции. «Вследствие все более и более быстрого падения [поверхность схлопывающейся звезды] убегает от [удаленного] наблюдателя все быстрее и быстрее. Свет сдвигается в красную область. Он с каждой миллисекундой становится все бледнее и бледнее и меньше чем за секунду становится слишком темным, чтобы его можно было видеть ... [Звезда], как Чеширский кот, постепенно исчезает. Кот оставляет после себя улыбку, а звезда — только гравитационное притяжение. Гравитационное притяжение остается, а свет — нет. То же и с частицами. Более того, свет и частицы, направленные снаружи к черной дыре, лишь добавляются к ее массе, увеличивая ее гравитационное притяжение».

Черные дыры — таково было новое название, предложенное Уилером. В течение одного месяца оно было с энтузиазмом воспринято физиками-релятивистами, астрофизиками и широкой публикой на Востоке и на Западе. За одним исключением: во Франции, где фраза *trou noir* (черная дыра) имеет непристойный оттенок, сопротивление продолжалось несколько лет.

ЗОЛОТОЙ ВЕК

*глава, в которой выясняется, что черные дыры
вращаются и пульсируют, запасают и высво-
бождают энергию, но не имеют волос*

Время действия — 1975-й год, место действия — Университет Чикаго, в южной части города, недалеко от берега озера Мичиган. Здесь, в угловом кабинете здания на 56-й стрит, Субраманьян Чандрасекар был поглощен разработкой полного математического описания черных дыр. Черные дыры, которые он теперь анализировал, радикально отличались от тех объектов, которые обрисовались в начале 1960-х, когда физики только начали разрабатывать их концепцию. Прошедшее десятилетие явилось золотым веком исследований черных дыр, эрой, в которую произошла революция в нашем понимании предсказаний общей теории относительности.

В 1964 г., в начале Золотого века, считалось, что черные дыры являются лишь тем, что предполагает их название: бездонными космическими провалами, в которых все исчезает и из которых ничего не может появиться. Но проведенные на основании уравнений общей теории относительности Эйнштейна более чем сотней физиков расчеты, которые чередой публиковались в Золотой век, изменили эту картину. Теперь, когда Чандрасекар в своем чикагском офисе снова приступил к вычислениям, черные дыры представлялись уже не просто неподвижными дырами в пространстве, а сложными динамичными объектами, которые могут вращаться и вовлекать во вращение подобно торнадо окружающее искривленное пространство-время. В этих космических вихрях должна быть запасена колоссальная энергия, которая может частично высвободиться при космических катастрофах. Если на большую черную дыру упадет планета, звезда или меньшая дыра, это приведет к пульсациям горизонта большой черной дыры.

7. Золотой век

Такие пульсации, подобные вертикальному дрожанию поверхности Земли при землетрясениях должны производить гравитационную рябь в искривленном пространстве-времени, которая волнами распространяется по Вселенной, разнося симфоническое описание черной дыры. Самым удивительным открытием Золотого века стало, вероятно, следствие общей теории относительности, заключающееся в том, что все свойства черной дыры точно описываются лишь тремя числами: ее массой, моментом импульса и электрическим зарядом. Эти три числа позволяют вам при достаточном владении математическим аппаратом вычислить, например, форму горизонта дыры, силу гравитации, детальную форму завихрения пространства-времени вокруг дыры и частоту пульсаций. Многие из этих свойств к 1975 г. были уже известны, но некоторые еще предстояло открыть. Вычисление еще неизвестных свойств черных дыр было непростой задачей, но это был как раз тот вызов, который привлекал Чандрасекара. Он понял это в 1975 г. и решил вернуться к этой деятельности. Боль душевных ран, полученных в битвах с Эддингтоном в 1930-х годах, почти сорок лет мешала Чандрасекару вернуться к расчетам превращения массивных звезд в черные дыры. За эти сорок лет он заложил основы многих направлений современной астрофизики в теории звезд, галактик, межзвездных газовых туманностей и во многих других областях. Но исследование судьбы массивных звезд продолжало манить его. Наконец, в Золотой век он смог преодолеть старую боль и вернулся к черным дырам.

Он вернулся в семью исследователей, в которой доминирующую роль играли аспиранты и постдоки. Золотой век был во власти молодежи, но нестареющий душой, хотя и достигший уже среднего возраста, консервативный в манерах Чандрасекар был приветливо встречен в этой среде. Во время частых посещений Калтеха и Кембриджа его, одетого в консервативный темный костюм (цвета серый Чандрасекар, как шутили его юные друзья), можно было часто застать в кафетерии в окружении неформально и броско разодетых студентов и аспирантов. Золотой век был краток. Аспирант Калтеха Билл Пресс, который летом 1975 г., так же как и Чандрасекар, занимался вычислением свойств черных дыр, придумал ему название и он же организовал его похороны на четырехдневной конференции в Принстонском университете, на которую были приглашены только исследователи моложе тридцати лет.¹ На конференции Пресс и многие из его молодых коллег согла-

¹Как вспоминает Саул Тюкольски, соотечественник Билла Пресса: «Эта конференция была ответом Билла на то, что он посчитал провокацией. Была другая конференция, на которую никого из нас не пригласили. Но все известные серости были там, поэтому Билл решил устроить конференцию только для молодых людей».



Субраманьян Чандрасекар в студенческой кафетерии Калтеха «Сальное» с аспирантами Саулом Тьюкольски (*слева*) и Аланом Лайтманом (*справа*), осенью 1971 г. [Фотография любезно предоставлена Сандором Дж. Ковачем]



Участники похоронной конференции Золотого века исследований черных дыр в Принстонском университете, летом 1975 г. *Первый ряд, слева направо:* Яков Петтерсон, Филипп Ясскин, Билл Пресс, Лэрри Смарт, Беверли Берджер, Джорджия Витт, Боб Вальд. *Второй и третий ряды, слева направо:* Филипп Маркус, Питер Д'Ит, Пол Шечтер, Саул Тьюкольски, Джим Нестер, Пол Виита, Майкл Шулл, Бернард Карр, Клиффорд Вилл, Том Честер, Билл Унру, Стив Кристенсен. [Предоставлена Саулом Тьюкольски]

7. Золотой век

сились, что настало время обратиться к другим направлениям физики. Контуры черных дыр как вращающихся, пульсирующих, динамических объектов были теперь обрисованы, и быстрый темп теоретических открытий начинал замедляться. Казалось, осталось лишь дорисовать отдельные детали. С этим мог справиться Чандрасекар и немногие другие, а его молодые, но уже взрослеющие друзья бросились искать новые задачи в другом месте. Чандрасекара это не обрадовало.

Наставники: Уилер, Зельдович, Сиама

Кем были эти молодые люди, которые изменили наше понимание черных дыр? Большинство из них было студентами, постдоками и интеллектуальными «внуками» трех замечательных учителей: Джона Арчибальда Уилера из Принстона в Нью-Джерси, США; Якова Борисовича Зельдовича из Москвы, СССР, и Дэнниса Сиамы из Кембриджа, Англия. В нашем понимании черных дыр Уилер, Зельдович и Сиама оставили заметный след, особенно через своих интеллектуальных потомков.

Каждый из этих наставников имел свой собственный подход. Фактически, трудно найти более разные стили руководства. Уилер был харизматическим, вдохновенным провидцем. Зельдович был напористым играющим тренером сильной и сплоченной команды. Сиама был самоотверженным катализатором идей. Мы встретимся с каждым из них на следующих страницах.

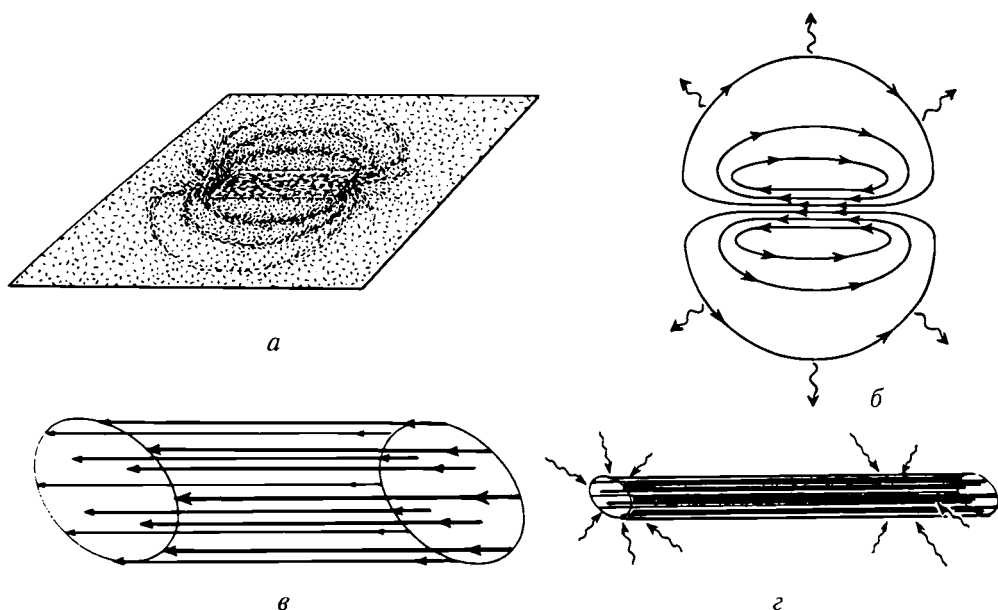
* * *

Я хорошо помню мою первую встречу с Уилером. Это был сентябрь 1962 г., за два года до зарождения Золотого века. Уилер только недавно обратился к концепции черной дыры, а мне было двадцать два года, я только что закончил Калтех и приехал в Принстон для поступления в аспирантуру. Я мечтал работать над теорией относительности под руководством Уилера и в первый раз с трепетом постучал в дверь его офиса.

Профессор Уилер приветствовал меня теплой улыбкой, проводил в свой офис и немедленно начал (как если бы я был уважаемым коллегой, а не абсолютным новичком) обсуждать тайны схлопывания звезд. Настроение и содержание этого активного частного обсуждения можно понять из писем Уилера того времени: «мало найдется случаев в истории физики, когда можно было бы с большей уверенностью, чем теперь [в исследовании схлопывания звезд], утверждать, что мы

столкнулись с новым явлением с таинственной собственной природой, ждущим, чтобы его разгадать... Безотносительно результата [будущих исследований] каждый чувствует, что имеет, наконец, [в лице схлопывания звезд] явление, где явно выступает общая теория относительности, и где может осуществиться пламенный союз с квантовой физикой». Я вышел от Уилера часом позже уже новообращенным. Уилер вдохновлял свое окружение из пяти-десяти аспирантов и постдоков Принстона, не навязывая детального руководства. Он предполагал, что каждый из нас достаточно хорош, чтобы развивать детали самостоятельно. Каждому из нас он предложил свою небольшую проблему для исследования, которая могла бы привести к некоторому новому пониманию схлопывания звезд, черных дыр или «пламенного союза» общей теории относительности и квантовой механики. Если первая задача оказывалась слишком трудной, он легко подталкивал нас в более легком направлении. Если же она оказывалась легкой, он подталкивал нас к тому, чтобы мы извлекали из нее все, что было возможно, затем писали технические статьи относительно достигнутого понимания, и затем двигались дальше к более стимулирующей проблеме. Скоро мы научились работать одновременно над несколькими проблемами. Если работа над одной продвигалась с трудом и требовала многократных возвратов к ней в течение многих месяцев или даже лет, прежде чем ее удавалось, наконец, расколоть, получив значимый результат, за это время можно было решить параллельно несколько более простых задач, сулящих более быстрый, хотя и меньший, результат. При этом Уилер мог дать только достаточно общий совет, который мог удержать нас от полного отчаяния, но ни в коем случае не такой, чтобы у нас появилось чувство, что он решил нашу проблему за нас.

Моя первая проблема оказалась трудной штучкой: представьте себе стержневой магнит, магнитное поле которого пронизывает стержень насквозь, выходя из его обоих торцов. Поле состоит из силовых линий, которые, как учат детей, можно увидеть с помощью железных опилок на листе бумаги, если под него снизу подведен магнит (рис. 7.1а). Ближайшие силовые линии отталкиваются друг от друга (их отталкивание можно почувствовать, если подвести друг к другу северные полюсы двух разных магнитов). Силовые линии удерживаются внутри, несмотря на отталкивание, железом магнита. Удалите железо, и отталкивание заставит силовые линии разлететься (рис. 7.1б). Все это было мне знакомо по студенческим курсам. Уилер напомнил мне об этом в ходе долгого обсуждения в его кабинете в Принстоне. Он описал мне тогда недавнее открытие его друга, профессора Маэла Мелвина из Флоридского государственного университета в Таллахасси.



- 7.1. (а) Линии магнитного поля вокруг стержневого магнита становятся видны с помощью железных опилок на листе бумаги, под которым помещен магнит. (б) Те же самые силовые линии на бумаге, если магнит убрать. Давление между соседними линиями поля заставит их разлететься в направлениях, указанных волнистыми стрелками; (в) бесконечно длинный, цилиндрический пучок линий магнитного поля, поле которых настолько сильное, что его энергия создает такое сильное искривление пространства-времени (гравитацию), что она скрепляет пучок, несмотря на отталкивание между линиями поля; (г) догадка Уилера о том, что если такой пучок полевых линий еще немного сжать, то их гравитация станет настолько сильной, что сожмет связку и вызовет схлопывание (волнистые линии)

Используя уравнение поля Эйнштейна, Мелвин показал, что линии магнитного поля могут удерживаться от разлета не только железом в стержневом магните, но и гравитационным полем, без всякой помощи магнита. Причина проста: магнитное поле имеет энергию, а энергия вызывает гравитацию. [Чтобы понять, почему энергия может вызывать гравитацию, вспомним, что энергия и масса «эквивалентны» (Врезка 5.2): массу любого вещества (уран, водород, все что угодно) можно преобразовать в энергию, и наоборот, энергию любого вида (магнитную, энергию взрыва, любую другую) можно превратить в массу. Таким образом, в глубоком смысле, масса и энергия — просто различные названия для одного и того же, и это означает, что, поскольку все формы массы производят гравитацию, должны ее порождать и все формы энергии. На этом, если внимательно к нему присмотреться, настаивает уравнение поля Эйнштейна.] Если у нас есть теперь чрезвычайно мощное магнитное поле, гораздо более мощное, чем то, с ко-

торым мы сможем когда-либо столкнуться на Земле, то такая большая энергия поля породит мощную гравитацию, и эта гравитация сожмет поле, удерживая вместе магнитные линии, несмотря на силы отталкивания между ними (рис. 7.1а). В этом и состояло открытие Мелвина.

Интуиция Уилера подсказывала ему, что такие «связанные гравитацией» линии поля могли бы быть столь же неустойчивы, как и карандаш, стоящий на острие: качните карандаш немного, и гравитация заставит его упасть. Сожмите немного линии магнитного поля, и гравитация сможет преодолеть их давление, приведя к схлопыванию (рис. 7.1б). Но к чему приведет это схлопывание? Может быть, образуется бесконечно длинная, цилиндрическая черная дыра; или, возможно, образуется *голая сингулярность* (сингулярность без закутывающего ее горизонта).

Для Уилера не имело значения, что магнитные поля в реальной Вселенной слишком слабы, чтобы породить гравитацию, предохраняющую их от разрушения. Поиски Уилера были направлены не на то, чтобы понять Вселенную, а, скорее, на понимание тех фундаментальных законов, которые ей управляют. Выдвигая идеализированные проблемы, которые ставят физические законы в экстремальные условия, он ожидал получить новое понимание этих законов. В этом же духе он и предложил мне для исследования мою первую гравитационную задачу: использовать уравнение поля Эйнштейна, чтобы попробовать выяснить, будет ли пучок силовых линий Мелвина схлопываться, и если будет, то во что.

В течение многих месяцев я сражался с этой проблемой. Сценой дневных сражений служил мезонин Палмеровской физической лаборатории в Принстоне, где я делил огромный офис с другими студентами-физиками, и где мы также делились друг с другом нашими проблемами в духе товарищеского обмена мнениями и взаимопомощи. Ночные бдения протекали в крошечной квартирке в переделанных после второй мировой войны армейских бараках, где я жил с женой Линдой (художницей и студенткой математического факультета), нашей малюткой-дочерью Карес и нашей огромной собакой колли по кличке Принц. Каждый день я переносил с собой эту проблему туда и обратно, между армейскими бараками и мезонином лаборатории. Каждые несколько дней я ловил Уилера, спрашивая совета. Я бился над проблемой с карандашом и бумагой, я сражался с ней с помощью численных расчетов на компьютере и в ходе долгих споров у доски с моими сокурсниками, и постепенно правда стала проясняться. Преобразованное в ходе борьбы моими манипуляциями уравнение Эйнштейна, наконец, сказало мне, что предположение Уилера было неверно.

7. Золотой век

Независимо от того, как сильно сжимается цилиндрический пучок силовых линий магнитного поля Мелвина, он всегда будет оставаться упругим. Гравитация никогда не сможет преодолеть отталкивающее давление поля. Никакого схлопывания нет.

Как с энтузиазмом объяснил мне Уилер, возможно, это было наилучшим результатом: когда вычисление подтверждает ожидания, это приводит лишь к некоторому упрочнению вашего интуитивного понимания законов физики. Но когда вычисление противоречит ожиданиям, вы находитесь на пути к новому пониманию.

Разница между сферической звездой и цилиндрическим пучком линий магнитного поля Мелвина, как поняли мы с Уилером, была разительна: в очень компактной сферической звезде гравитация может преодолеть любое внутреннее давление, которое только в звезде может проявиться. *Схлопывание массивных сферических звезд неизбежно* (глава 5). В отличие от этого, независимо от того, как сильно сжимается цилиндрический пучок линий магнитного поля, независимо от того, насколько компактным становится его круглое поперечное сечение (рис. 7.12), давление пучка будет всегда преодолевать гравитацию и обратно раздвигать линии поля. *Схлопывание цилиндрических линий магнитного поля запрещено*, оно не может происходить никогда.

Почему сферические звезды и цилиндрическое магнитное поле ведут себя настолько различным образом? Уилер поощрял меня исследовать этот вопрос с разных сторон; ответ мог бы принести глубокое понимание законов физики. Но он не говорил мне, как именно. Я становился независимым исследователем; он верил, что это было бы лучше для меня, если бы я сам смог развить собственную стратегию исследования без его дальнейшего руководства. Независимость способствует появлению силы.

С 1963 по 1972 гг., в течение большей части Золотого века, я изо всех сил пытался понять разницу между сферическими звездами и цилиндрическими магнитными полями, но только отдельными наскоками. Вопрос был глубок и труден, и было множество других, более легких проблем для изучения, на которых сосредоточивались мои усилия: пульсации звезд, гравитационные волны, испускаемые звездами в процессе пульсаций, эффекты искривления пространства-времени в огромных звездных кластерах и при их схлопывании. Между этими исследованиями пару раз в год я доставал из ящика моего стола стопку папок с моими вычислениями магнитного поля. Постепенно я добавлял к тем вычислениям новые, для других идеализированных бесконечно длинных цилиндрических объектов: цилиндрических «звезд» состоящих из горячего газа, цилиндрических облаков пыли, схлопы-

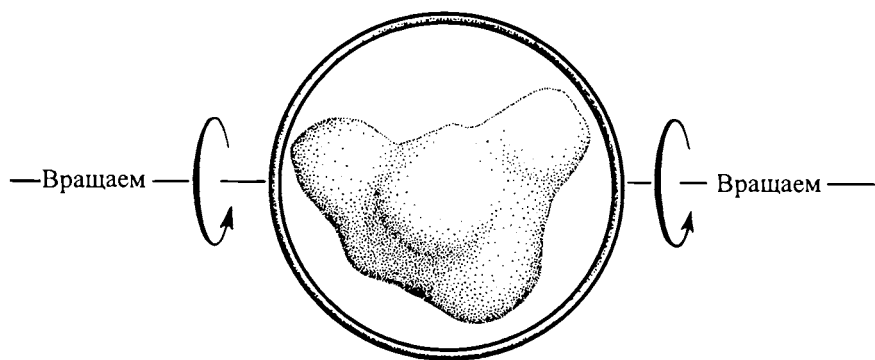
вающихся с одновременным вращением. Хотя эти объекты не существуют в реальной Вселенной, мои сделанные урывками вычисления их поведения постепенно стали приносить плоды.

К 1972 г. правда стала очевидна. Гравитация может стать настолько сильной, что преодолест все виды внутреннего давления, но только в том случае, если объект сжат во *всех трех* пространственных направлениях: север—юг, восток—запад, верх—низ (например, если объект сжат сферически симметрично). Если же объект сжат только в двух пространственных измерениях (например, если он сжат цилиндрически в длинную тонкую нить), гравитация растет, но не настолько сильно, чтобы победить в сражении с давлением. Весьма скромное давление, будь то давление горячего газа, электронное вырождение, либо отталкивание линий магнитного поля, легко одолевает гравитацию и заставляет цилиндрический объект расширяться. А если объект сжимается только в одном направлении, в очень тонкий блин, то давление побеждает гравитацию еще легче.

Мои вычисления ясно и недвусмысленно показали это в случае сфер, бесконечно длинных цилиндров и бесконечно широких блинов. Для таких объектов вычисления еще можно было провести. Гораздо сложнее для вычислений, в действительности за пределами моих талантов, был бы расчет несферических объектов конечного размера. Но физическая интуиция, появившаяся в результате моих вычислений и вычислений моих молодых товарищей, подсказывала мне, чего можно здесь ожидать. Это предположение я сформулировал в виде *гипотезы об обруче*.

Возьмем любой объект, который только вы можете себе представить: звезда, группа звезд, пучок линий магнитного поля, все что угодно. Измерим массу объекта, например, измерив силу его гравитации на орбитах планет. Зная эту массу, вычислим критическую окружность объекта (18,5 километров на одну солнечную массу). Если бы объект был сферическим (что не так), то он должен схлопываться с образованием черной дыры, если будет сжат до размера, меньшего, чем эта критическая окружность. Что случится, если объект не является сферическим? Гипотеза об обруче предполагает ответ на этот вопрос (рис. 7.2).

Построим обруч с окружностью, равной критической окружности нашего объекта. Попробуем поместить объект в центр обруча и полностью обернуть обруч вокруг объекта. Если это можно сделать, то объект уже должен был создать вокруг себя горизонт черной дыры. Если же вы потерпите неудачу, это значит, что объект для образования черной дыры еще недостаточно компактен.



7.2. Согласно гипотезе об обруче, схлопывающийся объект образует черную дыру тогда и только тогда, когда вокруг объекта можно поместить и обернуть обруч с критической окружностью

Другими словами, гипотеза об обруче утверждает, что, если объект (звезда, группа звезд, все что угодно) сжат очень несферическим образом, то он сформирует вокруг себя черную дыру тогда и только тогда, когда его окружность во всех направлениях становится меньше, чем критическая окружность.

Я предложил эту гипотезу об обруче в 1972 г. С тех пор я и другие упорно старались проверить, правильно ли это предсказание или нет. Ответ похоронен в уравнении поля Эйнштейна, но извлечь его, как оказалось, чрезвычайно трудно. За это время накопилось достаточно много косвенных доказательств справедливости этого предположения. Совсем недавно, в 1991 г., Стюарт Шапиро и Саул Тьюкольски из Корнельского университета смоделировали на суперкомпьютере схлопывание очень несферической звезды и увидели, что черная дыра вокруг подверженной сильному сжатию звезды формируется в точности тогда, когда предсказывает это гипотеза об обруче. Если обруч может быть надет и обернут вокруг подвергающейся сильному сжатию звезды, то черная дыра формируется, если — нет, то нет и черной дыры. Но было смоделировано только несколько подобных звезд специальной несферической формы. Поэтому мы все еще не знаем наверняка, спустя почти четверть века после того, как я предложил эту гипотезу об обруче, правильна ли она или нет, но этот результат выглядит обещающим.

* * *

Игорь Дмитриевич Новиков со многих точек зрения напоминал меня самого, так же как Яков Борисович Зельдович был похож на Уилера. В 1962 г., когда я встретился в первый раз с Уилером и начал

свою карьеру под его руководством, Новиков впервые встретился с Зельдовичем и стал членом его команды исследователей.

Но если у меня было простое и благополучное детство в большой и дружной мормонской семье в Логане, штат Юта, у Новикова все было гораздо сложнее.² В 1937-м, когда Игорю было два года, его отец, высокопоставленный чиновник в Министерстве железнодорожного транспорта попал под жернова сталинского Великого террора, был арестован и (в отличие от счастливо спасшегося Ландау) казнен. Жизнь его матери была сломана — ее посадили в тюрьму и затем отправили в ссылку, а Игоря воспитывала тетя. (Такие семейные трагедии были пугающе обычны среди моих русских друзей и их коллег.)

В начале 1960-х, когда я студентом изучал физику в Калтехе, Игорь учился в аспирантуре Московского университета. В 1962-м, когда я собирался отправиться в Принстон в аспирантуру под руководством Джона Уилера, специализируясь в общей теории относительности, один из моих профессоров в Калтехе отговаривал меня от этого намерения: общая теория относительности имеет малое отношение к реальной Вселенной, предупреждал он, лучше поискать интересные проблемы в других областях физики. (Это было время широко распространенного скептицизма относительно черных дыр и отсутствия к ним интереса.) В это же самое время Игорь в Москве закончил аспирантуру со степенью кандидата наук (доктора философии), тоже специализируясь в общей теории относительности, и его жену Нору, тоже физика, друзья предупреждали, что эта теория является болотом, не имеющим связи с реальной Вселенной, и муж ради карьеры должен бросить эту область.

И если я проигнорировал эти предупреждения, отправившись в Принстон, то озабоченная Нора воспользовалась случаем на физической конференции в Эстонии, чтобы получить совет от известного физика Якова Борисовича Зельдовича. Она нашла Зельдовича и спросила, что он думает о значении общей теории относительности. Зельдович в своем динамичном напористом стиле ответил, что теория относительности становится чрезвычайно важной в астрофизических исследованиях. Тогда Нора описала идею, над которой работал ее муж, — что схлопывание звезды с образованием черной дыры могло быть подобно происхождению нашей Вселенной в ходе Большого взрыва, но обращенным, текущим вспять временем.³ Чем больше

² В конце 1980-х, по предложению моей матери, вся семья попросила об отлучении от Мормонской Церкви в ответ на подавление в ней прав женщин.

³ Эта идея, хотя и правильная, пока еще не привела к каким-либо значимым результатам, поэтому я не буду обсуждать ее в этой книге.

рассказывала Нора, тем больше возбуждался Зельдович. Он тоже занимался разработкой этой же самой идеи.

Несколько дней спустя Зельдович пришел в кабинет, который Игорь Новиков делил со многими другими студентами Московского университета, работавшими в Астрономическом институте Штернберга, и начал пытаться задавать Новикову вопросы о его исследовании. Хотя их идеи были близки, методы работы сильно различались. Новиков, который был уже большим специалистом в теории относительности, использовал изящные математические вычисления, чтобы показать подобие Большого взрыва схлопыванию звезд. Зельдович, который едва ли хорошо знал общую теорию относительности, показывал это, основываясь на своем глубоком понимании физики и грубых вычислениях. Зельдович понял, что здесь имело место идеальное соответствие. Он тогда только отошел от своей жизни изобретателя и проектировщика ядерного оружия и начинал создавать новую команду исследователей, команду, которая работала бы над его новой любовью — астрофизикой. Новиков, прекрасно владевший общей теорией относительности, мог быть идеальным членом команды.

Когда Новиков, которому нравилось в Московском университете, заколебался, Зельдович решил надавить. Он пошел к Мстиславу Келдышу, директору Института прикладной математики, где собиралась команда Зельдовича, Келдыш позвонил Ивану Петровскому, ректору Московского университета, и Петровский вызвал Новикова к себе. Новиков с трепетом входил в кабинет Петровского, расположенный в Главном высотном здании Университета, куда по собственной инициативе он бы вряд ли попал. Петровский высказался определенно: «Возможно, Вы *сейчас* не хотите оставлять Университет, чтобы работать с Зельдовичем, но Вам потом *захочется*». Новиков согласился и, несмотря на отдельные сложности, никогда об этом не пожалел.

Стиль Зельдовича в работе с молодыми астрофизиками оставался тем же, который он развил, работая со своей командой над проектированием ядерного оружия: «искры [идеи] Зельдовича, бензин его команды» до тех пор, пока, случалось, какой-то другой член команды не начинал сам генерировать стоящие новые идеи (как было с Новиковым, когда дело доходило до теории относительности). Тогда Зельдович с энтузиазмом принимал идею своего молодого коллеги и начинал энергично проталкивать ее в своей команде, доводя ее до большей зрелости и разделяя авторство с изобретателем.

Новиков живо описывал стиль работы Зельдовича. Называя своего наставника по имени и сокращенному отчеству (форма уважительного и одновременно личного русского обращения), Новиков рассказывает:

«Яков Борисыч часто будил меня по телефону в пять или шесть часов утра. У меня есть новая идея! Новая идея! Приезжайте ко мне домой! Нужно поговорить!» Я приезжал, и мы долго-долго обсуждали. Яков Борисыч думал, что все мы могли работать также много, как и он. Он мог работать с командой с шести утра, скажем, до десяти над одним вопросом. Затем до обеда над другим. После обеда был небольшой перерыв для прогулки, разминки или просто, чтобы вздремнуть. Потом кофе, и опять совместная работа до пяти или шести вечера. Вечером мы были свободны, чтобы вычислять, думать, писать и готовиться к следующему дню».

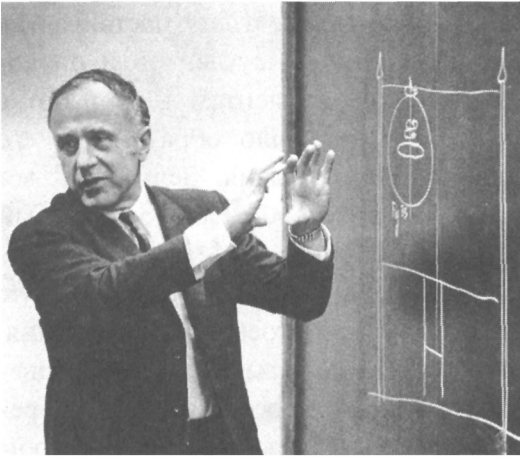
Избалованный годами работы над проектами вооружения, Зельдович продолжал требовать, чтобы окружение приспособлялось к нему: следовало за его распорядком дня, начинало работать, когда начинал он и спало, когда он спал. (В 1968 г. Джон Уилер, Андрей Сахаров и я провели у него вторую половину дня, обсуждая различные физические проблемы в гостиничном номере далеко на юге Советского Союза. После нескольких часов интенсивного обсуждения Зельдович резко заявил, что пришло время соснуть. После чего он прилег и уснул на двадцать минут, а Уилер, Сахаров и я отдыхали, тихо читая в разных углах комнаты, дожидаясь его пробуждения.)

Нетерпеливый с такими перфекционистами как я, которые настаивают на точности всех деталей вычисления, Зельдович заботился только о главных концепциях. Как и Оппенгеймер, он мог почти безошибочно отбросить и занулить все несущественные детали, сосредоточившись на центральных моментах. С помощью нескольких стрелок и кривых на доске, уравнений не больше чем на полстроки и пары ярких фраз он мог ввести свою команду в самое существо исследуемой проблемы.

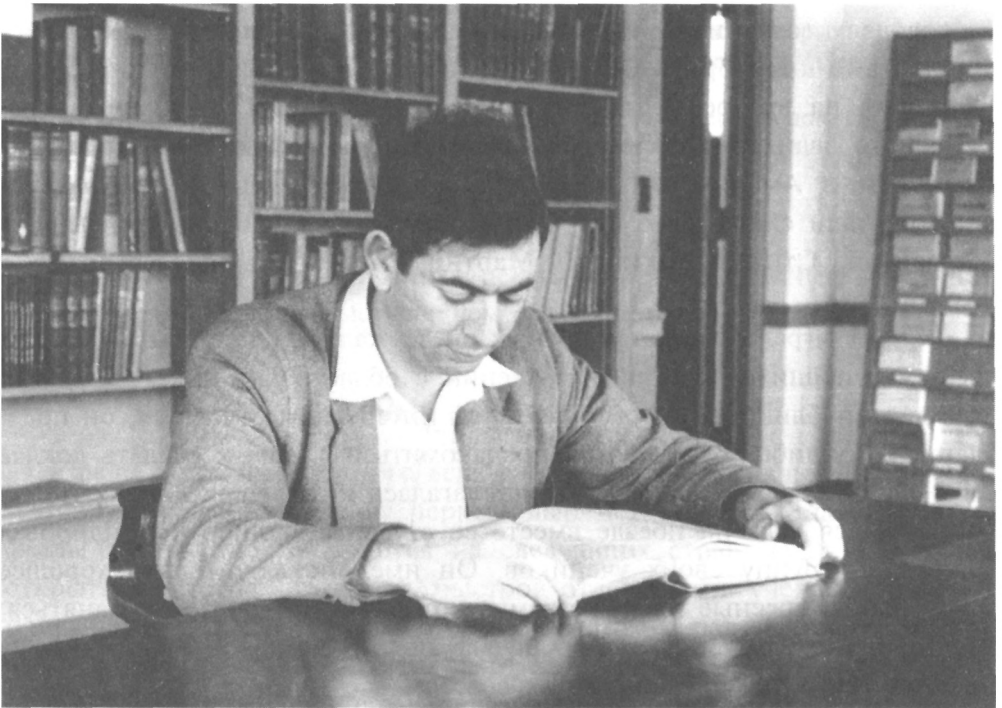
Он был скор на суждения о ценности физических идей и медленно их менял. Он мог сохранять веру в неправильное поспешное суждение в течение многих лет, отгораживая себя таким образом, от важных истин, как в случилось, когда он отверг идею о том, что крошечные черные дыры могут испаряться (глава 12). Но когда (как это обычно случалось) его поспешные суждения были верны, они позволяли ему продвигаться вперед с огромной скоростью, пересекая границы знания, быстрее, чем любому, с кем я когда-либо встречался.

Контраст между Зельдовичом и Уилером был абсолютен: Зельдович постоянно подстегивал свою команду, направляя ее твердой рукой, заставляя проверять собственные идеи и идеи, рожденные в самой команде. Уилер же предложил своим подопечным философское окружение, ощущение того, что интересные идеи находятся вокруг

7. Золотой век



Слева: Джон Арчибальд Уилер, около 1970 г. [Предоставлено Лабораторией Джо-зефа Генри, Университет Принстона]. *Справа:* Игорь Дмитриевич Новиков и Яков Борисович Зельдович в 1962 г. [Предоставлено С.Чандрасекаром]



Деннис Сиама в 1955 г. [Предоставлено Деннисом В. Сиама]

нас, готовые к тому, чтобы их исследовали, но он редко настаивал на какой-то идее в конкретной форме, не давил на студентов и он абсолютно никогда не присоединялся к своим студентам в разработке их собственных идей. Главной целью Уилера было образование его подопечных, даже если это замедляло темп открытия. Зельдович, все еще пропитанный духом гонки за обладание супербомбой, брал самый быстрый возможный темп, не считаясь с ценой.

Зельдович будил своих коллег утром по телефону в безбожную рань, требуя внимания, требуя взаимодействия, требуя продвижения. Уилер казался нам, его подопечным, самым занятым в мире человеком; слишком занятым своими собственными проектами, чтобы требовать от нас внимания. Но все же он был легко доступен, чтобы ответить на вопрос, дать мудрый совет, оказать поддержку.

* * *

Деннис Сиама — третий Учитель этой эпохи, обладал собственным стилем. Он посвятил все шестидесятые и начало семидесятых годов делу создания оптимальных условий для успешной работы со студентами в Кембридже. Поскольку собственную работу и карьеру он поставил на второе место, он так и не получил в Кембридже престижного звания «Профессор» (это звание в Англии гораздо почетнее, чем в Америке). Не он, а его ученики получали награды и приобретали славу. К концу семидесятых годов двое из его бывших студентов, Стивен Хокинг и Мартин Рис, стали профессорами в Кембридже.

Сиама играл роль катализатора; он держал своих студентов в курсе всех важнейших мировых достижений в области физики. Как только где-либо публиковалось сообщение об интересном открытии, он предлагал кому-либо из студентов познакомиться с ним и сделать доклад для других. Если в Лондоне предполагалась интересная лекция, то он отправлялся туда на поезде вместе со студентами либо командировал в Лондон группу своих учеников. Он имел исключительно хорошее чутье на интересные идеи, на темы, которыми следовало бы заняться; на то, что следует почитать в начале нового исследования и к кому следует пойти за тем или иным советом.

Сиаму толкало вперед отчаянное желание узнать, как устроена Вселенная. Сам он объяснял это желание каким-то подспудным беспокойством. Вселенная выглядела такой сумасшедшей, странной и фантастической, что единственным путем примирения с ней был путь ее познания. А единственный способ ее познать лежал через его сту-



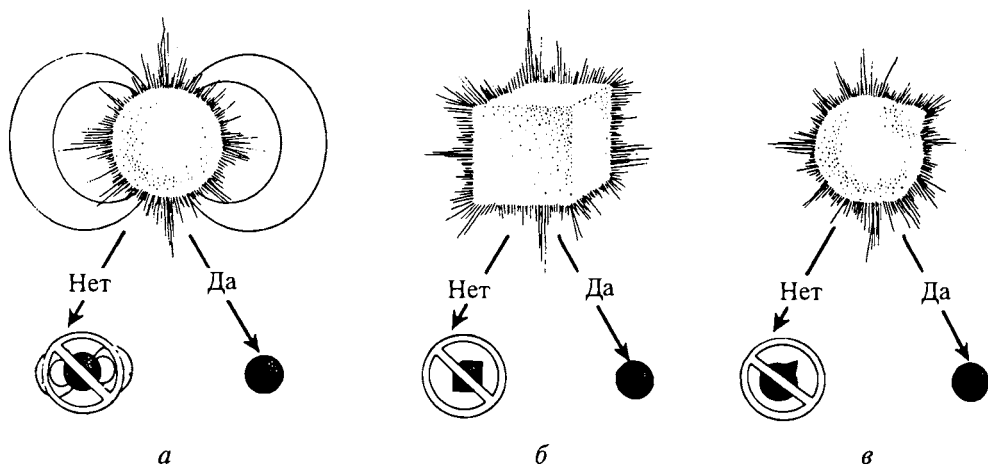
Слева: Виталий Лазаревич Гинзбург (фото 1962 г.), человек, который представил первое свидетельство того, что «у черной дыры нет волос» [Предоставлено Виталием Гинзбургом]

Справа: Вернер Израэль (фото 1964 г.), человек, который первым доказал правильность этого утверждения [Предоставлено Вернером Израэлем]

дентов. Заставляя своих студентов решать наиболее сложные задачи, он мог двигаться вперед быстрее, чем если бы решал их сам.

У черных дыр нет «волос»

Среди открытий Золотого века одним из самых значительных считается утверждение, что «у черных дыр нет волос». (Значение этой фразы постепенно прояснится на следующих страницах.) Некоторые открытия в науке делаются быстро, отдельными учеными; другие появляются медленно и являются результатом вклада многих исследователей. «Безволосость» черных дыр — это открытие второго типа. Оно появилось благодаря усилиям учеников трех гениев: Зельдовича, Уилера и Сиамы, а также многих других исследователей. На следующих страницах мы увидим, как множество исследователей шаг за шагом пытались сформулировать понятие «безволосости» черной дыры, доказать его и понять возможные последствия.



7.3. Некоторые примеры «концепции безволосости»: (а) При схлопывании замагниченной звезды образуется черная дыра, у которой нет магнитного поля. (б) При схлопывании квадратной звезды образуется не квадратная, а круглая черная дыра. (в) При схлопывании звезды с горбом на поверхности образуется черная дыра без горба

Первые намеки на то, что «у черной дыры нет волос», появились в 1964 г. у Виталия Лазаревича Гинзбурга, человека, который изобрел LiD топливо для советской водородной бомбы; подозрения, что его жена участвовала в заговоре против Сталина, освободило его от дальнейшей работы над бомбой (глава 6). Астрономы из Калифорнийского технологического института только что открыли *квазары*, загадочные взрывные объекты на краю Вселенной, а Гинзбург пытался выяснить источник их энергии (глава 9). Он предполагал, что это может быть, например, схлопывание замагниченной сверхмассивной звезды с образованием черной дыры. Силовые линии магнитного поля такой звезды имели бы такой же вид, как и силовые линии земного магнитного поля (верхняя часть рис. 7.3а). При схлопывании может произойти сильное сгущение силовых линий с последующим мощным взрывом и выделением огромной энергии. Так рассуждал Гинзбург. Таков возможный механизм квазаров.

Полный расчет схлопывания звезды для проверки этого утверждения был бы чрезвычайно трудным, поэтому Гинзбург придумал нечто оригинальное. Как Оппенгеймер в своем первом грубом исследовании схлопывания звезды (глава 6), Гинзбург рассмотрел последовательность статичных звезд, причем каждая последующая была компактнее предыдущей. Через каждую из этих звезд проходило одно и то же количество магнитных силовых линий. Гинзбург предположил, что такая последовательность статичных звезд должна отражать картину,

7. Золотой век

происходящую при схлопывании одной звезды. Он вывел формулу, описывающую формы магнитных силовых линий для каждой звезды в своей последовательности. И его ожидал большой сюрприз. Когда размеры звезды приближаются к критическому значению, после достижения которого образуется черная дыра, ее гравитация притягивает магнитные силовые линии на поверхность и плотно их стягивает. После образования черной дыры все стянутые вместе силовые линии оказываются внутри ее горизонта событий. Ни одной силовой линии не будет выходить из черной дыры (рис. 7.3а). Такой вывод не сулил ничего хорошего для гипотезы Гинзбурга о механизме излучения квазаров, но приводил к интересным перспективам в другой области: при схлопывании замагниченной звезды в черную дыру последняя вполне может родиться вообще без магнитного поля.

Примерно тогда же, когда Гинзбург сделал это открытие, у группы Зельдовича, ведущими в которой были Игорь Новиков и Андрей Дорошкевич, возник вопрос: поскольку при схлопывании круглой звезды возникает круглая черная дыра, будет ли из деформированной звезды возникать деформированная дыра? Как крайний случай, образуется ли из квадратной звезды квадратная черная дыра (рис. 7.3б)? Расчет схлопывания гипотетической квадратной звезды был бы чрезвычайно трудным делом, поэтому Дорошкевич, Новиков и Зельдович рассмотрели более простой пример: будет ли при схлопывании почти сферической звезды, имеющей на поверхности небольшую горку, образовываться черная дыра с гористым выступом на горизонте событий? Рассматривая почти сферические звезды с небольшими горками, группа Зельдовича смогла значительно упростить свои расчеты. Они использовали математические методы, называемые *методами возмущений*, которые несколько лет тому назад были введены Джоном Уилером и его сотрудником Туллио Редже. Эти методы возмущений, объяснение которых дано на Врезке 7.1, были разработаны для исследования небольшого «возмущения» сферической формы. Гравитационное искажение вследствие наличия небольшой горки на звезде, которую рассматривала группа Зельдовича, и являлось таким возмущением.

Дорошкевич, Новиков и Зельдович еще более упростили свои расчеты, используя тот же самый трюк, который в свое время использовали Оппенгеймер и Гинзбург. Вместо того чтобы рассчитывать полную динамическую картину схлопывания «гористой» звезды, они изучили последовательность статичных «гористых» звезд, каждая из которых была более компактна, чем предыдущие. Этот дружный коллектив ученых быстро достиг успехов и получил замечательный результат: когда статичная, «гористая» звезда станет достаточно ма-

ленькой и вокруг нее образуется черная дыра, горизонт событий этой дыры будет совершенно круглым, и не будет содержать никаких выступов (рис. 7.3в).

Таким же образом, логично было заключить, что при схлопывании квадратной звезды образуется черная дыра, горизонт событий у которой также не квадратный, а круглый (рис. 7.3б). Если бы этот вывод был правильным, из него следовало бы, что черная дыра вообще не должна «чувствовать», являлась ли создавшая ее звезда квадратной, круглой или «гористой», а также (в соответствии с данными Гинзбурга) замагниченной или нет.

Спустя несколько лет, когда этот вывод постепенно приобретал все большее число поклонников, Джон Уилер придумал для его описания лаконичную фразу: «У черной дыры нет волос». Под «волосами» имелось в виду любое возможное проявление черной дыры, выдающее ее происхождение.

Врезка 7.1

Объяснение метода возмущений для читателей, любящих алгебру

Из алгебры все мы знаем формулу квадрата суммы двух чисел:

$$(a + b)^2 = a^2 + 2ab + b^2.$$

Предположим, что a — большое число, например, 1000, а b — очень маленькое, например, 3. В таком случае третий член этой формулы, b^2 , будет очень мал по сравнению с остальными двумя и может быть отброшен без большой ошибки:

$$\begin{aligned}(1000 + 3)^2 &= 1000^2 + 2 \times 1000 \times 3 + 3^2 = 1\,006\,009 \approx \\ &\approx 1000^2 + 2 \times 1000 \times 3 = 1\,006\,000.\end{aligned}$$

Методы возмущения основаны на этом приближении. Выражение $a = 1000$ соответствует точно сферической звезде, $b = 3$ — маленькой горе на ее поверхности, а выражение $(a + b)^2$ — кривизне пространства-времени, созданной совместно звездой и горой. При расчете кривизны методами возмущений остаются только линейные эффекты свойств горы (эффекты типа $2ab = 6000$, линейные по отношению к $b = 3$); эти методы не учитывают все остальные эффекты горы (такие, как $b^2 = 9$). Поскольку гора ничтожно мала по отношению к звезде, эти методы являются достаточно точными. Тем не менее, если гора вырастает до размеров звезды (т. е. звезда становится, скорее, квадратной, чем круглой), в этом случае методы возмущений приведут к серьезной ошибке, подобно той, которая возникла бы в случае $a = 1000$ и $b = 1000$:

$$\begin{aligned}(1000 + 1000)^2 &= 1000^2 + 2 \times 1000 \times 1000 + 1000^2 = 4\,000\,000 \neq \\ &\neq 1000^2 + 2 \times 1000 \times 1000 = 3\,000\,000.\end{aligned}$$

Эти два результата сильно отличаются друг от друга.

Большинству коллег Уилера трудно было поверить, что этот консервативный, в высшей степени порядочный человек был осведомлен об игривой, если не сказать больше, интерпретации своего высказывания. Но я подозреваю обратное — я наблюдал проявления хулиганских черт его характера, правда, это случалось достаточно редко.⁴ Фраза Уилера стала общей, несмотря на сопротивление Саймона Пастернака, главного редактора журнала *Physical Review*, в котором Уилер опубликовал большинство своих исследований по черным дырам. В конце 1969 г. Вернер Израэль попробовал использовать эту фразу в своей статье, на что Пастернак ответил категорическим отказом: ни при каких обстоятельствах он не разрешит употреблять в своем журнале такие непристойности. Но Пастернак не мог сдержать поток «безволосых» статей. Во Франции и в СССР, где перевод фразы Уилера также выглядел двусмысленно, сопротивление продолжалось дольше. Но к концу 1970-х годов фраза Уилера уже использовалась физиками повсеместно, причем совершенно серьезно.

* * *

К зиме 1964–1965 гг. Гинзбург и Дорошкевич, а также Новиков и Зельдович предложили свою *гипотезу об отсутствии волос* и доказали ее. Надо сказать, что каждые три года специалисты по общей теории относительности собирались где-нибудь на недельную научную конференцию для обмена идеями и знакомства с результатами исследований друг друга. Четвертая такая конференция должна была собраться в Лондоне в июне.

Никто из группы Зельдовича еще не бывал за пределами стран Варшавского договора. Самому Зельдовичу точно не разрешили бы поехать — совсем недавно он участвовал в разработке ядерного оружия. Новиков был слишком молод и не участвовал в работе над водородной бомбой. Его знания общей теории относительности были лучшими в группе Зельдовича (именно поэтому Зельдович и взял его к себе), кроме того, он удовлетворительно владел английским. Выбор Зельдовича был очевиден.

Это была эпоха относительного потепления отношений между Востоком и Западом. Ушел в прошлое «железный занавес», количество контактов и визитов между советскими учеными и их западными

⁴ На публике мне довелось наблюдать это лишь однажды. В 1971 г., в день своего 60-летнего юбилея, Уиллер присутствовал на элитарном банкете в замке в Копенгагене. Банкет был организован по поводу международной конференции, а вовсе не в его честь. Дабы отметить свой день рождения, Уилер привязал к спинке своего стула взрывающиеся петарды, чем вызвал замешательство у обедавших рядом.

коллегами возросло (хотя и не достигло уровня 20-х – 30-х годов). Советские ученые участвовали теперь почти во всех значительных международных конференциях. Такие делегации были важны не только для поддержки советской науки, но и для демонстрации ее силы на Западе. Руководство СССР стремилось показать, что советским ученым есть чем гордиться.

Так получилось, что Зельдович, получив приглашение из Лондона для Новикова, который должен был прочитать один из основных докладов на конференции по общей теории относительности, смог убедить власти включить своего молодого коллегу в советскую делегацию. Новикову было о чем рассказать, он вполне мог создать определенно положительное впечатление о мощи советской физики.

В Лондоне Новиков прочел часовой доклад для трех сотен ведущих мировых специалистов по общей теории относительности. Его доклад был настоящим триумфом. Результаты по гравитационному схлопыванию «гористой» звезды были только небольшой частью доклада. Остальной доклад был посвящен достижениям теории релятивистской гравитации, нейтронным звездам, схлопыванию звезд, черным дырам, природе квазаров, гравитационному излучению и происхождению Вселенной. Сидя в Лондоне и слушая Новикова, я был ошеломлен широким размахом и мощью исследований Зельдовича и его группы. Никогда прежде я не видел ничего подобного!

После доклада Новикова я присоединился к группе энтузиастов, собравшейся вокруг него, и обнаружил к моему вящему удовольствию, что мой русский немного лучше, чем его английский, и моя помощь в переводе была востребована в ходе дискуссии. Когда толпа растаяла, мы с Новиковым продолжили нашу беседу в частном порядке. Так началась наша дружба.

* * *

Ни я и никто другой не мог в Лондоне понять всех деталей анализа, сделанного группой Зельдовича по проблемам «безволосости». Это было слишком сложно. Мы ждали опубликования работы, в которой все было бы подробно объяснено.

Печатная версия прибыла в Принстон в сентябре 1969 г. на русском языке. И снова я был благодарен судьбе за то, что в свое время провел много скучных часов, изучая русский язык. Анализ состоял из двух частей. Первая часть, над которой работали Дорошкевич и Новиков, представляла собой математическое рассмотрение эволюции статичной звезды с малой горкой. Когда такая звезда становится все более ком-

пактной, возможны два результата. Либо вокруг звезды возникает совершенно сферическая черная дыра, либо из-за горки появляется такая огромная кривизна пространства-времени при приближении звезды к критической окружности, что влияние горы нельзя больше рассматривать как «малое возмущение»; в этом случае такой метод расчета применять нельзя, и результат схлопывания непредсказуем. Выводы второй части статьи были основаны на подходах, которые я стал называть «Типичными аргументами Зельдовича»: если гора первоначально мала, *интуитивно ясно*, что она *не может* создать огромную кривизну при приближении звезды к критической окружности. Мы должны отвергнуть эту возможность. Правильным будет другой ответ: звезда должна образовать совершенно сферическую черную дыру.

То, что было интуитивно ясно Зельдовичу (и, в конце концов, оказалось верным), было далеко не очевидно большинству западных физиков. Вокруг этого утверждения развернулась дискуссия.

Дискуссии такого рода крайне полезны. Они привлекают физиков, как пикники привлекают муравьев. Так было и с «безволосыми» аргументами группы Зельдовича. Физики сначала «полезли» на спор, как муравьи-одиночки, а потом набросились гурьбой.

* * *

Первым был Вернер Израэль. Он родился в Берлине, воспитывался в Южной Африке, изучал законы относительности в Ирландии. Позднее он пытался организовать группу по исследованию теории относительности в Эдмонтоне, в Канаде. Вначале он улучшил первую, математическую часть статьи, которую разработали Дорошкевич и Новиков: он рассмотрел не только крошечные горки, как сделали советские ученые, но рассмотрел горы любого размера и формы. По сути дела, его расчеты подходили для *любого* типа схлопывания, в том числе несферического, и даже квадратного. Он рассмотрел также динамический процесс схлопывания, а не только идеализированную последовательность статичных звезд. Замечателен был также вывод Израэля. Он был похож на вывод Дорошкевича–Новикова, но оказался гораздо сильнее его: *у несферического схлопывания может быть только два результата. Либо черной дыры вообще не возникает, либо черная дыра получается совершенно сферической*. Но для того чтобы этот вывод был верен, схлопывающееся тело должно обладать двумя особенностями: оно должно быть совершенно лишено электрического заряда и не должно вращаться. Почему это так, станет ясно ниже.

О результатах своего анализа Израэль впервые рассказал 8 февраля 1967 г. на лекции в Королевском колледже в Лондоне. Название его лекции было загадочным, но Деннис Сиам из Кембриджа направил своих студентов в Лондон послушать ее. Один из этих студентов, Джордж Эллис, вспоминает: «Это была очень-очень интересная лекция. Это было что-то совершенно новое, совершенно неожиданное. Ничего подобного мы никогда прежде не слышали». Когда Израэль закончил, Чарльз Мизнер (бывший студент Уилера) встал и спросил: Что произойдет, если схлопывающаяся звезда вращается и имеет электрический заряд? Могут ли и здесь появиться две возможности: вообще не будет черной дыры или дыра будет иметь уникальную форму, полностью определяемую массой, вращением и зарядом схлопывающейся звезды? Ответ, в конце концов, оказался положительным, но только после того, как интуитивный вывод Зельдовича был подвергнут проверке.

* * *

Вспомним, что Зельдович, Дорошкевич и Новиков изучали слабодеформированные звезды. Они исследовали звезды почти сферической формы с маленькими горками. Проведенный ими анализ и утверждения Зельдовича вызвали множество вопросов.

Каков будет результат схлопывания звезды, имеющей небольшую горку на поверхности? Приведет ли гора к огромному искривлению пространства-времени при приближении звезды к критической поверхности (вывод, отвергнутый интуицией Зельдовича)? Или же влияние горы исчезнет и останется совершенно сферическая черная дыра (вывод, к которому пришел Зельдович)? И если образуется совершенно сферическая черная дыра, как удастся ей избавиться от гравитационного влияния горы? *Что заставляет черную дыру становиться сферической?*

Будучи одним из студентов Уилера, я взялся ответить на эти вопросы. Но не сам, а с помощью своих студентов. Шел 1968-й год. Я закончил свою диссертацию в Принстоне и вернулся в альма-матер, Калифорнийский технологический институт, сначала в качестве постдока, а затем профессора. И я начал собирать вокруг себя группу студентов, подобно тому, как это делал Уилер в Принстоне.

Со мной работал некто Ричард Прайс из Бруклина. Это был сильный молодой человек с лохматой бородой и весом фунтов в двести (плюс черный пояс по карате). Он уже принимал участие в нескольких моих исследованиях, включая работы с методами возмущений. Эти

математические методы могли оказаться полезными при ответе на выше сформулированные вопросы. Теперь он был достаточно зрел и для того, чтобы взяться за более сложную задачу. Проверка интуитивного вывода Зельдовича вполне подходила для этой цели, если бы не одно обстоятельство: слишком многие взялись за нее. Муравьи гурьбой повалили на пикник. Прайсу следовало торопиться.

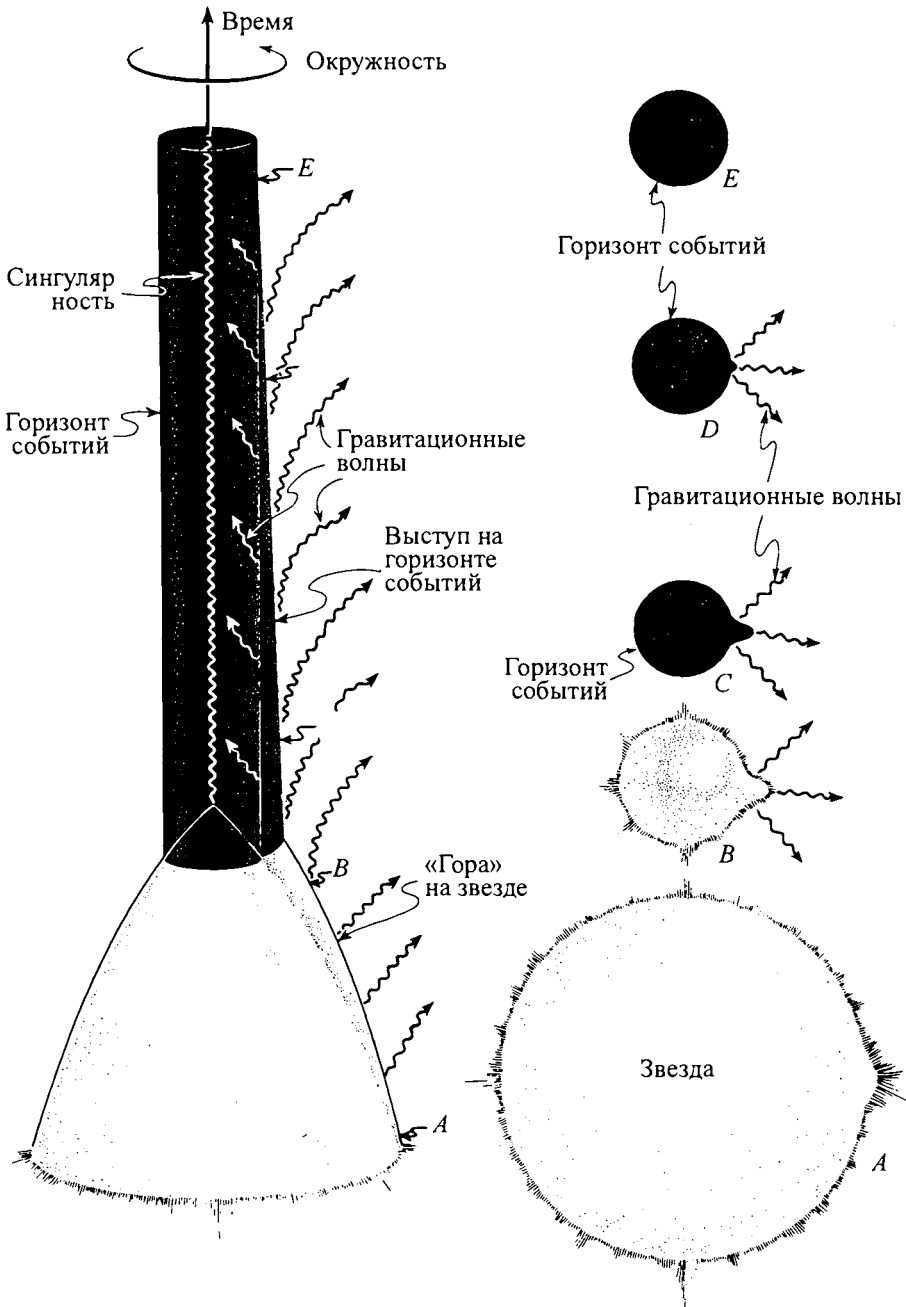
Он не успел. Другие обошли его на повороте. Он пришел на финиш третьим, после Новикова и Израэля. Но он смог получить гораздо более основательный и полный результат.

Достижения Прайса стали бессмертными благодаря перу Джека Смита, юмориста из *Лос-Анджелес Таймс*. В выпуске от 27 августа 1970 г. Смит описал свой визит в Калифорнийский технологический институт накануне: «После завтрака в местной столовой я в одиночестве прогуливался по университетскому городку. В воздухе была разлита Высокая Мысль. Оливковые ветви колыхались под ее порывами. Я заглянул в окно. Там стояла доска, усеянная уравнениями так плотно, как дорожка листьями в осеннем парке. Меж ними выделялись три английские фразы. *Теорема Прайса: все, что может быть излучено, излучается. Наблюдение Шутца: все, что излучается, может быть излучено. ВСЕ может излучаться тогда и только тогда, когда оно излучается.* Я шел и думал, до подобных ли перлов будет студентам осенью, когда в этих стенах появятся девушки-первокурсницы. Держу пари, «излучения» будет много».

Эта цитата требует пояснений. «Наблюдение Шутца» приведено для красного словца, но теорема Прайса «все, что может быть излучено, излучается» представляла собой серьезное доказательство утверждения Роджера Пенроуза, сделанного им в 1969 г.

Теорему Прайса можно проиллюстрировать с помощью схлопывания гористой звезды. На рис. 7.4 изображено такое схлопывание. В левой части рисунка дана пространственно-временная диаграмма (см. также рис. 6.7 главы 6). В правой части показана эволюция формы звезды и горизонта событий в последовательные моменты времени, снизу вверх («моментальные кадры»).

При схлопывании звезды (два нижних кадра на рис. 7.4) ее гора становится больше и, соответственно, растет «гористое» искажение пространственно-временной кривизны вокруг звезды. Затем, когда звезда ныряет под свою критическую поверхность и создает вокруг себя горизонт событий (средний кадр), искаженная пространственно-временная кривизна деформирует этот горизонт, на котором возникает гористый выступ. Последний, однако, не может существовать долго. Звездная гора, которая породила его, находится теперь внутри черной



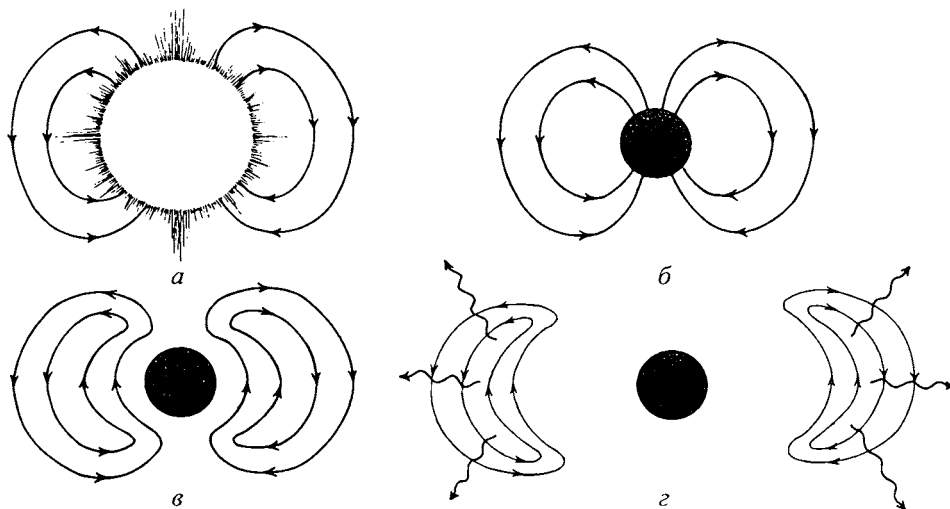
7.4. Пространственно-временная диаграмма (*слева*) и последовательность моментальных кадров (*справа*), показывающая схлопывание гористой звезды с образованием черной дыры

дыры, поэтому горизонт событий не может больше чувствовать ее влияния. Выступ на горизонте событий не поддерживается больше этой горой. Горизонт отделяется от этого выступа единственным доступным способом: он преобразует его в «складки» кривизны пространства-времени (гравитационные волны — глава 10), которые распространяются во всех направлениях (два верхних кадра). Некоторые «складки» попадают в черную дыру, другие вылетают в окружающую Вселенную и, отлетая, оставляют черную дыру совершенной сферической формы.

Нечто подобное происходит, когда мы дергаем скрипичную струну. Пока мы держим струну, она остается деформированной; пока гора выступает из черной дыры, она деформирует вновь родившийся горизонт событий. Когда мы убираем палец со струны, она начинает колебаться и посылать звуковые волны в комнату. Они уносят энергию деформации струны, и струна вновь распрямляется. То же происходит тогда, когда гора скрывается внутри черной дыры. Она не может больше поддерживать горизонт событий деформированным, он начинает вибрировать и испускать гравитационные волны. Волны уносят энергию деформации горизонта событий, и горизонт принимает совершенно сферическую форму.

Как это схлопывание с горой связано с теоремой Прайса? В соответствии с законами физики, гористый выступ на горизонте событий *может* превратиться в гравитационное излучение (складки кривизны). Теорема Прайса утверждает, что этот выступ *должен* превратиться в гравитационные волны и исчезнуть. *Это и есть механизм «безволосости».*

Теорема Прайса объясняет не только то, как деформированная черная дыра избавляется от своей деформации, но и то, как замагниченная черная дыра теряет свое магнитное поле (рис. 7.5). (Этот последний случай был рассчитан на компьютере Вернером Израэлем и двумя его студентами из Канады, Виценте де ла Круз и Тедом Чейзом, еще до открытия теоремы Прайса.) В результате схлопывания замагниченной звезды возникает замагниченная черная дыра. Перед тем, как горизонт событий поглощает схлопывающуюся звезду (рис. 7.5a), магнитное поле становится неотъемлемой частью звезды; электрические токи внутри звезды препятствуют исчезновению этого поля. После того как горизонт событий поглотил звезду (рис. 7.5б), поле больше не чувствует электрических токов звезды; они больше не удерживают его. Поле теперь пронизывает не звезду, а горизонт событий, но горизонт не способен его удержать. В соответствии с законами физики, поле может превратиться в электромагнитное излучение



7.5. Последовательность моментальных кадров, показывающих схлопывание намагниченной звезды (а) с образованием черной дыры (б). Черная дыра вначале наследует магнитное поле звезды. Однако дыра не может удержать это поле. Поле соскальзывает с нее (в), превращается в электромагнитное излучение и улетает (г)

(«дрожание» магнитной и электрической силы), а теорема Прайса утверждает, что это так и будет (рис. 7.5в). Электромагнитное излучение рассеивается, частично внутрь черной дыры и частично от нее, а дыра становится немагнитной (рис. 7.5г).

Итак, как мы видели, горы и магнитные поля могут рассеиваться. Что же тогда остается? Что *не может* превратиться в излучение? Ответ простой: среди законов физики существуют особые законы, называемые *законами сохранения*. В соответствии с этими законами, существуют некоторые величины, которые никогда не могут колебаться и превращаться в излучение и покидать окрестности черной дыры. Этими сохраняющимися величинами являются: гравитационное притяжение черной дыры, закручивание пространства из-за ее вращения (которую мы будем обсуждать дальше) и *радиальные* линии электрического поля, возникающие благодаря электрическому заряду черной дыры и направленные наружу (мы вернемся к этому позже).⁵

⁵ В конце 1980-х годов стало ясно, что благодаря законам квантовой механики появляются дополнительные сохраняющиеся величины, связанные с «квантовыми полями» (эти поля будут обсуждаться в главе 12). К этим величинам относятся: масса черной дыры, ее вращение и электрический заряд. Эти величины не будут исчезать в результате излучения и образуют своеобразный «квантовый волосной покров» при рождении черной дыры. Эти квантовые волосы могут сильно влиять на окончательную судьбу микроскопической, испаряющейся черной дыры (глава 12), но не влияют на макроскопические дыры (масса которых больше массы Солнца), поскольку квантовая механика не сказывается на макроскопических масштабах.

Таким образом, в соответствии с теоремой Прайса, единственное, что останется после всех излучений, — это влияние массы черной дыры, ее вращения и заряда. Все остальные характеристики черной дыры будут утеряны. Их унесет с собой излучение. Это означает, что, наблюдая черную дыру, мы можем получить данные только о массе, вращении и заряде первоначальной звезды. Из свойств черной дыры мы даже не можем выяснить (в соответствии с расчетами Джеймса Хартла и Якоба Бекенштейна, студентов Уилера), была ли звезда — родоначальница черной дыры сделана из вещества или антивещества, протонов и электронов, или из нейтрино и антинейтрино. Более точно, говоря словами Уилера, у черной дыры *почти* нет волос. Ее единственные «волосы» — масса, вращение и электрический заряд.

* * *

Окончательное доказательство отсутствия волос у черной дыры (за исключением ее массы, вращения и электрического заряда) было сделано немного позднее Прайса. Его анализ был ограничен почти сферическими схлопывающимися звездами, которые если и вращались, то очень медленно. Это ограничение было обусловлено методами возмущений, которыми он пользовался. Для изучения окончательной судьбы очень сильно деформированной и быстровращающейся схлопывающейся звезды требовался совсем другой математический аппарат.

Ученики Денниса Сиамы из Кембриджского университета хорошо владели математическим аппаратом, но он был очень сложен. Им и их интеллектуальным потомкам понадобилось пятнадцать лет, чтобы окончательно доказать, что у черных дыр нет волос. Даже если черная дыра быстро вращается и из-за этого сильно деформирована, окончательные свойства черной дыры (после испускания всего излучения) определяются только массой, вращением и зарядом черной дыры. Львиная доля этого доказательства пришлась на долю трех человек — учеников Сиамы: Брэндона Картера и Стивена Хокинга, а также Вернера Израэля. Большой вклад внесли также Дэвид Робинсон, Гэри Бантинг и Павел Мазур.

* * *

В главе 3 я обсуждал большую разницу, которая существует между законами физики в нашей, реальной Вселенной и в обществе муравьев, которое описано в книге Т. Х. Уайта «Король сегодня и навсегда». Основное правило муравьев в книге Уайта — «Все, что не запрещено,

является принудительно-обязательным». Но законы физики сильно нарушают это правило. Множество вещей, разрешаемых законами физики, настолько маловероятны, что никогда не происходят. Теорема Прайса является замечательным исключением. Это одна из немногих ситуаций, с которыми я встречался в физике, где твердо поддерживается муравьиное правило: если закон физики не запрещает черной дыре испускать какое-нибудь излучение, то это излучение является обязательным.

Очень необычными являются следствия безволосого состояния черной дыры. Обычно мы, физики, строим упрощенные теоретические или компьютерные модели в попытках понять сложную Вселенную вокруг нас. Например, чтобы понять погоду, физики-атмосферщики строят компьютерные модели циркуляции земной атмосферы. Чтобы понять землетрясения, геофизики строят простые теоретические модели перемещения земных платформ друг относительно друга. Чтобы понять схлопывание звезд, Оппенгеймер и Снайдер в 1939 г. построили простую теоретическую модель, в которой рассмотрели схлопывающееся облако вещества, совершенно сферическое, однородное и полностью лишенное давления. Строя все эти модели, физики понимают, что они достаточно условны. Эти модели являются всего лишь бледными отражениями сложных структур реальной Вселенной.

Не так обстоит дело с черной дырой, по крайней мере, «безволосой». Такая черная дыра настолько проста, что мы можем описать ее точными математическими формулами. Здесь нам не нужны идеализации. Нигде больше в макроскопическом мире (на масштабах больших, чем размер элементарной частицы) это не выполняется. Нигде больше математические уравнения не являются настолько близкими к реальности. Только с черной дырой можно обрести такую свободу.

Почему черные дыры так отличаются от всех остальных объектов в макроскопической Вселенной? Почему они, и только они, такие элегантно простые? Если бы я знал ответ, я бы смог проникнуть глубоко в природу физических законов. Но я не знаю. Возможно, следующее поколение физиков поймет.

Черные дыры вращаются и пульсируют

Каковы свойства безволосых черных дыр, так точно описываемые математиками в рамках ОТО?

Если считать, что черная дыра абсолютно лишена электрического заряда и вращения, то она превращается в сферическую дыру, с

которой мы уже встречались в предыдущих главах. Она описывается математическим решением уравнения поля Эйнштейна, полученным Карлом Шварцшильдом в 1916 г. (главы 3 и 6).

Когда электрический заряд попадает в такую дыру, она приобретает всего лишь одно новое свойство: силовые линии электрического поля, которыми она утыкана по радиусам, подобно ежовым колючкам. Если заряд положительный, силовые линии электрического поля отталкивают протоны от черной дыры и притягивают электроны. Если он отрицательный, силовые линии отталкивают электроны и притягивают протоны. Существует математическое решение уравнения поля Эйнштейна, точно описывающее заряженную черную дыру. Это решение было найдено немецким физиком Хансом Райсснером в 1916 г. и голландским физиком Гуннаром Нордстремом в 1918 г. Но физический смысл решения Райсснера–Нордстрема стал понятен только в 1960 г., когда два студента Уилера, Джон Грейвс и Дитер Брилл, открыли, что это решение описывает заряженную черную дыру.

Врезка 7.2

Организация советской и западной науки: контрасты и последствия

Когда мы с моими молодыми коллегами-физиками пытались развить гипотезу обруча и доказать, что черные дыры не имеют волос, а также понять, как они теряют свои волосы, мы в процессе этого постигали, насколько отличаются подходы к организации физической науки в СССР, в Британии и в Америке. Уроки, усвоенные нами, могут иметь некоторое значение для будущего, особенно в странах бывшего Советского Союза, в которых все государственные учреждения — научные, правительственные, экономические — пытаются сейчас (1993 год⁶) провести реорганизацию по западному образцу. Западная модель отнюдь не совершенна, а советская система была не так плоха!

В Америке и в Британии существует постоянная «текучка» молодых кадров через научно-исследовательские группы, подобные группам Уилера и Сиамы. Студенты могут работать в этой группе до последнего курса, а на выпускном курсе они занимаются своим дипломом. Выпускники могут войти в группу и работать там от трех до пяти лет, а после защиты находят себе другое место работы. К этой группе могут присоединиться также и «постдоки» на два или три года, а затем они уезжают и либо организуют свою собственную группу в другом месте (как я в Калифорнийском институте) или вливаются в какую-либо другую группу. Практически никому в Британии и в Америке не

⁶ Соображения К.Торна сейчас (в 2006 г.) даже более актуальны, чем они были в 1993-м! [Прим. ред.]

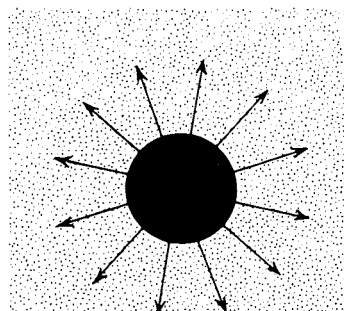
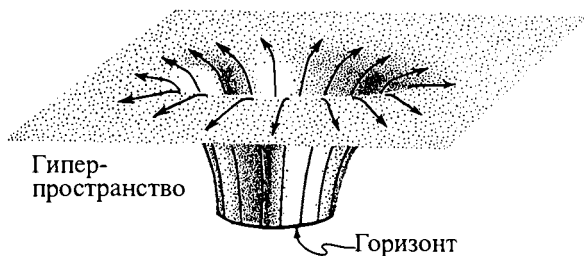
разрешают сидеть на одном месте под крылышком своего родного учителя, даже если ученик весьма талантлив.

Напротив, в СССР выдающиеся молодые физики (такие, как Новиков) обычно остаются рядом со своим преподавателем десять, двадцать, тридцать, а то и более лет. Ведущие советские физики, такие как Зельдович или Ландау, обычно работают в институте Академии наук, а не в университетах. Их преподавательская нагрузка мала или ее вообще нет. Оставляя у себя самых лучших студентов, они выстраивают вокруг себя постоянную, крепко спаянную и мощную группу исследователей, которые могут остаться с учителем даже до конца своей деятельности.

Некоторые из моих советских друзей считают американско-британскую систему недостаточно эффективной. Почти все крупные британские и американские физики работают в университетах, где исследовательская работа подчинена учебному процессу и где существует очень мало постоянных рабочих мест для создания долговременной и сильной группы исследователей. В результате, в Британии и в Америке в 1930–1950 годах не существовало групп физиков-теоретиков, которые могли сравниться с группой Ландау или в 1960–1970 годах с группой Зельдовича. Запад в этом смысле не мог соревноваться с Советским Союзом.

Некоторые из моих американских друзей, наоборот, считают советскую систему недостаточно эффективной. В СССР было очень трудно перемещаться из института в институт и переезжать из города в город, поэтому молодые физики, как правило, оставались со своими учителями. У них не было возможности организовывать свои собственные группы. В результате, как утверждали критики, возникала феодальная система. Учитель был как лорд, а его группа — как крепостные, пожизненно работавшие на феодала. Слуги и господа во многом зависели друг от друга, но вопроса о том, кто хозяин, не возникало. Если хозяином был такой большой мастер, как Зельдович или Ландау, действия группы были очень продуктивны. Если хозяин проявлял авторитарность и непонимание (как в большинстве случаев и происходило), результат был довольно трагичным: слабая творческая отдача и недостаточно высокий уровень жизни для «слуг».

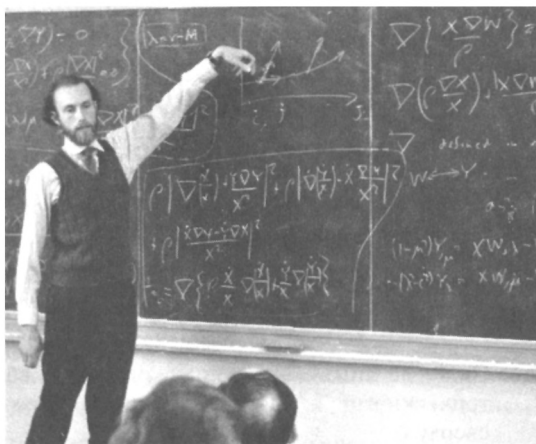
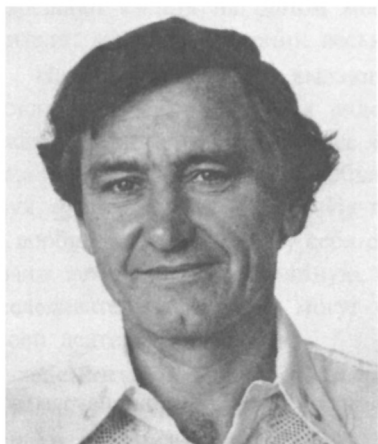
При советской системе каждый большой учитель, такой как Зельдович, создавал всего одну научно-исследовательскую группу, хотя и очень высокопродуктивную. С ней не мог сравниться никто на Западе. Напротив, выдающиеся американские или британские учителя, такие как Уилер или Сиама, производят в качестве дочерних много меньших по размерам и более слабых групп, рассеянных по всей земле. Но эти группы могут иметь большой кумулятивный эффект. Американские и британские учителя имеют постоянный приток новых молодых людей для поддержания творческого потенциала на должном уровне. В тех редких случаях, когда советские учителя хотели начать все сызнова, они должны были ломать связи со своей прежней группой. Подчас последствия этого были достаточно тяжелыми.



7.6. Силовые линии электрического поля, выходящие из горизонта событий электрически заряженной черной дыры. *Слева:* диаграмма. *Справа:* вид на диаграмму сверху

По сути дела, так и произошло с Зельдовичем. Он начал создавать свою группу из астрофизиков в 1961 г. К 1964 г. она уже превосходила любую другую группу теоретиков-астрофизиков в мире. В 1978 г., вскоре после окончания Золотого века, произошел драматический разрыв, группа распалась, почти все из нее ушли. Зельдович, конечно, был психологически травмирован, но при этом он обрел свободу для того, чтобы начать все сначала. Грустно, но его попытка не удалась. Никогда уже он не смог окружить себя такими талантливыми учеными, которыми он когда-то руководил с помощью Новикова. Новиков, который в предыдущей группе был помощником Зельдовича, стал теперь самостоятельным исследователем. В 1980-х Новиков возглавил реконструированную группу Зельдовича.

Кривизну пространства вокруг заряженной черной дыры и силовые линии ее электрического поля можно изобразить с помощью диаграммы (левая часть рис. 7.6). По сути, это та же диаграмма, что и справа внизу на рис. 3.4, но без звезды (зачерненный участок на рис. 3.4), так как звезда находится внутри черной дыры и поэтому больше не поддерживает контакта с внешней Вселенной. Точнее говоря, на этой диаграмме изображена экваториальная «плоскость» — двумерный срез пространства вокруг черной дыры, погруженной в трехмерное гиперпространство. (Объяснение таких диаграмм дано на рис. 3.3 и в соответствующем месте в тексте.) Экваториальная «плоскость» обрезана горизонтом событий черной дыры, так что мы видим только окрестности черной дыры снаружи, но не изнутри. Горизонт событий, который в реальности представляет собой поверхность сферы, выглядит как окружность на этой диаграмме, так как мы видим только его экватор. На диаграмме видно, как силовые линии электрического поля черной дыры радиально выходят из горизонта событий. Если мы посмотрим на эту диаграмму сверху (правая часть рис. 7.6),



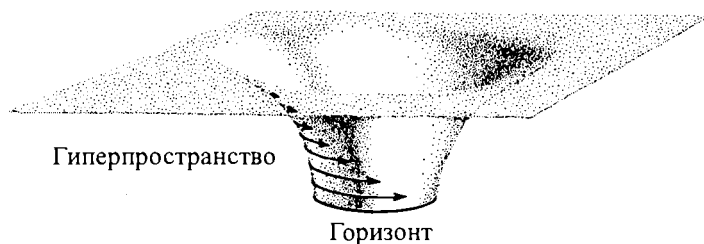
Слева: Рой Керр, фото 1975 г. Справа: Брендон Картер, читающий доклад о черных дырах на летней школе во французских Альпах в июне 1972 г. [Слева: предоставлено Роем Керром; Справа: фото Кипа Торна]

мы не увидим искривления пространства, но более ясно увидим силовые линии электрического поля.

Влияние вращения на черную дыру стало понятно только в конце 1960-х годов. Это понимание пришло в основном благодаря Брендону Картеру, студенту Сиамы в Кембридже.

Когда Картер вошел в группу Сиамы осенью 1964 г., Сиама предложил ему в качестве первой задачи исследовать схлопывание вращающихся звезд. Сиама объяснил, что все предыдущие расчеты касались схлопывания идеализированных невращающихся звезд. Теперь же пришло время исследовать эффекты вращения. Новозеландский математик по имени Рой Керр только что опубликовал статью, в которой дал решение уравнения поля Эйнштейна, описывающее пространственно-временную кривизну вокруг вращающейся звезды. Это было первое решение для вращающихся звезд. К несчастью, сообщил Сиама, это очень специфическое решение. Оно не может описать *все* вращающиеся звезды. Вращающиеся звезды имеют много «волос» (много разных свойств, таких как сложные формы и сложное внутреннее движение газа), а решение Керра было «безволосым»: формы пространственно-временной кривизны были очень гладкими и простыми, слишком простыми, чтобы соответствовать типичным вращающимся звездам. Тем не менее, решение, полученное Керром для уравнения поля Эйнштейна, было шагом вперед.

Картер взялся за решение этой задачи и очень быстро смог получить ответ. В течение года он показал, что решение Керра описывает не просто вращающуюся звезду, но вращающуюся черную дыру. (Это открытие было также независимо сделано Роджером Пенроузом в



7.7. Диаграмма, показывающая «торнадоподобное завихрение» пространства, создаваемое вращением черной дыры

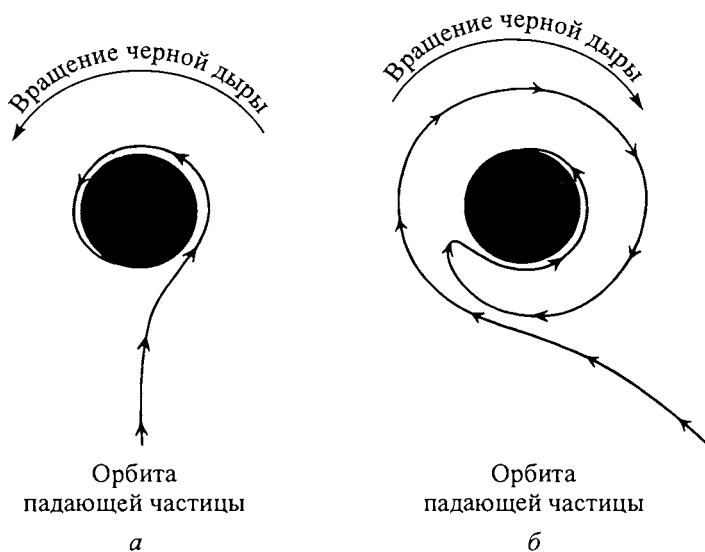
Лондоне, Робертом Бойером в Ливерпуле и Ричардом Линдквистом, бывшим студентом Уилера, работавшим в Веслиянском университете в Мидлтауне, Коннектикут.) К середине 1970-х годов Картер и другие исследователи сделали еще одно открытие: решение Керра описывает не только специфический тип вращающихся черных дыр, но все вращающиеся черные дыры, которые в принципе могут существовать.

Физические свойства вращающейся черной дыры являются следствием математического решения Керра. Картер, погружившись в эту математику, понял, какими должны быть эти свойства. Одним из наиболее интересных свойств было завихрение, которое дыра создает в пространстве вокруг себя.

Это завихрение изображено на диаграмме рис. 7.7. Экваториальная поверхность черной дыры имеет форму горна (двумерный срез пространства вокруг черной дыры) и вложена в плоское трехмерное гиперпространство. Вращение черной дыры влияет на окружающее пространство (воронкообразная поверхность) и закручивает его в вихрь, скорости в котором пропорциональны длине стрелок на диаграмме. Сравнивая с обычным земным торнадо, в котором вдали от середины воздух вращается медленно, можно сказать, что вдали от горизонта событий черной дыры пространство вращается медленно. В середине торнадо на Земле воздух вращается быстрее, и аналогично, возле горизонта событий черной дыры пространство быстро вращается. На горизонте пространство прочно привязано: оно вращается с той же самой скоростью, что и горизонт событий.

Вихрь пространства безжалостно увлекает частицы, которые падают в черную дыру. Рис. 7.8 показывает траектории двух таких частиц в системе координат статичного внешнего наблюдателя, т. е. в системе координат наблюдателя, который не падает через горизонт событий в черную дыру.

Первая частица (рис. 7.8a) мягко падает в черную дыру. Если бы дыра не вращалась, эта частица, подобно поверхности схлопывающей-



7.8. Траектории двух частиц, падающих в черную дыру. (Так, как они видны в неподвижной внешней системе отсчета.) Несмотря на то, что они движутся вначале совершенно по-разному, обе частицы увлекаются завихрением пространства и при приближении к горизонту событий начинают вращаться вместе с черной дырой

ся звезды, падала бы вначале по радиусу все быстрее и быстрее. Затем неподвижный внешний наблюдатель увидел бы, что она замедлила свое падение и остановилась прямо на горизонте. (Вспомним «замерзшие звезды» главы 6.) Из-за вращения черной дыры этот процесс происходит иначе. Вращение вызывает завихрение пространства, которое вынуждает частицу при ее приближении к горизонту событий вращаться в связке с самим горизонтом. Частица, таким образом, вмораживается во вращающийся горизонт событий, и статичный внешний наблюдатель увидит, что она будет всегда вращаться вместе с горизонтом. (Таким же образом при схлопывании вращающейся звезды и превращении ее во вращающуюся черную дыру внешний статичный наблюдатель увидит, что поверхность звезды «вмораживается» во вращающийся горизонт, с которым ей суждено вращаться вечно.)

Хотя внешние наблюдатели видят, что частица на рис 7.8а вмерзла во вращающийся горизонт и навечно там осталась, сама частица видит нечто совершенно другое. При приближении частицы к горизонту время частицы из-за гравитационного замедления течет все более медленно по сравнению со временем статичной внешней системы отсчета. За бесконечное внешнее время для частицы пройдет ограниченный и очень маленький промежуток времени. За этот конечный промежуток времени частица достигнет горизонта событий черной

7. Золотой век

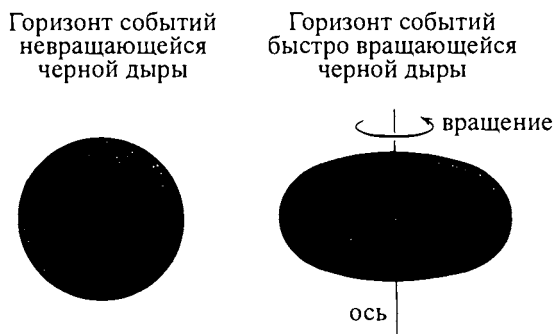
дыры и затем быстро нырнет прямо под горизонт событий по направлению к центру черной дыры. Эта огромная разница между тем, как видят падение частицы внешние наблюдатели и сама частица, полностью соответствует тому, как по-разному видно схлопывание звезды с поверхности (быстрое ныряние под горизонт) и внешними наблюдателями (замерзание схлопывания; последняя часть главы 6).

Вторая частица (рис. 7.8б) падает в черную дыру по закручивающейся траектории, которая вращается противоположно направлению вращения черной дыры. Однако когда частица ближе подходит к горизонту событий, завихрение пространства ее подхватывает и меняет направление ее вращения на обратное. Как и первая частица, она захватывается горизонтом событий, и будет вращаться вместе с ним. Так это будет выглядеть для внешних наблюдателей.

Вращение черной дыры не только создает завихрение в пространстве, но и смещает горизонт событий, подобно тому, как вращение Земли деформирует земную поверхность. Центробежные силы действуют на вращающийся земной экватор и, по сравнению с полюсами, он выступает на 22 км. Таким же образом, центробежные силы, действующие на горизонт событий черной дыры, выпячивают его вблизи экватора (рис. 7.9). Если черная дыра не вращается, ее горизонт остается сферическим (левая половина рисунка). Если дыра быстро вращается, ее горизонт сильно вытягивается (правая половина рисунка).

Если бы черная дыра вращалась очень быстро, центробежные силы могли бы разорвать ее горизонт событий подобно тому, как они расплескивают воду из ведра при его быстром вращении. Таким образом, существует некоторая максимальная скорость вращения, при которой черная дыра еще может выжить. Дыра в правой половине рис. 7.9 вращается со скоростью, составляющей 58% от максимальной.

Можно ли ускорить черную дыру до скорости, превышающей максимум, разрушить горизонт событий и посмотреть, что у нее внутри? К сожалению, нет. В 1986 г., через десять лет после окончания Золотого века, Вернер Израэль показал: нет смысла пытаться заставить звезду вращаться быстрее, чем разрешенный для нее максимум. Например, если ускорять черную дыру, вращающуюся с максимальной скоростью, бросая в нее быстро движущееся вещество, центробежные силы не дадут этому веществу достичь горизонта событий и проникнуть в дыру. Более того, любое малейшее взаимодействие дыры, имеющей максимальную скорость вращения, с окружающей Вселенной (например, гравитационное притяжение далеких звезд) заставляет дыру замедляться. Представляется, что законы физики не позволяют никому



7.9. Горизонт событий невращающейся черной дыры (*слева*) и дыры, вращающейся со скоростью 58% от максимальной (*справа*). Влияние вращения на форму горизонта событий открыто в 1973 г. Лэрри Смарром, студентом Стэнфордского университета, который решал эту задачу по просьбе Уилера

вне черной дыры заглянуть в ее внутренности и раскрыть секреты квантовой гравитации, спрятанные в центральной сингулярности черной дыры (глава 13).

Если черная дыра имеет массу Солнца, ее максимальная скорость вращения составляет 1 оборот за 0,000062 с (62 микросекунды). Поскольку окружность такой черной дыры равна примерно 18,5 км, это соответствует скорости вращения $(18,5 \text{ км}) / (0,000062 \text{ с})$, что примерно равно скорости света, 299,792 км/с. (И это не просто совпадение.) Черная дыра с массой в 1 миллион Солнц имеет размер в миллион раз больший, чем дыра в 1 солнечную массу, поэтому ее максимальная скорость вращения в миллион раз меньше и составляет один оборот за 62 с.

* * *

В 1969 г. Роджер Пенроуз (о котором мы подробно узнаем в главе 13) сделал замечательное открытие. Рассматривая решение уравнения поля Эйнштейна, полученное Керром, он открыл, что вращающаяся черная дыра накапливает *энергию вращения* в вихре пространства вокруг себя. Поскольку эта энергия не внутри, а *вне* горизонта событий черной дыры, она может извлекаться и использоваться. Открытие Пенроуза было замечательно потому (как позднее указал Деметриос Кристодулу), что вращательная энергия черной дыры огромна. Если дыра вращается с максимально возможной скоростью, эффективность сохранения и высвобождения энергии в 48 раз выше, чем эффективность всего ядерного топлива Солнца. Если бы в Солнце сгорело *все* его ядерное топливо (на самом деле это невозможно), только 0,006

7. Золотой век

часть массы Солнца превратилась бы в тепло и свет. А если извлечь всю вращательную энергию быстровращающейся черной дыры (в результате чего она остановилась бы), то мы смогли бы использовать $48 \times 0.006 = 29\%$ массы черной дыры в качестве энергии.

Удивительно то, что физики целых семь лет искали практический метод, с помощью которого природа могла бы извлекать энергию вращения черной дыры. Они отбрасывали один сумасшедший метод за другим. Каждый из них мог бы в принципе работать, но практической выгоды не сулил. Наконец, ученые обнаружили, насколько мудра природа. В главе 9 я опишу эти поиски и открытия, которыми они увенчались: «машинерию» черных дыр, управляющую квазарами и гигантскими струями.

* * *

Как мы видели, из-за электрического заряда возникают силовые линии электрического поля, которые радиально торчат из горизонта событий черной дыры, а вращение приводит к водовороту в пространстве вокруг дыры, к искажению формы горизонта и к накоплению энергии. В таком случае, что произойдет с черной дырой, которая имеет как заряд, так и вращение? К сожалению, ответ не так уж интересен и содержит мало нового. Заряд черной дыры образует обычные силовые линии электрического поля. Вращение дыры создает обычный водоворот пространства возле нее, в котором запасается обычная энергия вращения, в результате чего экватор горизонта событий раздувается. Новым будет только то, что возникают довольно неинтересные магнитные силовые линии, созданные завихрением пространства в электрическом поле. (Эти силовые линии *не* являются новой формой «волос» на черной дыре; это всего лишь проявление взаимодействия прежних форм волос: взаимодействие завихрения с электрическим полем.) Все свойства вращающейся и заряженной черной дыры являются следствием элегантного решения уравнения Эйнштейна, полученного в 1965 г. Тедом Ньюманом в Питсбургском университете и группой его студентов: Юджином Каучем, К. Чиннапаредом, Альбертом Экстоном, А. Пракашем и Робертом Торренсом.

* * *

Черные дыры могут не только вращаться; они могут также пульсировать. Однако их пульсации были математически открыты только через десять лет после установления факта их вращения; как будто что-то стояло на пути этого открытия.

В течение трех лет (1969–1971) ученики Джона Уилера «смотрели» на пульсации черных дыр и не понимали, что они видят. Среди этих учеников были: Ричард Прайс (мой студент, следовательно, интеллектуальный внук Уилера), К. В. Вишвешвара и Лестер Эдельштейн (студенты Чарльза Мизнера в Мерилендском университете, т. е. тоже интеллектуальные внуки Уилера), а также Фрэнк Церилли (собственный студент Уилера в Принстоне). Вишвешвара, Эдельштейн, Прайс и Церилли обнаружили пульсации черных дыр при компьютерном моделировании и в расчетах с помощью карандаша и бумаги. Они думали, что они видят гравитационное излучение (складки кривизны пространства-времени) в окрестности черной дыры, попавшее в ловушку пространственно-временной кривизны собственно черной дыры. Эта ловушка была несовершенной; эти «складки» постепенно вытекали из окрестностей черной дыры и исчезали. Это было пикантно, но не очень интересно.

Осенью 1971 г. Билл Пресс, новый аспирант в моей группе, понял, что «складки» пространственно-временной кривизны, скачущие вокруг черной дыры, на самом деле могут являться пульсациями самой черной дыры. В конце концов, если смотреть на черную дыру извне, мы ничего не увидим, кроме кривизны пространства-времени. «Складки» кривизны, таким образом, есть ничто иное, как пульсации кривизны черной дыры, следовательно, пульсации самой черной дыры.

Конечно, такой подход менял дело. Если мы считаем, что черные дыры могут пульсировать, возникает естественный вопрос: похожи ли пульсации черных дыр на пульсации (звон) колокола или на пульсации звезд? До Пресса такие вопросы не возникали. После него они возникли естественным образом.

Колокол и звезда имеют собственные частоты, на которых они любят пульсировать. (Собственные частоты колокола дают чистый тон звучания.) Существуют ли у черной дыры собственные частоты, на которых она любит пульсировать? Да, ответил Пресс, применив метод компьютерного моделирования. Его открытие послужило стимулом для Чандрасекара и Стивена Детвейлера (интеллектуального пра-правнука Уилера) заняться поиском всех собственных частот пульсаций черной дыры. Мы вернемся к этим частотам, своего рода колокольным звонам черной дыры, в главе 10.

Если быстро вращающееся автомобильное колесо плохо отцентрировано, оно может начать колебаться, и эти колебания могут начать извлекать энергию из вращения колеса и использовать эту энергию для усиления колебаний. По сути дела, эти колебания могут стать такими сильными, что в экстремальных случаях они даже могут оторвать от

машины это колесо. Физики описывают такой процесс фразой: колебания колеса неустойчивы. Билл Пресс был знаком с подобным поведением колес и мог провести отсюда параллель к вращающимся звездам. Совершенно естественно, что после открытия им пульсаций черных дыр у него возникли вопросы: «Если черная дыра быстро вращается, то не будут ли ее пульсации неустойчивыми? Смогут ли они извлекать энергию из вращения черной дыры и использовать эту энергию для усиления пульсаций? Смогут ли эти пульсации стать такими большими, что разорвут черную дыру?» Чандрасекар (который еще не был глубоко погружен в проблему черных дыр) думал, что да. Я думал, что нет. В ноябре 1971 г. мы заключили пари.

Инструмента для разрешения спора в тот момент еще не было. Какие нам были нужны инструменты? Поскольку вначале пульсации должны быть слабыми и расти постепенно (если они будут расти вообще), их можно рассматривать как небольшие «возмущения» пространственно-временной кривизны у черной дыры — точно так же, как колебания звучащей рюмки являются малыми возмущениями формы рюмки. Это означало, что пульсации черной дыры можно проанализировать с помощью метода возмущений, который был описан во Врезке 7.1. Однако тот метод возмущений, которым пользовались Прайс, Пресс, Вишвешвара, Чандрасекар и др. осенью 1971 г., был применим только для возмущений невращающейся или очень медленно вращающейся черной дыры. Теперь им очень не хватало новых методов, методов возмущений для быстровращающихся черных дыр.

Тема поисков этих новых методов стала особенно актуальной в 1971–1972 гг. Мои студенты, студенты Мизнера и Уилера, студент Чандрасекара, Джон Фридман, вместе с учителем и многие другие были вовлечены в эти поиски. Конкуренция была жесткой. Победителем стал мой студент из Южной Африки Саул Тьюкольски.

Тьюкольски с удовольствием вспоминает тот момент, когда уравнения, описывающие его метод, «попали в точку». «Иногда в математике подсказку могут дать самые неожиданные ассоциации», — делится он своими воспоминаниями. — «Дело было вечером в мае 1972 г. в Пасадене, в нашей квартире на кухне, где я сидел за столом, погруженный в свои расчеты. Роз, моя жена, поджаривала блинчики на тефлоновой сковородке, к которой, как предполагается, ничего не прилипает. Но блинчики, тем не менее, прилипали. Каждый раз после очередного шлепка масла до меня долетали ее мало сдержанные комментарии и удары несчастной сковороды по плите. Я пытался уговорить ее вести себя потише, ибо, кажется, расчеты мои стали вытанцовываться: математические члены в уравнениях стали активно взаимоуничи-



Вечеринка в доме мамы Ковача в Нью-Йорке, декабрь 1972 г. Слева направо: Кип Торн, Маргарет Пресс, Билл Пресс, Розалина Тьюкольски и Саул Тьюкольски. [Предоставлено Шандором Ковачем]

тожаться! До полного и победного конца! Все встало на свои места. Я сидел, глядел на очень простую полученную мною конструкцию и думал: Ну до чего доводит глупость! Я сделал бы то же самое еще полгода назад; надо было лишь правильно расположить нужные члены».

* * *

Уравнения Тьюкольски объясняли все проблемы: собственные частоты пульсаций черной дыры, стабильность этих пульсаций, гравитационное излучение, возникающее при поглощении черной дырой нейтронной звезды, и многое другое. Все находки Тьюкольски были немедленно пущены в ход нашей физической братией: Алексеем Старобинским (студентом Зельдовича), Бобом Уолдом (студентом Уилера), Джефом Коуэном (студентом ученика Уилера, Дитера Брилла) и многими другими. Сам Тьюкольски вместе с Прессом взялся за наиболее важную проблему, связанную со стабильностью пульсаций черной дыры.

Их результаты, полученные путем соединения компьютерных вычислений и вычислений по новым формулам, были обескураживающими: пульсации черной дыры стабильны, несмотря на скорость ее

7. Золотой век

вращения.⁷ Пульсации черной дыры действительно извлекают энергию из ее вращения; но они также излучают энергию в виде гравитационных волн, и темп такого излучения всегда превышает темп извлечения энергии. Таким образом, энергия пульсаций постепенно сходит на нет. Она никогда не растет, следовательно, черная дыра никогда не погибнет от собственных пульсаций.

Чандрасекар, неудовлетворенный заключениями Пресса–Тьюкольски из-за их чрезмерного, по его мнению, доверия к компьютерным вычислениям, не признал своего поражения в нашем пари. Вот когда, мол, они целиком все докажут формулами, тогда-то он будет удовлетворен. Пятнадцать лет спустя Бернард Вайтинг, бывший постдок Хокинга (таким образом, интеллектуальный внук Сиамы), выдал, наконец, такое доказательство. Чандрасекар выкинул полотенце.⁸

Чандрасекар был еще большим перфекционистом, чем даже я. Они с Зельдовичем находились на разных концах спектра стремления к совершенству. Так, в 1975 г., когда молодежь Золотого века объявила этот самый век конченным и массовым порядком повалила прочь от черных дыр, Чандрасекар был уязвлен. Молодежь довела методы возмущения Тьюкольски почти до доказательства возможной стабильности черных дыр, но они не довели эти методы до такой формы, чтобы любой физик мог легко рассчитать *все* детали *любого* возмущения черной дыры — будь то пульсации, гравитационные волна от падения нейтронной звезды, «чернодырной» бомбы, и т.д. Такая незавершенность казалась ему нетерпимой.

Так Чандрасекар в шестидесятипятилетнем возрасте в 1975 г. бросил свой недюжинный математический интеллект на решение уравнений Тьюкольски. Со всей своей энергией, со всем внутренним озарением души он штурмовал математику, представляя ее в стиле «рококо: роскошной, радостной и богато украшенной». В 1983 г., в семьдесят три, он закончил работу над задачей, опубликовав трактат *Математическая теория черных дыр* — на много десятилетий ставший математическим справочником для всех исследователей черных дыр, настольной книгой, откуда можно извлечь методы решения любых задач о возмущении черных дыр, которые только можно себе представить.

⁷ Важная математическая часть доказательства стабильности была независимо предоставлена Стивеном Детвейлером и Джеймсом Ипсером из Чикаго, а недостающая часть — годом позже Джеймсом Хартлом и Дэном Уилкинсом из Калифорнийского университета в Санта Барбаре.

⁸ Моим выигрышем была подписка на «Плейбой», однако под давлением матери и сестры я вынужден был заменить ее на подписку на «Лисенер».

ПОИСК

глава, в которой предложен, воплощен и (возможно) привел к успеху метод поиска на небе черных дыр

Метод

Представьте себе, что вы Роберт Дж. Оппенгеймер. 1939-й год, вы только что убедились, что массивные звезды, когда умирают, должны образовывать черные дыры (главы 5 и 6). Засядете ли вы вместе с астрономами за разработку плана поиска на небе свидетельств того, что черные дыры действительно существуют? Вовсе нет. Если вы Оппенгеймер, то ваши интересы лежат в сфере фундаментальной физики. Вы можете предложить свои идеи астрономам, но ваше собственное внимание теперь сосредоточено на атомных ядрах и на разразившейся второй мировой войне, которая вскоре втянет вас в разработку атомной бомбы. А что же астрономы? Примут ли они ваши идеи? Тоже нет. В сообществе астрономов укоренился консерватизм, исключая, правда, этого «дикаря» Цвикки, проталкивающего свои нейтронные звезды (глава 5). Принятая во всем мире точка зрения, отвергающая максимальную массу Чандрасекара (глава 4), все еще удерживает свои позиции.

Вообразите теперь, что вы Джон Арчибалд Уилер. 1962-й год, после долгого сопротивления вы начинаете убеждаться, что некоторые массивные звезды, умирая, должны создавать черные дыры (главы 6 и 7). Станете ли вы разрабатывать вместе с астрономами план их поиска? Вовсе нет. Если вы Уилер, то ваше внимание теперь приковано к соединению общей теории относительности и квантовой механики, соединение, которое, возможно, имеет место в центре черной дыры (глава 13). Вы проповедуете физикам, что конечная точка схлопывания

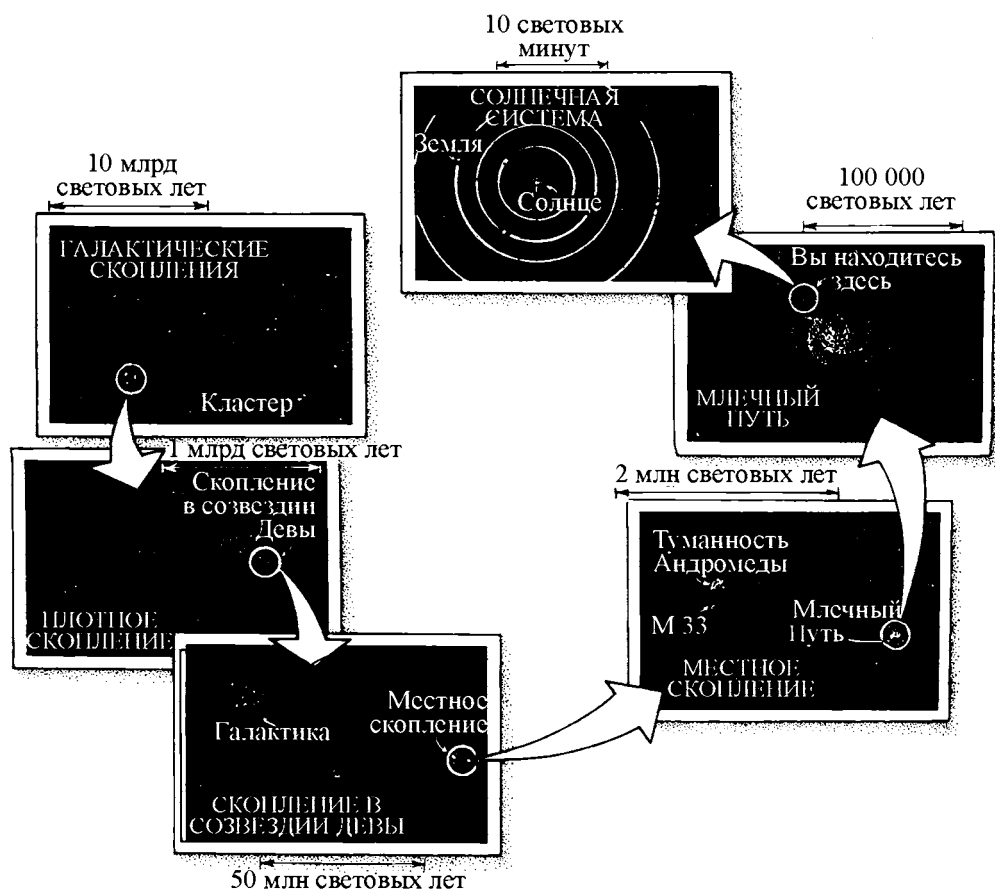
8. Поиск

звезды является величайшим кризисом, из которого может возникнуть новое глубокое понимание. Но вы не станете обращаться с проповедью к астрономам, что они должны искать на небе черные дыры, или хотя бы нейтронные звезды. О поиске черных дыр вы вообще ничего не скажете; что же касается более обещающей идеи поиска нейтронных звезд, то вы в своих заметках выразите консервативную точку зрения астрономического сообщества: «Такой объект будет иметь диаметр порядка 30 километров ... он будет быстро остывать ... Надежда увидеть такой тусклый объект столь же мала, как и надежда увидеть планету, принадлежащую другой звезде» (другими словами, надежды нет).

Представьте себя на месте Якова Борисовича Зельдовича. 1964-й год, член вашей команды разработчиков водородной бомбы Михаил Подурец только что завершил компьютерное моделирование схлопывания звезды, учитывающее эффекты давления, ударных волн, тепловыделения, излучения и потерю массы (глава 6). Модель порождает черную дыру (по крайней мере, ее компьютерную версию). Теперь вы совершенно убеждены, что некоторые звезды, умирая, формируют черные дыры. Будете ли вы теперь сидеть вместе с астрономами и планировать поиск черных дыр? Да, конечно. Если вы Зельдович, то у вас не вызывает симпатии одержимость Уилера конечной точкой схлопывания звезды. Эта точка будет скрыта за горизонтом черной дыры, она будет невидима. Наоборот, сам горизонт и влияние черной дыры на все окружающее должны быть вполне наблюдаемы, надо лишь быть достаточно умным, чтобы понять, каким образом. Понять наблюдаемую Вселенную — вот ваша одержимость, если вы Зельдович: как же вы сможете сопротивляться вызову — найти черные дыры?

Где начнется ваш поиск? Ясно, что вам следует начать в нашей собственной галактике Млечный Путь — дисковом скоплении 10^{12} звезд. Другая ближайшая к нам галактика — Туманность Андромеды, находится от нас на расстоянии в 2 миллиона световых лет, что в 20 раз больше, чем размер Млечного Пути (см. рис. 8.1). Поэтому любая звезда или газовое облако в Туманности Андромеды покажутся в 20 раз меньше и в 400 раз более тусклыми, чем в нашей галактике. И поэтому, если черные дыры трудно обнаружить в Млечном Пути, в Туманности Андромеды их будет найти в 400 раз трудней и невообразимо тяжелей в примерно 1 миллиарде других галактик, более далеких, чем Туманность Андромеды.

Если настолько важен поиск именно в ближайших окрестностях, почему бы не поискать в нашей Солнечной системе, простирающейся от Солнца до планеты Плутон. Не может ли быть где-нибудь здесь, среди планет, черной дыры, незаметной из-за своей черноты? Нет,

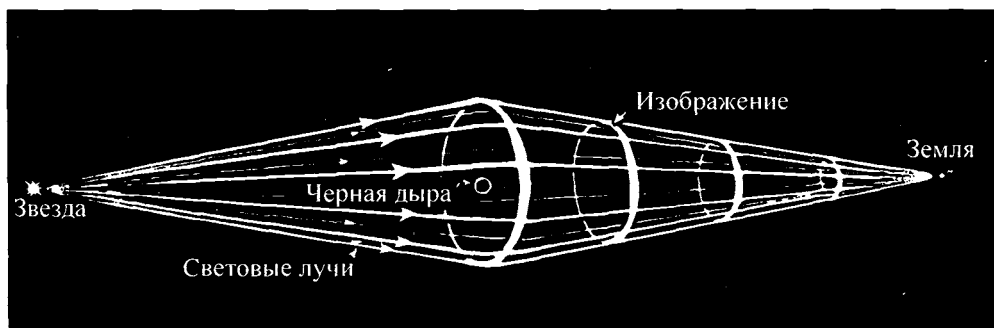


8.1. Картины структуры Вселенной

очевидно, нет. Гравитационное тяготение такой черной дыры было бы намного больше солнечного, она бы совершенно нарушила орбиты планет, что не наблюдается. Поэтому ближайшая черная дыра должна находиться много дальше орбиты Плутона.

Насколько далеко? Можно сделать грубую оценку. Поскольку черные дыры образуются после смерти массивных звезд, ближайшая к нам черная дыра, скорее всего, не может быть намного ближе, чем ближайшая массивная звезда — Сириус, который находится на расстоянии 8 световых лет от Земли и почти наверняка не ближе, чем ближайшая из всех звезд (не считая Солнце) — Альфа Центавра, на расстоянии в 4 световых года.

Как астрономы смогли бы засечь черную дыру на таком огромном расстоянии? Нельзя ли астроному просто осматривать небо в поисках движущегося черного объекта, пятном закрывающего свет от более далеких звезд? Нет. Имея окружность примерно в 50 километров и



8.2. Гравитация черной дыры должна действовать подобно линзе, изменяя кажущийся размер звезды при ее наблюдении с Земли. На этом рисунке черная дыра находится точно на линии, соединяющей Землю и звезду, и поэтому световые лучи от звезды могут достичь Земли, пройдя сверху или снизу черной дыры, либо обойдя ее спереди или сзади. Все световые лучи, достигающие Земли, испускаются звездой в виде расходящегося конуса, проходя мимо черной дыры, они изгибаются по направлению к Земле и приходят к ней в виде сходящегося конуса. Получающееся изображение звезды имеет вид тонкого кольца. Такое кольцо имеет гораздо большую поверхность и поэтому гораздо большую полную яркость, чем та, которую звезда имела бы при отсутствии черной дыры. Получающееся кольцо будет слишком мало, чтобы его можно было бы рассмотреть в таком виде с помощью телескопа, но полная яркость звезды будет увеличена в десять, сто, а может, и большее число раз

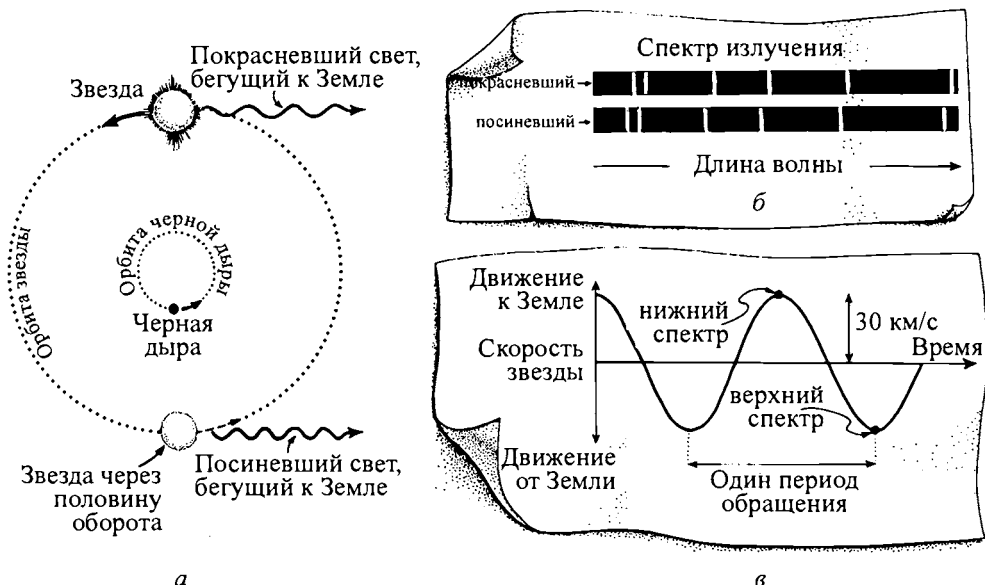
расстояние, по крайней мере, в 4 световых года, темный диск черной дыры был бы виден под углом в 10^{-7} угловой секунды. Что приблизительно соответствует толщине человеческого волоса при наблюдении его с расстояния, равного расстоянию до Луны, и что в 10 миллионов раз меньше, чем разрешение лучших в мире телескопов. Движущийся темный объект был бы невидимой крошкой.

Если нельзя заметить темный диск черной дыры, когда она проходит перед другой звездой, может быть можно увидеть действие гравитации черной дыры на звездный свет, подобное увеличивающему действию линзы (рис. 8.2)? Не будет ли вначале тусклая звезда становиться ярче, когда черная дыра проходит между ней и Землей и затем опять бледнеть? Нет, тоже не годится. Причина, по которой этот способ не годится, зависит от того, обращаются ли звезда и черная дыра вокруг друг друга и поэтому находятся на близком расстоянии или они разделены типичным межзвездным расстоянием. Если они близко друг к другу, то крошечная черная дыра будет подобна увеличительному стеклу, помещенному на подоконнике восьмидесяти девятого этажа Эмпайр Стэйт Билдинг, в которое смотрят с расстояния в несколько километров. Конечно же, крошечное увеличительное стеклышко не в состоянии увеличить вид здания, и точно так же черная дыра не оказывает влияния на вид звезды.

Если же звезда и черная дыра разнесены достаточно далеко, как на рис. 8.2, фокусирующее действие может быть велико, приводя к 10- или 100-кратному или даже большему увеличению звездной светимости. Однако межзвездные расстояния столь огромны, что нужная расстановка Земля—черная дыра—звезда является чрезвычайно редким событием, настолько, что ее поиск был бы безнадежным делом. Более того, даже если бы такое усиление и наблюдалось, световые лучи от звезды до Земли проходили бы от черной дыры с достаточно далекого расстояния, такого, что на месте черной дыры могла оказаться обычная звезда, также действующая как линза. Поэтому астроном на Земле не мог бы знать, действительно ли роль линзы играет черная дыра или обычная, но тусклая звезда.

Когда Зельдович искал метод наблюдения черной дыры, он, должно быть, прошелся по цепочке рассуждений, подобной приведенной выше. Его цепочка, наконец, привела его к довольно-таки обещающему методу (рис. 8.3). Представьте себе, что черная дыра и звезда обращаются по орбите вокруг друг друга (образуют *двойную систему*). Когда астрономы направят свои телескопы на такую двойную систему, они увидят свет только от одной звезды, черная дыра будет невидима. Однако свет звезды будет свидетельствовать о ее наличии: обращаясь по орбите вокруг черной дыры, звезда будет сначала двигаться по направлению к Земле, а затем от нее. Когда она движется к нам, эффект Доплера должен сместить звездный свет к синему краю, а когда от нас — к красному. Астрономы могут измерять подобные смещения с высокой точностью, поскольку свет звезды, пропущенный через спектрограф (дальнейшее развитие обычной призмы), дает резкие спектральные линии, и слабое изменение длины волны (цвета) таких линий легко выявляется. Из измерения сдвига длины волны астрономы могут извлечь скорость движения звезды от Земли и к Земле и, последив в течение некоторого временного промежутка за изменением сдвига, могут узнать, как скорость звезды меняется во времени. Типичная величина таких изменений должна лежать где-то между 10 и 100 километров в секунду, тогда как обычная чувствительность таких измерений составляет 0,1 километра в секунду.

Что мы узнаем из таких высокоточных измерений скорости звезды? Узнаем что-нибудь о массе черной дыры. Чем более массивна черная дыра, тем сильнее она притягивает к себе звезду, и поэтому тем больше должна быть центробежная сила, с помощью которой звезда противодействует тяготению черной дыры. Чтобы добиться большей центробежной силы, звезда должна быстрее обращаться по орбите. И



8.3. Метод поиска черных дыр, предложенный Зельдовичем. (а) Черная дыра и звезда обращаются вокруг друг друга. Если черная дыра тяжелее, чем звезда, то ее орбита меньше, как и показано на рисунке (т. е. черная дыра двигается мало, а звезда много). Если бы черная дыра была легче, чем звезда, то она двигалась бы по большей орбите (т. е. мало двигалась бы звезда, а черная дыра много). Когда звезда движется от Земли, свет от нее краснеет (сдвигается в сторону больших длин волн). (б) Свет, попавший в телескоп на Земле, пропускается через спектрограф и дает спектры. Здесь показаны два спектра: верхний получен для звезды, движущейся от Земли, нижний через полпериода обращения, когда звезда движется к Земле. Длины волн резких линий сдвинуты друг относительно друга. (в) Измеряя последовательность таких спектров астрономы могут определить, как изменяется во времени скорость звезды при ее движении от Земли и к Земле, и из этого изменения скорости они могут определить массу объекта, вокруг которого обращается звезда. Если масса составляет величину большую, чем две солнечных массы, и от объекта не видно никакого света, такой объект может быть черной дырой

поэтому большая орбитальная скорость может свидетельствовать о большой массе черной дыры.

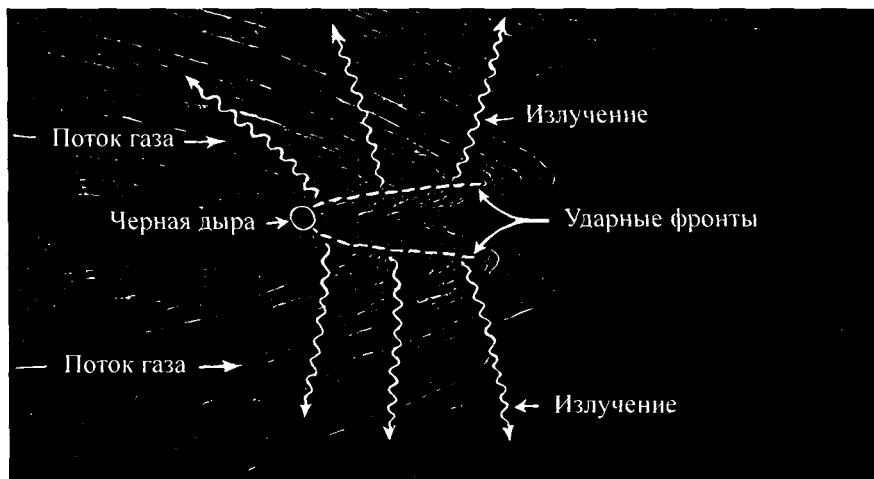
Значит, чтобы найти черную дыру, астрономы должны искать звезды, спектр которых посылает сигнал, периодически смещаясь от красного к синему. Такое смещение является недвусмысленным свидетельством того, что у звезды есть спутник. Астрономам остается изучить спектр звезды, чтобы получить скорость ее обращения вокруг спутника, и зная скорость, получить массу. Если спутник очень массивен, и света от него не видно, очень вероятно, что это черная дыра. Вот в чем состояло предложение Зельдовича.

Хотя этот метод много лучше, чем любой предыдущий, в нем кроются несколько ловушек. Я расскажу лишь о двух. Во-первых, такое

взвешивание темной компоненты двойной звезды не совсем точное. Измеренная скорость зависит не только от массы компаньона, но и от массы самой звезды и от наклона плоскости обращения двойной звезды к линии наблюдения. Хотя масса звезды и наклон орбиты могут быть найдены путем тщательных наблюдений, хорошей точности получить нельзя. В результате легко допустить большие ошибки (скажем, в 2 или 3 раза) в оценке массы темного спутника. Во-вторых, черные дыры не единственный вид темного спутника, который может быть у звезды. Например, темным спутником была бы и нейтронная звезда. Чтобы быть уверенным, что спутник не нейтронная звезда, нужно быть уверенным, что он много тяжелее максимума, допускаемого для нейтронной звезды, примерно в 2 солнечных массы. Две близкие нейтронные звезды, обращающиеся друг относительно друга, также могут иметь массу до 4 солнечных. Такая система может стать темным спутником, или им может стать система из двух вместе вращающихся белых карликов с полной массой в 3 солнечных. Есть и другие виды звезд, хотя и не совершенно темные, которые могут быть достаточно массивными и чрезвычайно тусклыми. Нужно быть очень внимательным при изучении спектров, чтобы быть уверенным, что нет никаких признаков чрезвычайно слабого излучения от таких звезд.

В течение десятилетий астрономы напряженно работали над составлением каталогов двойных звездных систем, и поэтому Зельдовичу не было надобности вести свой поиск прямо на небе, вместо этого он мог просто искать в звездных каталогах. Однако у Зельдовича не было ни времени, ни терпения, чтобы самому копаться в каталогах, не было у него и соответствующего опыта, чтобы обойти все ловушки. Поэтому, как он обычно поступал в подобных ситуациях, он распорядился временем и талантом другого, на этот раз Октя Гусейнова, аспиранта астронома, уже достаточно много знавшего о двойных звездах. Среди многих сотен хорошо описанных в каталогах двойных звезд Гусейнов и Зельдович вместе нашли пять обещающих кандидатов в черные дыры.

В течение последующих нескольких лет астрономы почти не обращали внимания на этих пять кандидатов. Меня немного раздражало это отсутствие интереса с их стороны, и поэтому 1968 г. я завербовал Вирджинию Тримбл, астронома из Калтеха, помочь мне пересмотреть и расширить список Гусейнова—Зельдовича. Тримбл, которая хотя и защитила кандидатскую диссертацию лишь за несколько месяцев до этого, получила основательную подготовку в астрономии. Она знала обо всех ловушках, с которыми мы могли столкнуться — описанных выше и многих других, и могла их аккуратно учесть. Поискав непос-



8.4. Предложенный Зельдовичем и СалпETERом способ обнаружения черной дыры

редствененно в каталогах и собрав все опубликованные данные, касающиеся наиболее обещающих двойных звезд, которые мы только смогли найти, мы предложили новый список из восьми кандидатов в черные дыры. К сожалению, во всех восьми случаях Тримбл могла изобрести почти рациональные объяснения темного спутника, не привлекающие черные дыры. Сегодня, четверть века спустя, ни один из наших кандидатов не выжил. Как кажется сегодня, ни один из них в действительности черной дырой не является.

* * *

Зельдович хорошо знал, когда все это задумывал, что метод поиска с использованием двойных звезд был, в сущности, лотереей, ни коим образом не обеспечивающим успеха. К счастью, его мозговой штурм проблемы поиска черных дыр принес вторую идею — идею, одновременно и независимо от Зельдовича, предложенную в 1964 г. Эдвином СалпETERом, астрофизиком из Корнельского университета в Итаке, штат Нью-Йорк.

Представьте, что черная дыра движется через облако газа или, что эквивалентно, с точки зрения черной дыры, мимо нее движется облако газа (рис.8.4). Потоки газа, ускоренные гравитацией черной дыры до околосветовых скоростей, облетают ее с разных сторон и сталкиваются позади черной дыры. Столкновение в виде ударного фронта (неожиданное резкое возрастание плотности) преобразует огромную энергию падения газа в теплоту, заставляя его сильно излучать. Фактически, черная дыра будет служить машиной для превращения части

массы падающего газа в тепло и затем в излучение. Как показали Зельдович и Салпетер, эта «машина» может быть весьма эффективной — гораздо эффективней, чем, например, горение ядерного топлива.

В группе Зельдовича эта идея муссировалась в течение двух лет, ее рассматривали то с одной, то с другой точки зрения, ища пути сделать ее более обещающей. Однако это была лишь одна из десятков других, разрабатывавшихся ими идей, касающихся черных дыр, нейтронных звезд, сверхновых и природы Вселенной, и поэтому ей уделялось довольно мало внимания. Затем, однажды в 1966 г., в ходе жаркой дискуссии Зельдович и Новиков поняли, что можно совместить идею двойных звезд и идею падающего газа (рис.8.5).

С поверхности многих звезд дуют мощные ветры газа (в основном гелия и водорода). (Солнце тоже порождает такой ветер, хотя и очень слабый.) Представьте, что черная дыра и звезда, порождающая такой ветер, обращаются по орбите друг относительно друга. Черная дыра будет захватывать часть газового потока, нагревать его в ударном фронте и заставит излучать. На однометровой грифельной доске в своей московской квартире Зельдович вместе с Новиковым оценил температуру сталкивающегося газа — несколько миллионов градусов.

При такой температуре газ излучает немного света. Зато он испускает рентгеновские лучи. Таким образом, заключили Зельдович и Новиков, среди черных дыр, обращающихся вместе со спутником, некоторые (хотя и не многие) должны ярко светиться в рентгеновском диапазоне.

Поэтому для того чтобы искать черные дыры, надо использовать комбинацию оптического и рентгеновского телескопа. Кандидатами в черные дыры будут в таком случае такие двойные звезды, в которых один объект представляет собой оптически яркую, но слабую в рентгеновском диапазоне звезду, а другой — темный в оптическом диапазоне, но яркий в рентгене (черная дыра). Поскольку нейтронные звезды также могут захватывать газ у компаньона, нагревать его в ударном фронте и давать рентгеновское излучение, правильное «взвешивание» оптически темного, но яркого в рентгеновских лучах объекта весьма критично. Нужно быть уверенным, что этот объект тяжелее, чем 2 Солнца, и поэтому это не нейтронная звезда.

В этой стратегии поиска, однако, существовала, по крайней мере, одна проблема. В 1966 г. рентгеновские телескопы были еще чрезвычайно примитивны.



8.5. Предложенный Зельдовичем и Новиковым способ поиска черных дыр. Звездный ветер, дующий с поверхности звезды-спутника, захватывается гравитацией черной дыры. Потоки газов, из которых состоит звездный ветер, огибают черную дыру в противоположных направлениях и сталкиваются с образованием резкого ударного фронта, где нагреваются до температуры в миллионы градусов и испускают рентгеновское излучение. Оптические телескопы должны видеть звезду, обращающуюся вокруг тяжелого темного объекта. Рентгеновские телескопы должны увидеть от этого объекта рентгеновское излучение

Поиск

Для астронома недостаток рентгеновских лучей состоит в том, что они не могут проникать через земную атмосферу. (Для людей это достоинство, поскольку рентгеновские лучи вызывают рак и мутации.)

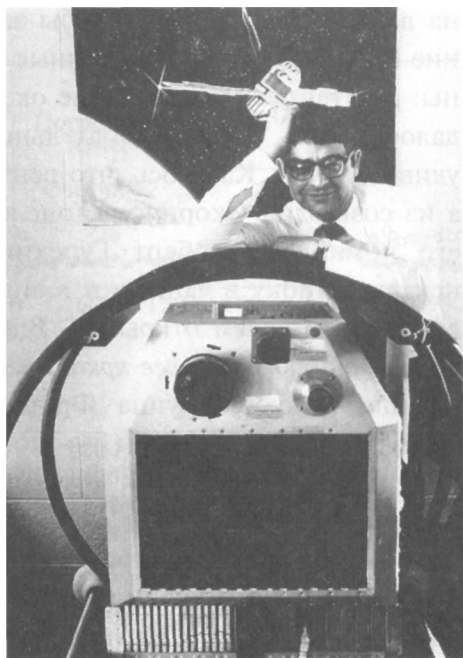
К счастью, физики-экспериментаторы с широким кругозором из Военно-морской исследовательской лаборатории США, под руководством Герберта Фридмана, с 1940 г. работали над тем, чтобы заложить основы космической рентгеновской астрономии. Фридман и его коллеги вскоре после второй мировой войны начали исследовать Солнце, запуская приборы на захваченных немецких ракетах V-2 (Фау-2). Фридман описал их первый запуск 28 июня 1946 г., когда на носу ракеты был установлен спектрограф для изучения ультрафиолетового излучения Солнца. (Поскольку ультрафиолетовые лучи, как и рентгеновские, не могут проникнуть через атмосферу Земли.) На короткое время взлетев над атмосферой и собрав данные, «ракета в соответствии с расчетом вернулась на Землю носом вниз, зарывшись в огромном кратере примерно в 80 футов в диаметре и 30 футов глубиной. Несколько недель, проведенных в раскопках, позволили обнаружить лишь

маленькую кучку неидентифицируемых обломков; все обстояло так, будто при столкновении ракета испарилась».

Так неудачно начав, но благодаря изобретательности, настойчивости и напряженной работе Фридмана и других, ультрафиолетовая и рентгеновская астрономия, шаг за шагом, стала приносить свои плоды. К 1949 г. Фридман и его коллеги для изучения рентгеновского излучения Солнца запускали счетчики Гейгера на ракетах Фау-2. К концу 1950-х, Фридман с коллегами, устанавливая счетчики на ракетах теперь уже американского производства — Аэроби (Аэропчела), исследовали ультрафиолетовое излучение не только от Солнца, но и от звезд. Но рентгеновские лучи — дело другое. Каждую секунду Солнце обрушивает около 1 миллиона рентгеновских квантов на каждый квадратный сантиметр счетчиков Гейгера, и поэтому детектировать его рентгеновское излучение относительно несложно. Однако, как показывают теоретические оценки, самая яркая рентгеновская звезда будет в 1 миллиард раз слабее Солнца. Для того чтобы обнаружить такое слабое излучение, требовались детекторы в 10 миллионов раз чувствительнее тех, которые запускал Фридман в 1958 г. Такое усовершенствование, хотя и весьма существенное, все же не было невозможным.

К 1962 г. детекторы были улучшены в 10 000 раз. Осталось добиться тысячекратного выигрыша в чувствительности, и под впечатлением достижений группы Фридмана в соревнование включились другие исследователи. Одна из команд, руководимая Риккардо Жиаккони, станет грозным конкурентом.

Станным образом, успех Жиаккони мог бы разделить Зельдович. В 1961 г. Советский Союз неожиданно прервал взаимный советско-американский трехлетний мораторий на испытание ядерного оружия, испытав самую мощную бомбу, которую когда-либо взрывал человек, — бомбу, разработанную на Объекте группами Зельдовича и Сахарова (глава 6). Американцы в панике начали подготовку новых собственных испытаний. Они должны были стать первыми американскими ядерными испытаниями эры орбитальных космических полетов. Впервые открывалась возможность измерить из космоса рентгеновское и гамма излучение, а также частицы высокой энергии, образующиеся при ядерном взрыве. Такие измерения были необходимы для того, чтобы отслеживать дальнейшие советские испытания бомб. Однако чтобы провести такие измерения в ходе предстоящей американской серии испытаний, требовалась форсированная программа. Организация и руководство были поручены Жиаккони, двадцативосьмилетнему физику-экспериментатору из частной компании *Американская наука и техника* (Кембридж, штат Массачусетс), недавно начавшему разработ-



Слева: Герберт Фридман, примерно в то время, когда его группой было открыто рентгеновское излучение Солнца. *Справа:* Риккардо Джаккони, примерно тогда, когда его группа открыла первую рентгеновскую звезду. [Слева: предоставлено Военно-морской исследовательской лабораторией США; справа: предоставлено Р. Джаккони]

ку и запуск в космос детекторов рентгеновского излучения, подобных фридмановским. Военно-воздушные силы Соединенных Штатов предоставили Джаккони все требуемые средства, но мало времени. Менее чем за год он расширил свою группу рентгеновской астрономии, первоначально состоявшую из шести человек, введя в нее семьдесят новых участников, разработал, изготовил и испытал множество приборов слежения за взрывами военного назначения, запустив их в космос, достигнув 95-процентного успеха, на двадцати четырех ракетах и шести спутниках. Этот опыт сформировал из костяка его группы верную, знающую и высоко квалифицированную команду, идеально подходящую для того, чтобы обойти всех конкурентов в создании рентгеновской астрономии.

Временная команда Джаккони сделала свои первые шаги в астрономии, начав с поиска рентгеновского излучения Луны, используя детектор, сделанный по образцу фридмановского, и как и Фридман, запустив его на ракете Аэробы. Их ракета, запущенная в Вайт-Сэндз, Нью-Мексико, за одну минуту до полуночи 18 июня 1962 г., быстро набрала высоту 230 километров, а затем упала назад на Землю. В течение 350 секунд она находилась за пределами земной атмосферы,

на высоте достаточной, чтобы зарегистрировать рентгеновское излучение Луны. Данные, переданные на Землю телеметрией, были загадочны: рентгеновское излучение оказалось значительно сильнее, чем ожидалось. При более внимательном изучении данные показались еще удивительней. Казалось, что рентгеновское излучение шло не от Луны, а из созвездия Скорпиона (рис. 8.6б). Два месяца Джаакони и члены его команды (Герберт Гурский, Франк Паолини и Бруно Росси) искали ошибку в данных и в аппаратуре. А когда таковой не нашлось, объявили о своем открытии. Впервые была обнаружена рентгеновская звезда, *в 5000 раз более яркая, чем предсказывали астрофизики*. Десятью месяцами позже группа Фридмана подтвердила открытие, и звезде было дано имя Sco X-1 (1 — потому что самая яркая; X — потому что источник X-лучей¹; Sco — по латинскому названию созвездия Скорпиона — Scorpius).

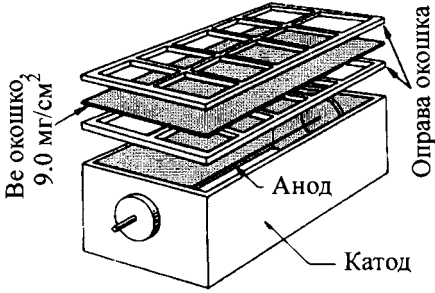
Почему ошиблись теоретики? Как получилось, что они в 5000 раз недооценили силу космического рентгеновского излучения? Они неверно полагали, что на небе в рентгеновском диапазоне будут преобладать объекты, уже известные по оптическим наблюдениям — такие объекты, как Луна, планеты и обычные звезды, слабые источники рентгеновских лучей. Однако Sco X-1 и другие вскоре открытые рентгеновские звезды не были подобны ранее наблюдавшимся объектам. Они являлись нейтронными звездами и черными дырами, захватывающими газ у нормальных звезд-спутников и нагревающими его до высоких температур, как это вскоре предположат Зельдович и Новиков (рис. 8.5 сверху). Для того чтобы показать, что такова в действительности природа наблюдаемых рентгеновских звезд, однако, потребовалось еще десятилетие работы рука об руку таких экспериментаторов,

¹ Рентген назвал свои лучи X-лучами, как они и сейчас называются на многих языках. [Прим. пер.]

-
- 8.6. Совершенствование технологии и разрешения рентгеновских астрономических инструментов в 1962–1978-х гг. (а) Схема конструкции счетчика Гейгера, использовавшегося группой Джаакони в 1962 г. при открытии первой рентгеновской звезды. (б) Данные, полученные с помощью счетчика Гейгера, которые показывают, что звезда находится не там где Луна; обратите внимание на плохое угловое разрешение (большую погрешность измерений), составляющую 90 градусов. (в) Рентгеновский детектор на спутнике Ухуру, 1970 г.: значительно улучшенный рентгеновский счетчик находится внутри корпуса, а перед детектором расположены пластины в виде жалюзи, препятствующие регистрации рентгеновских лучей, летящих не перпендикулярно входному окну детектора. (г) Рентгеновское излучение Cygnus X-1, кандидата в черные дыры, измеренное Ухуру. (д) Схема и (е) фотография зеркал для фокусировки рентгеновских лучей в рентгеновском телескопе Эйнштейн, 1978 г. (ж) и (з) Фотографии двух кандидатов в черные дыры — Cygnus X-1 и SS-433

8. Поиск

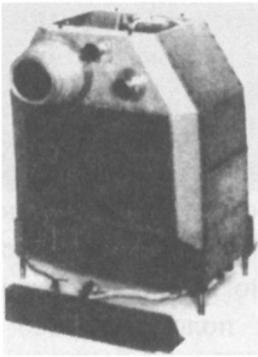
Тонкое окошко
пропорционального счетчика



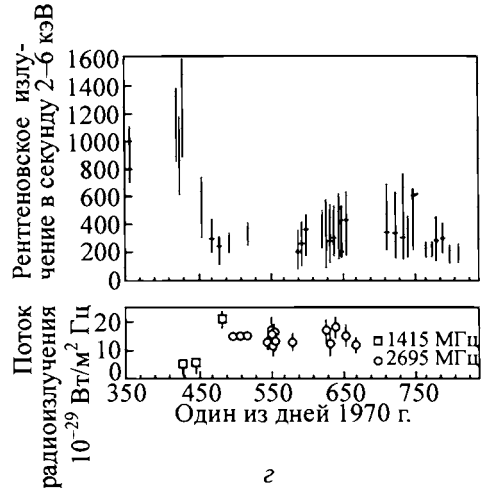
а



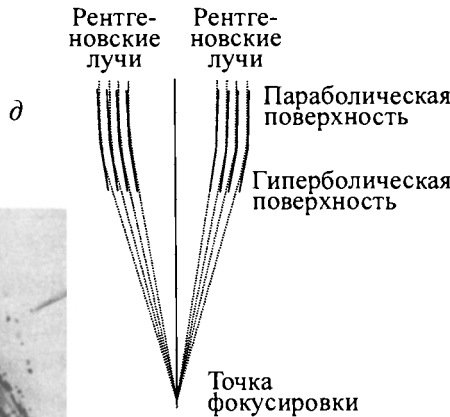
б



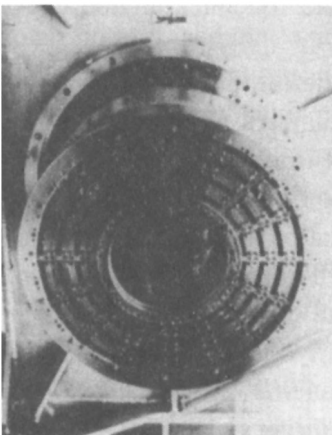
в



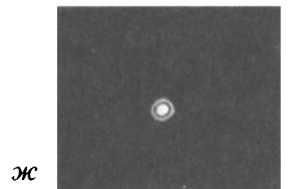
г



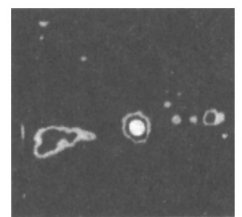
д



е



ж



з

как Фридман и Джаккони, и таких теоретиков, как Зельдович и Новиков.

* * *

Детекторы Джаккони образца 1962 г. были чрезвычайно просты (рис. 8.6а): камера с электродами, заполненная газом, с тонким окошком сверху. Когда рентгеновские лучи попадают в камеру через окошко, они выбивают электроны у некоторых атомов газа; эти электроны притягиваются полем к электродам и, попадая в провод, создают электрический ток, свидетельствующий о приеме рентгеновского излучения. (Такие приборы иногда называют *счетчиками Гейгера*, а иногда *пропорциональными счетчиками*.) Ракета, несущая камеру, вращалась со скоростью два оборота в секунду, а ее нос медленно качался, нацеливаясь то вверх, то вниз. Такие движения позволяли окошку камеры просканировать большую область неба, направляя его то в одном, то в другом направлении. Будучи направленной на созвездие Скорпиона, камера регистрировала много отсчетов рентгеновских лучей. Когда она нацеливалась в другую сторону, отсчетов было мало. Однако поскольку рентгеновское излучение могло попадать в камеру с широкого диапазона направлений, оценки положения Sco X-1 с помощью камеры были весьма неточны. Она могла указать лишь наиболее вероятное положение, с возможной погрешностью около 90° (см. рис. 8.6б).

Для того чтобы определить, действительно ли Sco X-1 и другие вскоре открытые рентгеновские звезды являются черными дырами и нейтронными звездами в двойных системах, требовалось уменьшить пределы ошибок (неопределенность положения на небе) до нескольких угловых минут. Это было суровое требование: тысячекратное улучшение углового разрешения.

Требуемое и даже более значительное улучшение разрешения было шаг за шагом достигнуто в последующие шестнадцать лет несколькими конкурирующими на каждом шагу группами (Фридмана, Джаккони и других). За чередой ракет, запускаемых то одной, то другой группой, с все улучшающимися детекторами, в декабре 1970 г. последовал Ухуру — первый рентгеновский спутник (рис. 8.6в). Созданный группой Джаккони, Ухуру содержал заполненные газом рентгеновские счетчики, в сто раз большие тех, которые запускались на ракете в 1962 г. Перед окошками камер были установлены щели, подобные жалюзи, не дающие камере видеть лучи, исходящие из любых направлений, кроме нескольких градусов вокруг перпендикуляра (рис. 8.6г). За



Whereas Stephen Hawking has such a large investment in General Relativity and Black Holes and desires an insurance policy, and whereas Kip Thorne likes to live dangerously without an insurance policy,

Therefore be it resolved that Stephen Hawking bet 1 year's subscription to "Penthouse" as against Kip Thorne's wages of a 4-year subscription to "Private Eye", that Cygnus X-1 does not contain a black hole of mass above the Chandrasekhar limit.

Stephen Hawking *Kip S. Thorne*

Witnessed this tenth day of December 1974

Franklin Ann Zytkow Werner J.

Слева: Стивен Хокинг. Справа: текст пари между Стивеном Хокингом и Кипом Торном о том, является ли Cygnus X-1 черной дырой. [Фото Хокинга предоставлено Ирен Фертик, Университет Южной Калифорнии]

Ухуру, который обнаружил и позволил занести в каталог 339 рентгеновских звезд, последовали другие такие же рентгеновские спутники специального назначения, построенные американскими, британскими и голландскими учеными. Затем в 1978 г. группа Джаккони запустила могучего преемника Ухуру — первый настоящий рентгеновский телескоп *Эйнштейн*. Поскольку рентгеновские лучи легко проникают через любой объект, расположенный перпендикулярно на их пути, даже через зеркало, в телескопе Эйнштейн использовались наборы последовательных зеркал, вдоль которых рентгеновские лучи скользят, подобно салазкам, скользящим вдоль ледяного склона (рис. 8.6д,е). Такие зеркала фокусировали рентгеновские лучи, чтобы построить изображение участка рентгеновского неба размером в 1 угловую секунду — разрешение такое же, как и у лучших оптических телескопов (рис. 8.6ж,з).

Всего за шестнадцать лет, начиная с ракет Джаккони и до телескопа Эйнштейн (с 1962 по 1978 гг.), было достигнуто 300000-кратное улучшение углового разрешения, и произошел переворот в нашем понимании Вселенной. Рентгеновские лучи обнаружили для нас нейтронные звезды и кандидатов в черные дыры, горячий диффузный газ, окружающий галактики в гигантских скоплениях, и горячий газ в

остатках сверхновых и в коронах (внешней атмосфере) некоторых типов звезд, частицы высокой энергии в ядрах галактики и квазары.

* * *

Из всех кандидатов в черные дыры, открытых с помощью рентгеновских детекторов и рентгеновских телескопов, Cygnus X-1 [созвездие Лебедя] (для краткости Суг X-1) является одним из наиболее достоверных. В 1974 г., вскоре после того как Суг X-1 был признан хорошим кандидатом, Стивен Хокинг и я заключили пари; я ставил на то, что это черная дыра, а он — что нет.

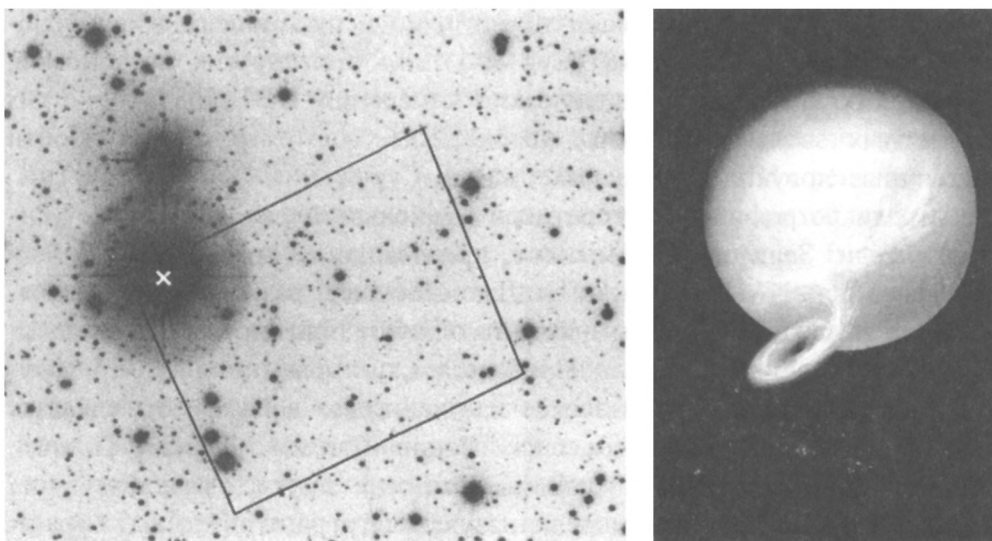
Кароли Уинстайн, которая стала моей женой через десять лет после заключения пари, была недовольна, узнав о том, что стоит на кону (подписка на *Пентхаус* для меня, если выигрываю я, и на журнал *Прайвэт Ай* для Стивена, если выигрывает он). Недовольны были также моя мать и сестры. Им, однако, не стоило беспокоиться, что я действительно выиграю подписку на *Пентхаус* (так я думал в 1980 г.); наше знание о природе Суг X-1 хотя и улучшалось, но очень медленно. В 1990 г. мне казалось, что мы могли быть уверены только на 95%, что это действительно черная дыра, но все же недостаточно, чтобы считать, что Стивен проиграл спор. Очевидно, Стивен оценивал свидетельства иначе. Поздно вечером в июне 1990 г., пока я был в Москве, работая вместе с советскими коллегами, Стивен в окружении семьи, медсестер² и друзей вломился в мой кабинет в Калтехе, нашел наше пари и сделал приписку о своей сдаче, скрепив ее отпечатком пальца.

Свидетельство того, что Суг X-1 содержит черную дыру, было как раз таким, как предвидели Зельдович и Новиков, которые предложили метод поиска. Суг X-1 является двойной звездой, состоящей из яркой в оптическом и слабой в рентгеновском диапазоне звезды, обращающейся вокруг рентгеновски яркой, но оптически темной компоненты. Измерения массы последней показали, что она слишком велика, чтобы быть нейтронной звездой, и потому, вероятнее всего, является черной дырой.

Свидетельства того, что именно такова природа Суг X-1, дались нелегко. Потребовались совместные серьезные усилия, предпринятые в разных странах мира в 1960-х и 1970-х годах сотнями физиков-экспериментаторов, астрофизиков и астрономов.

Среди физиков-экспериментаторов надо отметить: Герберта Фридмана, Стюарта Бойера, Эдварда Байрама и Талботта Чубба, открыв-

² Стивен Хокинг, один из величайших ученых современности, почти полностью парализован и передвигается в кресле-каталке. [Прим. пер.]



8.7. Слева: негатив фотографии, сделанной с помощью 5-метрового оптического телескопа в Маунт Паломар Джеромом Кристианом в 1971 г. Черные линии обозначают границы, в которых согласно данным Ухуру лежит Cygnus X-1. Белый крестик обозначает положение радиовсплесков, полученное с помощью радиотелескопов, которое коррелирует с резкими изменениями рентгеновского излучения от Cyg X-1. Крестик совпадает с оптической звездой HDE 226868 и, таким образом, идентифицирует спутника Cyg X-1 в двойной системе. В 1978 г. рентгеновский телескоп Эйнштейн подтвердил идентификацию (см. рис. 8.6ж). Справа: версия художника системы Cyg X-1 и HDE 226868, основанная на оптических и рентгеновских данных. [С разрешения журнала National Geographic]

ших Cyg X-1 при запуске ракеты в 1964 г.; Харлея Тененбаума, Эдвина Келлога, Герберта Гурски, Стивена Мюррея, Этана Шриера и Риккардо Джаккони, которые в 1971 г. с помощью Ухуру определили положение Cyg X-1 с погрешностью не более двух угловых минут (рис. 8.7), и многих других, открывших и исследовавших мощные хаотические флуктуации потоков и энергии рентгеновских лучей, которые можно было бы ожидать от раскаленного турбулентного газа вокруг черной дыры.

Среди астрономов можно выделить: Роберта Хеллминга, Кема Вэйда, Люка Брайса и Джорджа Мили, открывших в 1971 г. всплески радиоволн в границах области нахождения Cyg X-1, происходящие одновременно с гигантскими изменениями рентгеновского излучения (обнаруженными с помощью Ухуру) и, таким образом, зафиксировавших положение Cyg X-1 с точностью до 1 угловой секунды (рис. 8.6з и 8.7); Луиса Вебстера, Пола Мурдина и Чарльза Болтона, которые с помощью оптических телескопов обнаружили, что видимая звезда HDE226868, расположенная на месте радиовсплесков, обращается

вокруг массивного, оптически темного, но испускающего в рентгеновском диапазоне спутника (Cyg X-1); и сотен других астрономов, проводивших кропотливые оптические измерения HDE226868 и других окрестных звезд, измерения, необходимые для того, чтобы обойти различные ловушки при оценке массы Cyg X-1.

Среди астрофизиков-теоретиков наибольший вклад в общие усилия внесли: Зельдович и Новиков, предложившие метод поиска; Богдан Пачинский, Йорам Авни и Джон Бокалл, разработавшие сложные, но надежные способы избежать ошибки при определении массы; Джеффри Барбидж и Кевин Прендергаст, которые поняли, что горячий, испускающий рентгеновское излучение газ должен образовывать вокруг черной дыры диск; а также Рашид Сюняев, Джеймс Прингл, Мартин Рис, Джерри Острайкер и многие другие, разработавшие детальные теоретические модели излучающего рентген газа и образующегося диска, для последующего сравнения с данными рентгеновских наблюдений.

К 1974 г. эти масштабные усилия привели примерно с 80%-ной достоверностью к следующей картине для Cyg X-1 и его спутника, звезды HDE226868, которая изображена художником в правой части рис. 8.7. В общем, это была картина, которую предсказали Зельдович и Новиков, но с гораздо большим числом деталей. Черная дыра в центре Cyg X-1 имеет массу определенно большую, чем три солнечных, возможно, даже большую, чем 7 Солнц, скорее всего, около 16, ее яркий в оптическом диапазоне, но темный в рентгеновском диапазоне спутник HDE 226868 имеет массу, вероятно, больше, чем 20 солнечных масс, скорее всего, около 33, и примерно в 20 раз больший, чем у Солнца радиус; расстояние от поверхности звезды до черной дыры составляет около 20 солнечных радиусов (14 миллионов километров). Эта двойная звезда находится от Земли на расстоянии примерно в 6000 световых лет. Cyg X-1 является вторым по яркости объектом на рентгеновском небе, а HDE 226868, хотя и достаточно яркая по сравнению со многими другими звездами, видимыми в большие телескопы, все же слишком слаба, чтобы ее можно было видеть простым глазом.

В следующие два десятилетия после 1974 г. наша уверенность в этой картине для Cyg X-1 возросла примерно с 80% до, скажем, 95% (это мои личные оценки). Наша уверенность не равна 100% потому, что, несмотря на предпринятые огромные усилия, какой-либо однозначной своеобразной «подписи» черной дыры в Cyg X-1 обнаружено не было. Никакого сигнала, рентгеновского или светового, который бы выкликивал, недвусмысленно заявляя астрономам: «Я пришел от черной

8. Поиск

дыры». Все еще можно придумать другие, без черной дыры, объяснения для всех наблюдений, но такие объяснения представляются настолько вычурными, что мало кто из астрономов принимает их всерьез.

Напротив, некоторые нейтронные звезды, называемые пульсарами, однозначно выкликают: «Я нейтронная звезда». Их рентгеновское излучение или, в некоторых случаях, радиоволны приходят к нам в виде коротких очень точно повторяющихся импульсов. В некоторых случаях точность воспроизведения периода между этими импульсами настолько высока, что становится сравнимой с ходом лучших атомных часов. Эти импульсы могут быть объяснены только как пучки излучения, испускаемые с поверхности нейтронной звезды и пробегающие мимо Земли при вращении звезды, подобно сигнальному маяку. Почему возможно только такое объяснение? Такие точные временные интервалы могут получиться лишь при вращении массивного объекта, у которого большая инерция и, соответственно, сильное сопротивление случайным силам, приводящим к случайным промежуткам времени между импульсами. Из всех массивных объектов когда-либо рассматривавшихся астрономами лишь нейтронные звезды и черные дыры могут вращаться, как некоторые пульсары, с такой чудовищной скоростью (сотни оборотов в секунду), и лишь нейтронные звезды, а не черные дыры, могут порождать вращающиеся пучки, поскольку черные дыры не могут иметь «волос». (Любой источник подобного пучка, закрепленный на горизонте черной дыры, был бы примером такого типа «волос», которые не могут на нем удержаться³.)

Астрономы безуспешно искали однозначную подпись черной дыры в Суг Х-1 на протяжении двадцати лет. Примером такой подписи (предложенной в 1972 г. Рашидом Сюняевым, членом команды Зельдовича) могли бы быть импульсы излучения, подобные импульсам пульсаров, образующиеся пробегающим пучком, исходящим из плотного газового сгустка, вращающегося вокруг черной дыры. Если бы такой сгусток находился достаточно близко к горизонту черной дыры и сохранялся в течение многих оборотов пока, наконец, не погрузился бы под поверхность горизонта, детали постоянного изменения интервалов между импульсами могли бы дать ясную и недвусмысленную подпись: «Я черная дыра». К сожалению, такую подпись никто никогда не наблюдал. На это, как кажется, есть несколько причин:

1. Раскаленный, испускающий рентгеновское излучение газ движется вокруг черной дыры настолько турбулентно и хаотично, что

³ Глава 7. Волосы электрического поля заряженной черной дыры, очевидно, располагаются вокруг оси вращения, и потому не могут образовать сосредоточенный луч.

плотные сгустки могут сохраняться лишь на протяжении одного или малого числа оборотов, но не дольше.

2. Если даже несколько сгустков и сохраняются достаточно долгое время и выдают подписи черной дыры, турбулентное рентгеновское излучение остального турбулентного газа, очевидно, хоронит эти свидетельства.

3. Если Суг X-1 в действительности черная дыра, то, как показывают математические расчеты, большая часть рентгеновского излучения должна излучаться достаточно далеко от ее горизонта — с окружностей примерно в 10 и более раз больше критической, где просто излучающий рентген объем гораздо больше. На таких больших расстояниях от черной дыры предсказания общей теории относительности и ньютоновской теории тяготения приблизительно одинаковы, и поэтому, если бы и были импульсы от вращающихся сгустков, они бы не несли в себе отчетливой подписи черной дыры.

По причинам, аналогичным изложенным, астрономы, возможно, никогда не смогут обнаружить подписи, удостоверяющей черную дыру в электромагнитных волнах любого типа, исходящих из ее окрестностей. К счастью, существуют блестящие перспективы для подписи совершенно другого типа: подписи, переносимой гравитационными волнами. Мы к этому еще вернемся в главе 10.

* * *

Золотой век теоретических исследований черных дыр (глава 7) совпал с поиском черных дыр, а также с открытием и расшифровкой природы Суг X-1. Поэтому, казалось, можно было ожидать, что молодежь, доминировавшая в Золотом веке (Пенроуз, Хокинг, Новиков, Картер, Израэль, Прайс, Тьюкольски, Пресс и другие), будет играть ключевую роль в поисках черных дыр. За исключением Новикова, это оказалось не так. Приобретенные этими молодыми людьми таланты и знания, так же как и сделанные ими замечательные открытия, касающиеся вращения, пульсации и безволосости черной дыры, имели отношения к поиску и расшифровке Суг X-1. Все могло бы быть по-другому, если бы Суг X-1 имел однозначную подпись, удостоверяющую его как черную дыру. Но ее не было.

Этих молодых, как и других подобных им физиков-теоретиков, иногда называют *релятивистами*, поскольку они проводят так много времени, работая с законами общей теории относительности. Теоретики, действительно внесшие вклад в поиски (Зельдович, Пашинский, Сюняев, Рис и другие), были другой породы, их называли ас-

8. Поиск

трофизиками. Для поиска этим астрофизикам требовалось владеть лишь малой частью общей теории относительности — вполне достаточной, чтобы понять, что кривизна пространства-времени ко всему этому, практически, отношения не имеет, и что ньютоновского описания гравитации вполне достаточно для моделирования объектов подобных Суг X-1. Однако им требовался чудовищный объем *других* знаний, являющихся частью стандартного инструментария астрофизика. Они должны были мастерски владеть пространственными астрономическими учениями о двойных звездах и спектрах звезд-спутников кандидатов в черные дыры, о поглощении звездного света в межзвездной пыли — ключевой инструмент для определения расстояния до Суг X-1. Им также требовалось быть экспертами в вопросах течения раскаленного газа, ударных волнах, формирующихся при столкновении раскаленного газа, турбулентности газа, трения в газе, обусловленного турбулентностью и хаотическим магнитным полем, вынужденного разрыва и соединения линий магнитного поля, образования рентгеновского излучения в раскаленном газе, распространения в газе рентгеновского излучения и во многих других. Мало кто может быть профессионалом во всех этих вопросах и одновременно владеть сложной математикой искривленного пространства-времени. Человеческие ограничения обуславливают разделение в сообществе исследователей. Либо вы специализируетесь в теоретической физике черных дыр, в выведении из общей теории относительности свойств, которыми должна обладать черная дыра, либо вы специализируетесь в астрофизике двойных систем, раскаленном газе, падающем на черную дыру, и излучении, производимом газом. Вы были либо релятивистом, либо астрофизиком.

Некоторые из нас пытались быть и теми и другими, но со скромным успехом. Превосходному астрофизику Зельдовичу иногда удавалось проникнуть в самую суть черных дыр. Я, в общем-то, одаренный релятивист, пытался построить модели потока газа вблизи черной дыры в Суг X-1, основываясь на общей теории относительности. Но Зельдович не понимал глубоко общую теорию относительности, а я не достаточно хорошо знал астрономическую науку. Барьер, который нужно преодолеть, слишком велик. Из всех исследователей, работавших в Золотой век, которых я знал, лишь Новиков и Чандрасекар твердо стояли одной ногой в астрофизике, а другой в релятивизме.

Физики-экспериментаторы подобные Джаакони, которые разрабатывали и запускали рентгеновские детекторы и спутники, наталкивались на тот же самой барьер. Но существовала и разница. Релятивисты не требовались для поиска черных дыр, тогда как без физиков-экспериментаторов было не обойтись. Астрономы и астрофизики со

всем их мастерством и пониманием двойных звезд, течения газов, распространения рентгеновских лучей ничего не могли сделать, пока экспериментаторы не предоставили в их распоряжение подробные рентгеновские данные. Физики-экспериментаторы часто сами пытались расшифровать то, что говорили их собственные данные о потоках газа и о порождающей их возможной черной дыре, но успехи были не велики. Астрономы и астрофизики брали их данные, благодарили и затем интерпретировали их по-своему, более изошренным и надежным образом.

Эта зависимость астрономов и астрофизиков от физиков-экспериментаторов показывает лишь один пример тесных взаимосвязей, которые были необходимы для достижения успеха в поисках черных дыр. Фактически, успех стал продуктом объединенных, взаимозависимых усилий *шести* различных групп людей. Каждая группа играла свою существенную роль. *Релятивисты* с помощью законов общей теории относительности показали, что черные дыры должны существовать. *Астрофизики* предложили метод поиска и показали несколько конкретных шагов, которые было необходимо предпринять. *Астрономы* идентифицировали HDE 226868, спутник Cyg X-1, используя периодические сдвиги спектральных линий, вычислили массу Cyg X-1 и провели другие обширные наблюдения, чтобы подтвердить эту оценку массы. *Физики-экспериментаторы* создали технику и инструменты, сделавшие возможным поиск рентгеновских звезд, и провели такой поиск, идентифицировав Cyg X-1. *Инженеры и менеджеры НАСА* создали ракеты и спутники, выведшие рентгеновские детекторы на орбиту Земли. И, что не менее важно, *американские налогоплательщики* обеспечили финансирование в несколько сотен миллионов долларов на создание ракет, спутников, рентгеновских детекторов и рентгеновских телескопов, а также зарплату для инженеров, менеджеров и ученых, работавших с ними.

Благодаря такой замечательной коллективной работе сегодня, в 1990-х, мы почти на 100% уверены, что черные дыры существуют не только в Cyg X-1, но и во многих других двойных системах нашей галактики.

НАИТИЕ

глава, в которой астрономы оказываются вынужденными признать, что в ядрах галактик могут находиться непредсказанные черные дыры, в миллионы раз массивнее Солнца

Радиогалактики

Если бы в 1962 г. (когда физики-теоретики только начинали свыкаться с концепцией черных дыр) кто-нибудь заявил, что во Вселенной существуют гигантские черные дыры в миллионы и миллиарды раз более тяжелые, чем наше Солнце, астрономы его бы просто осмеяли. Тем не менее, не зная о том, астрономы наблюдали такие черные дыры с помощью радиоволн, начиная с 1939 г. По крайней мере, сегодня мы имеем все основания подозревать, что это так.

Радиоволны являются противоположностью рентгеновским лучам. Рентгеновское излучение — это электромагнитные волны с чрезвычайно короткой длиной волны, обычно в 10000 раз *меньше*, чем длина волны света (рис. П.2 в Прологе). Радиоволны также имеют электромагнитную природу, но имеют много большую длину волны — обычно расстояние от одной пучности до другой составляет несколько метров, что в миллион раз *больше*, чем длина волны видимого света. Рентгеновские лучи и радиоволны противоположны друг другу и с точки зрения корпускулярно-волнового дуализма (Врезка 4.1) — склонности электромагнитных волн вести себя то подобно волне, а то подобно частице-корпускуле (фотону). Рентгеновское излучение обычно ведет себя как поток частиц (фотонов) с высокой энергией, и поэтому его можно обнаружить с помощью счетчиков Гейгера, в которых рентгеновские фотоны ударяются об атомы, выбивая из них электроны (глава 8). Радиоволны почти всегда ведут себя как волны электрической и

магнитной силы, и поэтому их проще всего обнаруживать с помощью проволочных или сплошных металлических антенн, в которых колебания электрической силы волн толкают электроны в разные стороны и, тем самым, вызывают переменный ток в присоединенном к антенне радиоприемнике.

Космические радиоволны (радиоволны, имеющие внеземное происхождение) были по счастливой случайности открыты в 1932 г. Карлом Янски, радиоинженером из *Лаборатории Белл Телефон* в Хомделе, в Нью-Джерси. Молодому выпускнику колледжа Янски поручили идентифицировать шумы, мешавшие телефонным разговорам с Европой. В то время телефонные разговоры через Атлантику осуществлялись с помощью радио, и поэтому для поиска таких шумов Янски сконструировал из большого числа металлических труб специальную радиоантенну (рис. 9.1a). Большая часть шумов вызывалась грозами, но даже когда гроз не было, оставались слабое постоянное шипение и свист. К 1935 г. ему удалось обнаружить источник шипения — в основном, оно приходило из центральных областей нашей галактики, Млечного Пути. Когда центральные области находились над головой, шипение было сильным, когда же скрывались за горизонтом, шипение ослаблялось, хотя и не пропадало совсем.

Это было любопытное открытие. Каждый, кто хоть раз задумывался о радиоизлучении космоса, мог ожидать, что самым сильным источником радиоволн на небе является Солнце, точно так же, как оно является самым ярким источником света. Кроме того, Солнце в миллиард (10^9) раз ближе к нам, чем большинство других звезд Млечного Пути, и потому его радиоволны должны быть примерно в $10^9 \times 10^9 = 10^{18}$ раз мощнее, чем от других звезд. Поскольку в нашей галактике всего 10^{12} звезд, Солнце должно быть ярче, чем все остальные звезды вместе взятые примерно в $10^{18}/10^{12} = 10^6$ (миллион) раз. Почему этот аргумент оказывается ошибочным? Каким образом радиоволны, приходящие из удаленных центральных областей Млечного Пути, могут быть настолько сильнее радиоволн от близкого Солнца?

Как бы занимательна не была эта загадка, ретроспективно еще более занятным является то, что астрономы практически не обратили на нее внимания. Фактически, несмотря на широкую рекламу со стороны телефонной компании Белл, лишь два астронома проявили интерес к открытию Янски. Консерватизм астрономов обрекал его на забвение, как и в случае с Чандрасекаром, когда он заявлял, что не могут существовать белые карлики большие 1,4 солнечной массы (глава 4).

Двумя исключениями из такого всеобщего равнодушия были дипломник Джесси Гринштейн и лектор астрономического факультета

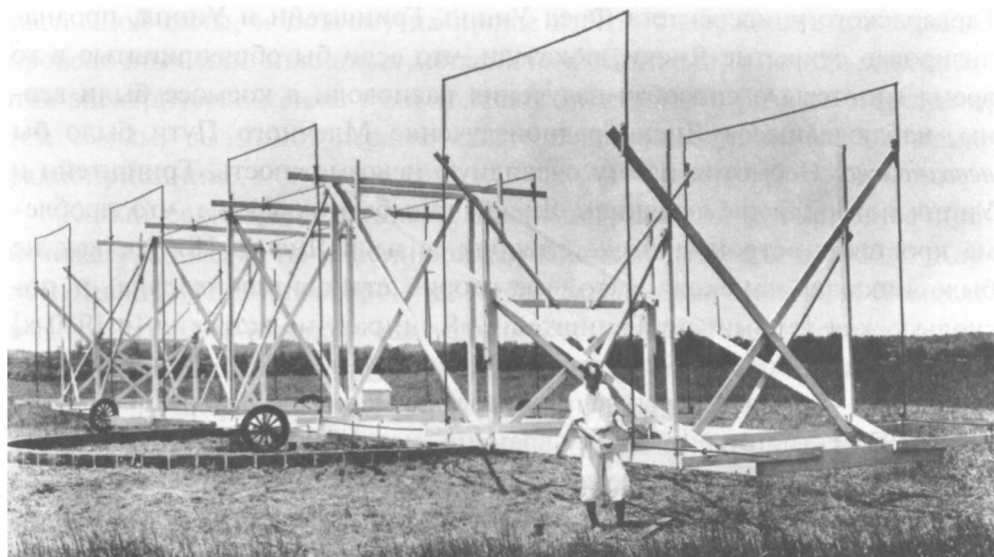
9. Наитие

Гарвардского университета Фред Уиппл. Гринштейн и Уиппл, проанализировав открытие Янски, показали, что если бы общепринятые в то время гипотезы о способах излучения радиоволн в космосе были верны, наблюдавшееся Янски радиоизлучение Млечного Пути было бы *невозможно*. Несмотря на эту очевидную невозможность, Гринштейн и Уиппл поверяли наблюдениям Янски, они были уверены, что проблема кроется в астрономической теории, а не в Янски. Но так как не было никаких намеков на то, где теория становится неверна, и поскольку, как вспоминает Гринштейн: «Я ни разу не встретил [в 1930-х] кого-то, кто проявил бы интерес к данному вопросу, ни одного астронома», — ученые переключили свое внимание на другие проблемы.

К 1935 г. (примерно к тому времени, когда Цвикки придумал свою концепцию нейтронных звезд, глава 5) Янски узнал о галактическом шипении все, что могла дать его примитивная антенна. Желая знать больше, он предложил *Лаборатории Белл Телефон* соорудить первый в мире настоящий радиотелескоп — огромную миску диаметром 100 футов (30 метров), отражающую приходящие радиоволны на радиоантенну и приемник, так же как оптический телескоп-рефлектор отражает своим зеркалом свет на фотопластинку. Бюрократы компании Белл отвергли предложение — оно не несло выгоды. Янски, как хороший работник, подчинился. Он свернул свои исследования неба и в предверии надвигающейся второй мировой войны обратил свои усилия на коротковолновую радиосвязь.

* * *

Профессиональные ученые настолько мало интересовались открытием Янски, что единственным построившим радиотелескоп за все следующее десятилетие оказался Грот Ребер — эксцентричный холостяк и радиолюбитель из Уиттона, штат Иллинойс (позывной W9GFZ). Прочитав о радиошумах Янски в журнале *Популярная астрономия*, Ребер решил в них детально разобраться. У Ребера не было научного образования, но это ничего не значило. Что действительно имело значение, так это его большой технический опыт и хорошая практическая жилка. Проявив невероятную изобретательность, он на собственные скромные сбережения разработал и построил своими руками на заднем дворе родительского дома первый в мире радиотелескоп — тарелку диаметром в 30 футов (около 9 метров) (рис. 9.1а) и с его помощью нарисовал карты неба в радиодиапазоне (рис. 9.1б). На этих картах можно отчетливо видеть не только центральные области нашей галактики Млечный Путь, но и два других радиоисточника, впослед-



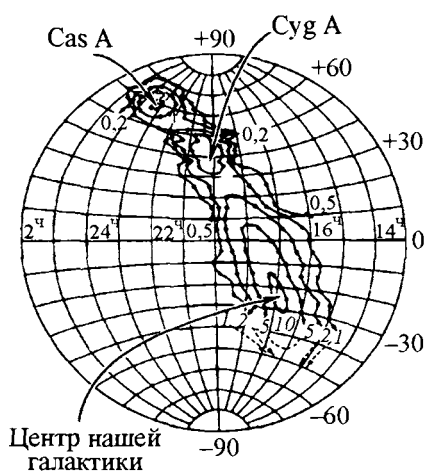
а



б



в



г

ствии получивших имена Cyg A и Cas A — «А» означает «самые яркие радиоисточники», а Cyg и Cas означают, что они расположены в созвездиях Cygnus (Лебедь) и Cassiopeia (Кассиопея). Четыре десятилетия исследовательской работы, в конце концов, с большой вероятностью покажут, что Cyg A и многие другие радиоисточники, открытые в последующие годы, обусловлены гигантскими черными дырами.

История этих исследований и будет центральной линией этой главы. Я решил посвятить этому рассказу целую главу по нескольким причинам.

Во-первых, она иллюстрирует способ, каким обычно делаются астрономические открытия, отличный от показанного в предыдущих главах (глава 8). В главе 8 Зельдович и Новиков предложили конкретный метод поиска черных дыр; физики-экспериментаторы, астрономы и астрофизики воспользовались им и были вознаграждены. В этой главе гигантские черные дыры, наблюдаются Ребером еще в 1939 г., задолго до того, как кто-либо подумал заняться их поиском, но понадобится еще сорок лет, чтобы собрать данные наблюдений, вынудившие астрономов признать, что черные дыры — это действительно то, что они наблюдают.

Во-вторых, глава 8 рассказывала о силе астрофизиков и релятивистов, эта глава показывает пределы их возможностей. Существование типов черных дыр, открытых в главе 8, было предсказано за четверть века до того, как кто бы то ни было начал их искать. Это были черные дыры Оппенгеймера—Снайдера, в несколько раз массивнее Солнца, образующиеся при схлопывании больших звезд. И наоборот, теоретиками никогда не предсказывалось существование гигантских черных дыр. В тысячи или даже миллионы раз более массивных, чем любая из когда-либо наблюдавшихся астрономами на небе звезд, они, видимо, не могут образовываться посредством их схлопывания. Любой теоретик, предсказывая такие гигантские черные дыры, рисковал бы своей научной репутацией. Открытие таких черных дыр было сделано по чистому наитию.

В-третьих, рассказ об открытии в этой главе проиллюстрирует, даже более ясно, чем предыдущая глава, сложные взаимосвязи и

9.1. (а) Карл Янски рядом с антенной, с помощью которой он в 1932 г. открыл радиоизлучение нашей галактики. (б) Грот Ребер, около 1940 г. (в) Первый в мире радиотелескоп, построенный Гротом Ребером на заднем дворе дома своей матери в Уиттоне, штат Иллинойс. (г) Карта радиоизлучения неба, построенная Ребером с помощью своего дворового радиотелескопа. [(а) Фото Лаборатории Белл Телефон, предоставлено архивом видеоматериалов Эмилио Сэгре AIP; (б) и (в) предоставлено Гротом Ребером; (г) адаптация работы Грота Ребера (1944)]

взаимодействия между четырьмя научными группами: релятивистами, астрофизиками, астрономами и физиками экспериментаторами.

В-четвертых, как выяснится позднее в этой главе, вращение вокруг своей оси гигантских черных дыр и энергия этого вращения играют главную роль в объяснении наблюдаемого радиоизлучения. И наоборот, вращение черных дыр не имело никакого значения для наблюдаемых свойств скромных черных дыр главы 8.

* * *

В 1940 г., построив первую карту радиоизлучения неба, Ребер сделал тщательное техническое описание своего телескопа, измерений и самой карты и послал его по почте Субраманьяну Чандрасекару, который в то время являлся редактором журнала *Astrophysical Journal*, издаваемого Йеркесской обсерваторией Чикагского университета, расположенной на берегу озера Женева в штате Висконсин. Чандрасекар распространил замечательную рукопись Ребера среди астрономов Йеркеса. Озадаченные статьей абсолютно неизвестного любителя, некоторые из скептически настроенных астрономов направились в городок Уиттон в Иллинойсе, чтобы взглянуть на инструмент собственными глазами. Назад они вернулись потрясенными. Чандрасекар одобрил публикацию рукописи.

Джесси Гринштейн, ставший астрономом в Йеркесе по окончании Гарварда, в последовавшие несколько лет еще не раз ездил в Уиттон и стал близким другом Ребера. Гринштейн описывает Ребера как «идеал американского изобретателя. Если бы он не интересовался астрономией, он заработал бы миллион долларов».

Исполненный энтузиазма относительно работ Ребера, Гринштейн попробовал, спустя несколько лет взять его в Университет Чикаго. «Университет ни цента не хотел тратить на радиоастрономию», — вспоминает он. Директор Университетской Йеркесской обсерватории Отто Струве согласился взять Ребера на место исследователя, но при условии, что деньги в оплату его работы и в поддержку исследований будут идти из Вашингтона. Однако Ребер «был независимым малым», — говорит Гринштейн. Он отказывался подробно объяснять бюрократам, как будут потрачены деньги на новые телескопы. Дело провалилось.

Тем временем закончилась вторая мировая война, и ученые, занимавшиеся военно-технической деятельностью, начали искать для себя новые поприща. Среди них были и физики-экспериментаторы, разрабатывавшие во время войны радары для слежения за вражескими самолетами. Поскольку работа радара основана на посылке радиоволн

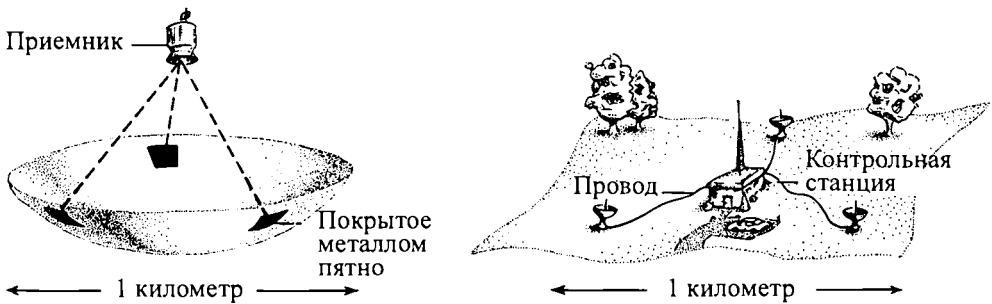
9. Наитие

передатчиком, подобным радиотелескопу, отражении радиоволн от самолета и приеме вернувшихся волн, эти физики-экспериментаторы идеально подходили, чтобы дать жизнь новой области — радиоастрономии, и многим из них не терпелось взяться за дело, ведь это была интересная огромная техническая задача, и интеллектуальный выход выглядел многообещающим. Среди многих, приложивших руку к этой проблеме, три группы быстро заняли доминирующее положение: группа Бернарда Ловелла в Джодрелл Бэнк, Манчестерского университета в Англии; группа Мартина Райля из Кембриджского университета в Англии и объединенная группа Дж.Л.Поуси и Джона Болтона в Австралии. В Америке было мало усилий, заслуживающих упоминания; Грот Ребер продолжал свои радиоастрономические исследования практически в одиночестве.

Оптические астрономы (т. е. астрономы, изучающие небо с помощью света¹, единственный тип астрономов, существовавший в те дни) почти не обратили внимания на лихорадочную деятельность физиков-экспериментаторов. Они будут оставаться равнодушными, пока радиотелескопы не будут в состоянии измерять положение источника на небе с такой точностью, чтобы можно было судить, какой светящийся объект излучает радиоволны. Это потребовало 100-кратного увеличения разрешения по сравнению с достигнутой Ребером, т. е. 100-кратного улучшения точности, с которой измеряются положение, размер и форма радиоисточников. Подобное улучшение было непростой задачей. Оптический телескоп или даже невооруженный человеческий глаз может легко достичь хорошего разрешения, поскольку волны, с которыми он «работает» (световые), имеют очень малую длину волны, меньше чем 10^{-6} метра. И наоборот, ухо человека не может очень точно определить, откуда исходит звук, поскольку звуковые волны имеют большую длину волны, около метра. Точно так же и радиоволны метрового размера дают плохое разрешение до тех пор, пока вы не будете использовать телескоп размерами во много раз больший метра. Телескоп Ребера был не слишком велик, и поэтому имел скромное разрешение. Чтобы достичь 100-кратного улучшения разрешения, нужен был телескоп в 100 раз большего размера, примерно в 1 км, и/или использование более коротковолнового радиоизлучения с длиной волны несколько сантиметров вместо одного метра.

100-кратного улучшения чувствительности физикам-экспериментаторам удалось добиться уже к 1949 г., но не методом грубой силы, а

¹ Под светом в этой книге я всегда подразумеваю электромагнитные волны, которые видит глаз человека, т. е. оптическое излучение.



9.2. Принцип работы радиоинтерферометра. *Слева:* Чтобы получить хорошее угловое разрешение, нужен огромный, размером порядка 1 км, радиотелескоп. Однако при этом оказывается достаточным, чтобы лишь несколько пятен на тарелке были действительно покрыты металлом и отражали радиоволны. *Справа:* Вовсе не обязательно, чтобы радиоволны, отраженные от таких пятен, фокусировались на антенне и приемнике в центре огромной антенны. Каждое пятно может фокусировать свои радиоволны на своей антенне и приемнике, а результирующие радиосигналы ото всех приемников могут быть затем по проводам переданы на центральную приемную станцию, где они объединяются таким же образом, как и в случае приемника гигантского телескопа. В результате получается сеть маленьких радиотелескопов со связанными и объединенными выходами — *радиоинтерферометр*

с помощью хитрости. Ключом к пониманию этой хитрости может быть аналогия с чем-то совершенно простым и хорошо знакомым. (Это лишь аналогия, фактически, здесь есть небольшой обман, но она дает представление об общей идее.) Мы, люди, можем видеть трехмерность окружающего нас мира, используя только два глаза. Левый глаз видит чуть больше за объектом с левой стороны, а правый немного больше справа. Если мы наклоним голову, мы сможем видеть немного больше за объектом сверху и снизу; а если бы мы могли разнести наши глаза на еще большее расстояние (как это делается с помощью двух кинокамер для съемки стереофильмов с утрированной трехмерностью), мы бы смогли видеть еще больше всего за объектом. Однако наше стереоскопическое видение сильно не улучшилось бы, имей мы огромное количество глаз, полностью покрывающих наши лица. С помощью дополнительных глаз мы бы видели все гораздо отчетливее (имели бы лучшую *чувствительность*), но немного бы выиграли в трехмерном разрешении.

Километровый телескоп (левая часть рис.9.2) будет чем-то вроде лица, плотно покрытого глазами. Он будет состоять из километровой тарелки, покрытой листами металла, отражающими и фокусирующими радиоволны на проволочную антенну и приемник. Если мы уберем металлический листы везде кроме нескольких островков свободно рассеянных по поверхности тарелки, это будет то же самое, что убрать

9. Наитие

все лишние глаза с лица, оставив лишь несколько. В обоих случаях произойдет умеренное ухудшение разрешения, но большая потеря чувствительности. Физикам-экспериментаторам больше всего нужно было улучшение разрешения (им хотелось обнаружить, откуда приходят радиоволны и каков размер источников), а не повышение чувствительности (возможности видеть больше слабых радиоисточников). По крайней мере, в то время. Поэтому они могли обойтись и пятнистой тарелкой, не полностью покрытой металлом. Чтобы сделать такую пятнистую тарелку, надо было построить сеть маленьких радиотелескопов, связанных проводами с центральной радиоприемной станцией (правая часть рис. 9.2). Каждый маленький телескоп подобен металлическому пятну в большой тарелке, провода, несущие радиосигналы от каждого телескопа к центральной приемной станции, подобны радиолучам, отраженным от пятен большой тарелки, а сама центральная приемная станция, объединяющая сигналы, приходящие по проводам, подобна центральной антенне и приемнику большой тарелки, соединяющим лучи, отраженные от пятен. Такие сети малых телескопов, ставшие главным направлением усилий экспериментаторов, получили название радиоинтерферометров, поскольку принципом их действия является интерферометрия: интерферируя выходные сигналы малых телескопов между собой, центральная приемная станция строит радиокарту или изображение неба.

* * *

С конца 40-х годов, в 50-х и в начале 60-х годов три группы физиков-экспериментаторов (в Джодрелл Бэнка, Кембридже и Австралии) соперничали в создании все более сложных радиоинтерферометров, все большего размера с постоянно улучшаемым разрешением. Первая критическая отметка — стократное улучшение разрешения, достаточное, чтобы заинтересовать оптических астрономов, была пройдена в 1949 г., когда Джон Болтон, Гордон Стенли и Брюс Сли из австралийской группы определили границы ошибок для положения нескольких радиоисточников, не превышающие 10 угловых минут, т. е. они установили области на небе размером в 10 угловых минут, в которых должны лежать радиоисточники. (Десять угловых минут составляют одну треть видимого с Земли поперечника Солнца и, таким образом, это гораздо хуже, чем разрешение, которое дает человеческий глаз в видимом свете, но это замечательное разрешение при работе с радиоволнами.) Когда эти области были исследованы с помощью оптических телескопов, в некоторых случаях, включая и

область Суг А, там ничего особенно яркого, заслуживающего внимания не оказалось. Требовалось еще лучшее разрешение, чтобы выяснить, какие из огромного числа оптически тусклых объектов в заданных границах могут быть источниками радиоволн. В трех из обозначенных границами ошибок областях, однако, оказались чрезвычайно яркие оптические объекты: остатки древней сверхновой и две удаленные галактики.

Как бы ни было трудно для астрофизиков объяснить открытые Янски испускаемые нашей собственной галактикой радиоволны, гораздо труднее было понять, каким образом такие мощные радиосигналы могут посылать отдаленные галактики. Невозможно было поверить в то, что некоторые из самых ярких радиоисточников на небе могут быть настолько удалены (хотя, в конце концов, окажется, что так оно и есть). Поэтому казалось естественным сделать ставку на то (хотя те, кто так считали, окажутся в проигрыше), что каждый из радиосигналов из очерченных областей приходит к нам не из далекой галактики, а от одной из огромного множества оптически слабых, но расположенных поблизости звезд. Только улучшение разрешения позволило бы ответить наверняка. Физики-экспериментаторы продолжали продвигаться вперед, и отдельные астрономы начали с некоторым интересом краем глаза к ним присматриваться.

Летом 1951 г. команда Райля из Кембриджа достигла очередного десятикратного улучшения разрешения, и аспирант Райля Грэм Смит этим воспользовался, чтобы очертить для Суг А границу погрешности в 1 угловую минуту — область достаточно малая, чтобы в ней размещалось лишь порядка сотни оптических объектов (объектов, наблюдаемых с помощью света). Смит отправил авиапочтой наиболее вероятную оценку и возможную погрешность измерений известному оптическому астроному Вальтеру Бааде из Института Карнеги в Пасадене. (Тому самому Бааде, который семнадцатью годами раньше вместе с Цвикки обнаружил сверхновые и предположил, что они обязаны своей энергией нейтронным дырам, см. главу 5.) Институт Карнеги владел 2.5-метровым (100-дюймовым) оптическим телескопом на горе Вильсон, который оставался крупнейшим в мире, пока Калтех, расположенный ниже по той же улице в Пасадене, не закончил сооружение 5-метрового (200 дюймов) телескопа на горе Паломар. Астрономы Карнеги и Калтеха сообща пользовались этими телескопами. Во время очередной по графику серии наблюдений на 5-метровом паломарском телескопе (рис. 9.3а) Бааде сфотографировал очерченный район, в котором, по словам Смита, лежал Суг А. Этот участок неба, как и многие другие до этого, ни разу не исследовался с помощью большого

9. Наитие

оптического телескопа. Когда Бааде проявил фотографию, он едва мог поверить своим глазам. В очерченном районе находился объект, не похожий ни на один из когда-либо наблюдавшихся. Казалось, что это две сталкивающиеся друг с другом галактики (в центре рис.9.3г). (Теперь, благодаря наблюдениям 1980-х годов, сделанным с помощью инфракрасных телескопов, мы знаем, что столкновение галактик было оптической иллюзией. На самом деле Суг А — это одна галактика, а перед ней расположена полоса пылевого облака. Пыль поглощает свет таким образом, что единственная галактика выглядит как две сталкивающиеся.) Всю систему — центральную галактику вместе с радиоисточником впоследствии стали называть *радиогалактикой*.

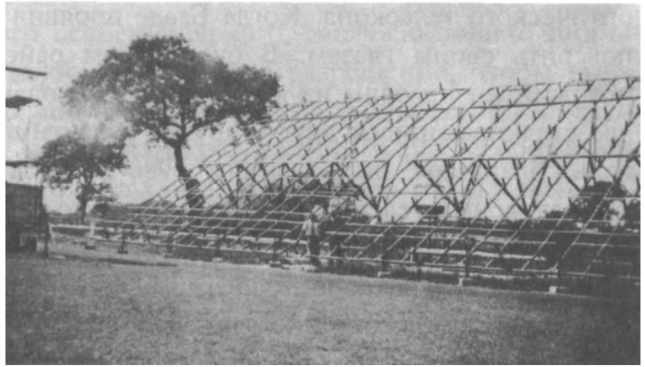
В течение двух лет астрономы были уверены что радиоволны возникли при столкновении галактик. Затем 1953-й год преподнес другой сюрприз. Р.С.Дженнисон и М.К. Дас Гупта из группы Ловелла в Джодрелл Бэнк изучали Суг А с помощью нового интерферометра, состоящего из двух телескопов: одного, закрепленного на земле, а другого, перемещавшегося по окрестностям на грузовике, захватывающего, таким образом, одно за другим большое число «пятен» на «тарелке» воображаемого телескопа с площадью в 4 километра (левая часть рис. 9.2). С помощью этого нового интерферометра (рис. 9.3 б,в) они обнаружили, что радиоволны Суг А приходят не от «сталкивающихся галактик». Эти радиоизлучающие области, или лепестки, как их обычно называют, показаны в виде прямоугольников на рис. 9.3г вместе с оптической фотографией «сталкивающихся галактик», полученной Бааде. На рисунке также дана более детальная карта радиоизлучения лепестков, построенная шестнадцатью годами позже с помощью более совершенных интерферометров; эта карта показана с помощью тонких контурных линий, изображающих яркость радиоизлучения, так же как на топографической карте с помощью контурных линий приводится высота местности. Эти контурные картины подтверждают вывод 1953 г., что радиоволны приходят от гигантских лепестков газа с двух сторон от «сталкивающихся галактик». То, как оба этих огромных лепестка могут управляться единственной гигантской черной дырой, будет основным предметом обсуждения этой главы.

* * *

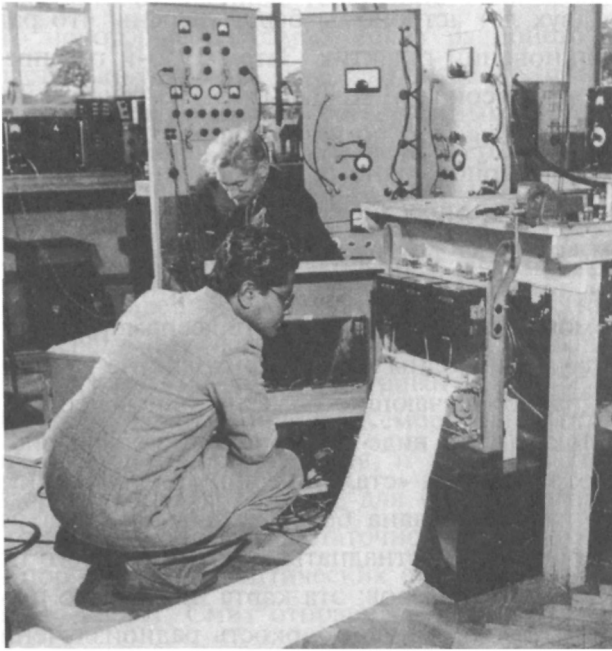
Эти открытия были достаточно поразительны, чтобы возбудить устойчивый сильный интерес оптических астрономов. Джесси Гринштейн был теперь не единственным, кто обращал серьезное внимание на проблему.



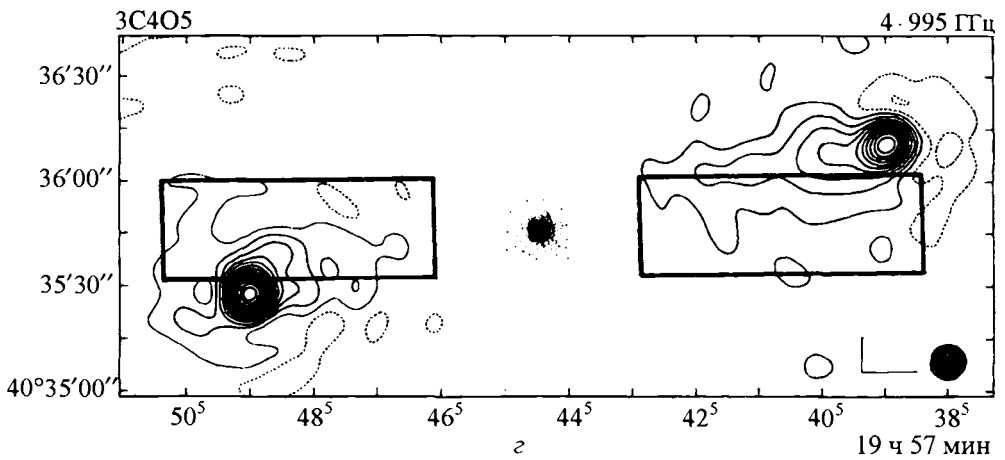
а



б



в



9. Наитие

Для Гринштейна эти открытия стали последней каплей. Не включившись в радиоволновую деятельность сразу после войны, американцы теперь стали сторонними наблюдателями величайшей со времен изобретения оптического телескопа Галилеем революции в астрономии. Эта революция теперь раздавала награды ученым Британии и Австралии, но не Америки.

Гринштейн тогда был профессором в Калтехе. Его пригласили сюда из Йеркеса для разработки программ астрономических исследований на новом 5-метровом оптическом телескопе и поэтому, вполне естественно, он отправился к президенту Калтеха, Ли ДюБриджу, и стал настаивать, чтобы Калтех начал строить свой радиоинтерферометр, который бы вместе с 5-метровым телескопом использовался для исследования удаленных галактик. ДюБридж, который во время войны возглавлял американские радарные работы, отнесся к идее с симпатией, но был осторожен. Чтобы подтолкнуть ДюБриджа к действию, Гринштейн организовал в Вашингтоне 5 и 6 января 1954 г. конференцию, посвященную будущему радиоастрономии.

В Вашингтоне, после того как гости из радиообсерваторий Англии и Австралии рассказали о своих замечательных открытиях, Гринштейн поставил вопрос о том: должны ли Соединенные Штаты оставаться радиоастрономической пустыней? Ответ был очевиден.

При сильной поддержке Национального Научного Фонда (NSF) американские инженеры, физики и астрономы приступили к форсированному сооружению Национальной радиоастрономической Обсерватории в Гринбэнк, в Западной Виргинии, а ДюБридж одобрил

-
- 9.3. Открытие удаленной *радиогалактики* Суг А: (а) 5-метровый оптический телескоп, использованный Бааде и обнаруживший, что Суг А связан с чем-то, что выглядит как две сталкивающиеся галактики. (б) Радиоинтерферометр в Джодрелл Бэнк, который в 1953 г. Дженнисон и Дас Гупта использовали для того, чтобы показать, что радиоволны приходят от двух гигантских лепестков вне сталкивающихся галактик. Две антенны интерферометра (каждая из которых была сетью проводов, натянутых на деревянную основу) показаны рядом. Во время измерения одна устанавливалась на грузовике и перемещалась по окрестностям, а другая оставалась неподвижной на земле. (в) Дженнисон и Дас Гупта изучают радиоданные в контрольной комнате своего радиоинтерферометра. (г) Два гигантских лепестка радиоизлучения (показаны прямоугольниками), обнаруженных в измерениях 1953 г., наложены на оптическую фотографию «сталкивающихся галактик», сделанную Бааде. Также показана контурная карта лепестков с высоким разрешением, сделанная в 1969 г. в Кембридже группой Райля. [(а) Предоставлено Паломарской обсерваторией Калифорнийского технологического института; (б) и (в) предоставлено Наффилдской радиоастрономической лабораторией Манчестерского университета; (г) основано на работах Миттона и Райля (1969), Бааде и Минковского (1964), Дженнисона и Дас Гупты (1954)]

предложение Гринштейна построить для Калтеха новейший радиоинтерферометр в Оуэнс Вэлли, в Калифорнии, к югу от Йосемитского национального парка. Поскольку в Калтехе ни у кого не было опыта в создании подобных инструментов, возглавить проект Гринштейн пригласил Джона Болтона из Австралии.

Квазары

К концу 1950-х годов американцы оказались уже вполне конкурентоспособными. Вступили в действие радиотелескопы в Гринбэнке, а в Калтехе Том Мэтьюз, Пэр Юджин Мэлтби и Алан Моффетт на новом радиоинтерферометре в Оуэнс Вэлли, работая рука об руку с Бааде, Гринштейном и другими астрономами Паломарского 5-метрового телескопа, открыли и изучили множество радиогалактик.

В 1960 г. эти усилия преподнесли еще один сюрприз: Том Мэтьюз из Калтеха узнал от Генри Палмера, что, согласно измерениям в Джодрелл Бэнк, радиоисточник по имени 3C48 (источник № 43 в третьем издании каталога, составленного в Кембридже группой Райля) имеет необычайно малый размер, не более чем 1 угловая секунда в диаметре ($1/10000$ углового размера Солнца). Такой крошечный источник должен был бы быть чем-то совершенно новым. Однако Палмеру и его коллегам в Джодрелл Бэнк не удалось достаточно точно локализовать положение источника. Мэтьюз, проведя ювелирную работу на новом интерферометре Калтеха, добился погрешности всего в 5 угловых секунд и передал свои данные Аллану Сандажу, оптическому астроному из Института Карнеги в Пасадене. Во время очередных наблюдений на 5-метровом телескопе Сандаж сфотографировал область, очерченную границами погрешности Мэтьюза и, к своему удивлению, обнаружил не галактику, а единственную голубую светящуюся точку, которая выглядела как звезда. «В следующую ночь я снял ее спектр, и это был самый странный спектр из тех, что я когда-либо видел», — вспоминал Сандаж. Длины волн спектральных линий были совершенно не похожи на линии звезд или горячего газа, когда-либо получаемые на Земле; они были не похожи ни на что, с чем ранее сталкивались астрономы и физики.

В следующие два года тем же способом было открыто еще с полдюжины похожих объектов, таких же загадочных, как и 3C48. Все оптические астрономы Калтеха и Карнеги взялись за их фотографирование и снятие спектров, пытаясь понять природу этих объектов. Ответ должен был быть очевиден, но нет, мешал ментальный барьер. Эти странные объекты выглядели настолько похожими на звезды, что ас-

9. Наитие

трономы все время пытались интерпретировать их как некий тип звезд нашей галактики, никогда ранее не наблюдававшихся, однако такая интерпретация была почти невероятной, ужасно искаженной.

Ментальный барьер был разрушен Маартеном Шмидтом, тридцатидвухлетним датским астрономом, недавно пришедшим в Калтех. В течение нескольких месяцев он бился над спектром, полученным от 3C273, одного из подобных странных объектов. Наконец, 5 февраля 1963 г., когда он сидел в своем кабинете в Калтехе, зарисовывая спектры для включения их в подготавливаемую статью, вдруг пришел ответ. Четыре самые яркие линии в спектре являлись четырьмя обычными «линиями Балмера», излучаемыми газообразным водородом — наиболее известными из всех спектральных линий, первыми которые студенты изучают в курсе квантовой механики. Однако эти четыре линии не имели обычных длин волн. Каждая была сдвинута в красную область на 16%. Похоже 3C273 является объектом, содержащим большое количество газообразного водорода, удаляющимся от Земли со скоростью, составляющей 16% скорости света — гораздо быстрее, чем любая из когда-либо наблюдававшихся астрономами звезд.

Шмидт вылетел в коридор, где столкнулся с Гринштейном и возбужденно изложил ему свое открытие. Гринштейн развернулся и направился в собственный кабинет, где выудил свой спектр 3C48 и некоторое время рассматривал его. Балмеровские линии не обнаруживались ни при каком красном смещении, но зато здесь были и глядели на него линии излучения магния, кислорода и неона. 3C38 представлялся, по крайней мере частично, огромной массой, состоящей из магния, кислорода и неона, удаляющейся от Земли со скоростью, равной 37% световой.

Чем вызваны такие высокие скорости? Если бы, как тогда думали, эти странные объекты (получившие позднее название *квазары*) являлись неким типом звезд, принадлежащих нашей галактике Млечный Путь, они должны были бы быть откуда-то извергнуты с невероятной силой, возможно, из галактического ядра. В это было невозможно поверить, и более пристальное изучение спектров квазаров показало, что это вряд так. Единственная разумная альтернатива, как (верно) предположили Гринштейн и Шмидт, заключается в том, что эти квазары находятся в нашей Вселенной очень далеко и удаляются от Земли с высокой скоростью в результате ее расширения.

Вспомним, что расширение Вселенной подобно растяжению поверхности надуваемого воздушного шарика. Если на его поверхности находится несколько муравьев, каждый из них увидит, что все остальные муравьи в результате расширения воздушного шарика от него



Слева: Джесси Л. Гринштейн рядом с рисунком 5-метрового паломарского телескопа (около 1955 г.). *Справа:* Маартен Шмидт с инструментом для измерения спектра, сделанном для 5-метрового телескопа (около 1963 г.). [Предоставлено архивом Калифорнийского технологического института]

удаляются. Чем дальше находится другой муравей, тем быстрее он будет двигаться, на взгляд первого муравья. Точно так же, чем дальше находится объект от Земли, тем быстрее для нас он будет двигаться в результате расширения Вселенной. Другими словами, скорость объекта пропорциональна расстоянию до него. Поэтому из скоростей 3C273 и 3C48 Шмидт и Гринштейн смогли вычислить расстояние до них: соответственно, 2 миллиарда и 4,5 миллиарда световых лет.

Это были чудовищные расстояния, практически самые большие расстояния из зарегистрированных когда-либо. Это означало, что для того чтобы 3C273 и 3C48 имели достаточную яркость, чтобы выглядеть так, как они регистрировались с помощью 5-метрового телескопа, они должны были излучать невообразимую мощность: в 100 раз большую, чем самые яркие из наблюдавшихся галактик.

Фактически 3C273 был настолько ярким объектом, что с 1895 г. его уже больше 2000 раз регистрировали на фотографиях вместе с другими объектами даже с помощью телескопов среднего размера. Узнав об открытии Шмидта, Харлан Смит из Университета Техаса организовал более пристальное изучение этого архива фотографий, в основном хранящихся в Гарварде, и обнаружил, что у 3C273 за последние 70 лет постоянно происходили флуктуации яркости. Его светимость существенно менялась с периодом, не большим чем один месяц. Это оз-

9. Наитие

начает, что большая часть света от 3C273 должна излучаться из области размером меньшим расстояния, преодолеваемого светом за месяц, т. е. меньшим, чем 1 «световой месяц». (Если область будет больше, то не может быть такой силы, перемещающейся, конечно, со скоростью меньшей или равной скорости света, которая могла бы заставить весь излучающий газ с месячной аккуратностью одновременно вспыхивать или тускнеть.)

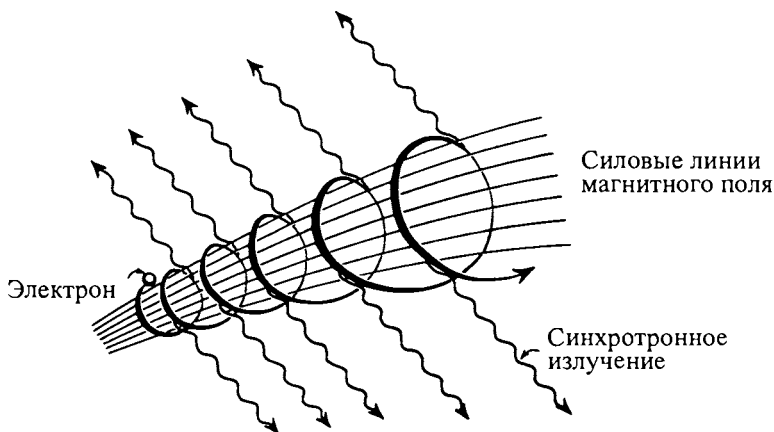
Во все это было чрезвычайно трудно поверить. Этот странный квазар, этот 3C273, светил в 100 раз ярче, чем самые яркие во Вселенной галактики. Но если галактики излучают свет из областей размером в 100000 световых лет, 3C273 давал свет из области, по крайней мере, в миллион раз меньшей в диаметре и в 10^{18} раз меньшей по объему: всего в 1 световой месяц или даже меньше. Свет должен исходить от массивного компактного газового объекта, нагреваемого какой-то невероятно мощной машиной. Эта машина, в конце концов, с высокой, но не абсолютной достоверностью окажется гигантской черной дырой, но прочные свидетельства будут получены лишь в последующие пятнадцать лет.

* * *

Если объяснить происхождение радиоволн в нашем галактическом Млечном Пути было тяжело, а объяснить радиоизлучение от удаленных радиогалактик еще сложнее, то объяснение радиоизлучения от этих сверхдалеких квазаров могло оказаться суперсложным.

Сложность, как оказалось, опять состояла в существовании ментального барьера. Джесси Гринштейн, Фред Уиппл и все остальные астрономы 1930-х и 1940-х полагали, что космические радиоволны, так же как и звездный свет, испускаются разогретыми теплом, колеблющимися молекулами, атомами и электронами. Астрономы 30-х и 40-х годов не могли представить другого способа, как природа могла бы образовывать наблюдаемые радиоволны, даже тогда, когда все их расчеты недвусмысленно показывали, что этот работать не может.

Однако с начала XX века физикам был известен другой способ. Когда электрон, движущийся с высокой скоростью, встречает магнитное поле, магнитные силы этого поля закручивают траекторию электрона в спираль. Электрон оказывается вынужденным кружиться вокруг линий магнитного поля (рис. 9.4) и, двигаясь по спирали, испускать электромагнитное излучение. В 1940-х годах физики начали называть это излучение *синхротронным излучением*, поскольку оно образуется при спиральном движении электронов в ускорителях частиц,



9.4. Космические радиоволны порождаются электронами, вращающимися по спирали с околосветовыми скоростями вокруг линий магнитного поля. Магнитное поле заставляет электрон двигаться не по прямой, а по спирали, при этом спиральное движение электрона порождает радиоволны

называемых «синхротронами», которые тогда строились. Замечательно, что в 1940-х годах, несмотря на заметный интерес физиков к синхротронному излучению, астрономы не обращали на него никакого внимания. Ментальный барьер сохранялся.

В 1950 г. Карл Отто Кипенхоер в Чикаго и Виталий Лазаревич Гинзбург в Москве (тот самый Гинзбург, который придумал LiD топливо для советской водородной бомбы и обнаружил первые свидетельства, что черные дыры не могут иметь «волос»²) разрушили этот ментальный барьер. Развивая плодотворные идеи Ганса Альфвена и Николаи Херлофсона, Кипенхоер и Гинзбург (верно) предположили, что радиоволны Янски в нашей галактике являются синхротронным излучением электронов, движущихся по спирали вокруг линий магнитных силовых линий, заполняющих межзвездное пространство (рис. 9.4).

Спустя несколько лет, когда будут открыты гигантские радиоизлучающие лепестки радиогалактик и квазары, было также вполне естественно (и правильно) предположить, что их радиоизлучение также вызывается электронами, вращающимися вокруг силовых линий магнитного поля. Исходя из физических законов, описывающих такое спиральное движение, и свойств наблюдаемых радиоволн, Джеффри

² См. рис. 7.3. Все же Гинзбург больше всего известен не этими открытиями, а благодаря разработанной им вместе с Львом Ландау «теории сверхпроводимости Гинзбурга–Ландау» (т. е. объяснения того, как некоторые металлы при очень сильном охлаждении полностью теряют сопротивление электрическому току). Гинзбург является в мире представителем малого числа настоящих «ренессансных физиков», человеком, который внес существенный вклад почти во все области теоретической физики

9. Наитие

Бэрбидж из Университета Калифорнии, в Сан Диего, рассчитал, какую энергию должны иметь магнитные поля лепестков и быстро вращающиеся электроны. Вот его поразительный ответ: в экстремальных случаях радиоизлучающие лепестки должны заключать в себе такое количество магнитной энергии и кинетической энергии быстрых электронов, которое можно получить при превращении в чистую энергию всей массы 10 миллионов (10^7) Солнц со 100 %-ной эффективностью.

* * *

Такие энергетические характеристики квазаров и радиогалактик были настолько поразительными, что в поисках объяснения астрофизикам в 1963 г. пришлось перебрать все мыслимые источники энергии.

Химическая энергия (горение бензина, нефти, угля или динамита), которая является основой человеческой цивилизации, явно не подходила. Химическая эффективность преобразования вещества в массу составляет лишь одну стомиллионную долю (одна часть на 10^8). Для того чтобы обеспечить энергией радиоизлучающий газ квазара, потребовалось бы $10^8 \times 10^7 = 10^{15}$ солнечных масс химического горючего — в 10000 раз больше, чем количество вещества, содержащегося в нашей галактике Млечный Путь. Это совершенно бессмысленно.

Ядерная энергия, работающая в водородной бомбе и дающая солнечный свет и тепло, также плохо подходила для питания квазара. Эффективность преобразования массы в энергию для ядерного горючего составляет примерно 1 процент (1 часть на 10^2), поэтому квазару, для того чтобы подпитывать радиоизлучение лепестков, понадобилось бы $10^2 \times 10^7 = 10^9$ (1 миллиард) солнечных масс. И этот миллиард соответствует тому случаю, когда ядерное топливо полностью выгорает и освобождающаяся энергия полностью преобразуется в энергию магнитного поля и быстрых электронов. Полное сгорание и полное преобразование энергии вызывало сомнение. Даже в тщательно сконструированных машинах человеку редко удается добиться эффективности преобразования энергии ядерного топлива в полезную мощность лучшей нескольких процентов, а в природе могло быть еще хуже. Поэтому более разумной является оценка в 10 или 100 миллиардов звезд. Это меньше, чем масса гигантской галактики, но не намного, и то, как природа могла бы добиться преобразования ядерной энергии в магнитную и кинетическую, было совершенно неясно. Поэтому ядерная энергия была возможной, но очень сомнительной кандидатурой.

Аннигиляция вещества и антивещества могла бы обеспечить 100-процентное преобразование массы в энергию, и поэтому 10 милли-

онов солнечных масс, аннигилирующих с 10 миллионами солнечных масс из антивещества, могли бы удовлетворить энергетические потребности квазаров. Однако нет никаких доказательств существования во Вселенной антивещества, кроме малых его крох, искусственно синтезированных человеком в ускорителях и той малости, которая возникает в природе при столкновении частиц обычного вещества. Более того, даже если бы такие большие массы вещества и антивещества аннигилировали, энергия их аннигиляции превратилась бы в гамма-излучение, а не в энергию магнитного поля или кинетическую. Поэтому аннигиляция вещества с антивеществом оказывается неудовлетворительным источником энергии для квазара.

Оставалась еще одна возможность: *гравитация*. Схлопывание обычной звезды с образованием нейтронной звезды или черной дыры, казалось, вполне могло преобразовать 10 процентов массы в магнитную и кинетическую энергии — хотя, как это точно происходит, ясно не было. Если это возможно, то схлопывание $10 \times 10^7 = 10^8$ (100 миллионов) обычных звезд могло бы обеспечить квазар энергией, так же, впрочем, как и схлопывание одной гипотетической в 100 миллионов раз более тяжелой, чем Солнце, *сверхмассивной звезды*. [Правильная идея, состоящая в том, что гигантская черная дыра, получившаяся при схлопывании такой сверхмассивной звезды, может сама служить источником энергии для квазара, никому не приходила в голову вплоть до 1963 г. Черные дыры тогда еще плохо понимали. Уилер еще не пустил в оборот выражение «черная дыра» (глава 6). Салпетер и Зельдович еще не поняли того, что газ, падающий на черную дыру, может нагреваться и с высокой эффективностью излучать энергию (глава 8). Пенроуз еще не открыл, что черная дыра может до 29 процентов своей массы копить в энергии вращения и затем ее высвобождать (глава 7). Золотой век исследований черных дыр еще не начался.]

Мысль о том, что квазары могут получать энергию от схлопывающейся звезды, образующей черную дыру, была радикальным отходом от традиционных представлений. Впервые в истории астрономы и астрофизики почувствовали необходимость обратиться для объяснения наблюдаемых объектов к общей теории относительности. Раньше релятивисты жили в одном мире, а астрономы и астрофизики в другом, почти не связанные друг с другом. Эта разъединенность подходила к концу.

Для стимулирования диалога между релятивистами, астрономами и астрофизиками и катализации прогресса в исследовании квазаров с 16 по 18 декабря 1963 г. в Далласе, в Техасе, была организована конференция, в которой приняли участие триста ученых. Томас Голд

9. Наитие

из Корнельского университета так полусуто обрисовал в тосте на банкете обстановку на этом Первом техасском симпозиуме по релятивистской астрофизике: «[Загадка квазаров] позволяет предположить, что вычурные работы релятивистов являются не только великолепными культовыми украшениями, но могут быть действительно полезны для науки! Все довольны: релятивисты, почувствовавшие, что их оценили, стали экспертами в области, о существовании которой они вряд ли знали, и астрофизики, поскольку теперь они могут расширить свое поле деятельности, свою империю, вторгаясь в другую епархию — общую теорию относительности. Все это очень приятно, и потому давайте думать, что все это верно. Каким позором для нас будет, если нам придется снова пойти на увольнение всех релятивистов».

Выступления следовали почти непрерывно с 8:30 утра до 6 вечера с часовым перерывом на обед, плюс почти все время с 6 вечера до двух часов ночи проходило в неформальных дискуссиях и спорах. Среди других выступлений проскочило и короткое 10-минутное сообщение молодого новозеландского математика Роя Керра, неизвестного другим участникам. Керр только что обнаружил свое решение уравнений поля Эйнштейна — решение, которое, как окажется десятилетием позже, позволит описать все свойства вращающихся черных дыр, включая запасание и высвобождение вращательной энергии (главы 7 и 11); решение, которое, как мы увидим позднее, в конечном итоге заложит фундамент для объяснения происхождения энергии квазаров. Однако в 1963 г. решение Керра большинству ученых казалось лишь математическим курьезом; никто даже не знал, что оно описывает черную дыру, хотя Керр и рассуждал о том, что оно может дать представление о схлопывании вращающихся звезд.

Астрономы и астрофизики приехали в Даллас обсуждать квазары; их не интересовали эзотерические математические изыски Керра. Поэтому, как только Керр начал свое выступление, многие выскользнули из конференц-зала, чтобы в фойе поспорить друг с другом о своих любимых теориях квазаров. Многие другие решили вздремнуть, тщетно пытаясь восполнить дефицит сна из-за ночных научных бдений. Лишь горстка релятивистов пристально вслушивалась в каждое слово.

Это было больше, чем мог вынести Ахилл Папапетроу, один из ведущих мировых релятивистов. Как только Керр закончил, Папапетроу потребовал слова, встал и с глубоким чувством объяснил собравшимся важность работы Керра. В течение 30 лет Папапетроу пытался найти решение уравнений Эйнштейна, но, как и многим другим релятивистам, ему это сделать не удалось. Астрономы и астрофизики

вежливо кивали, но затем, как только следующий оратор начал развивать свои теории о квазарах, переключили свое внимание на него и все пошло своим чередом.

* * *

1960-й год стал поворотной точкой в изучении радиоисточников. Ранее в исследованиях полностью доминировали астрономы-наблюдатели, т. е. оптические астрономы, и наблюдающие за радиоизлучением физики-экспериментаторы, которые теперь влились в семью астрономов и назывались *радиоастрономами*. Астрофизики-теоретики, наоборот, вносили в исследования небольшой вклад, поскольку радионаблюдения были еще недостаточно точны, чтобы существенно влиять на их теории. Их единственный вклад состоял в том, что они поняли, что радиоволны производятся высокоскоростными электронами, вращающимися вокруг магнитных силовых линий гигантских радиоизлучающих лепестков, и в том, что они смогли рассчитать, сколько магнитной и кинетической энергии на это требуется.

В 1960-х, когда разрешение радиотелескопов все продолжало улучшаться, а оптические наблюдения начали обнаруживать новые особенности радиоисточников (например, крошечные размеры излучающих свет ядер квазаров), нарастающий объем информации стал пищей для ума астрофизиков. Основываясь на этой богатой информации, астрофизики предложили десятки детальных моделей для объяснения радиогалактик и квазаров, и одна за другой эти модели опровергались при накоплении данных наблюдений. Наконец-то все заработало, как положено в науке!

Одним из ключевых моментов в новых данных было открытие радиоастрономами того факта, что радиогалактики излучают радиоволны не только своими гигантскими двойными лепестками, расположенными с обеих сторон от центральной галактики, но и ядром в центре самой галактики. В 1971 г. это подсказало Мартину Рису, недавнему ученику Денниса Сиамы из Кембриджа, радикально новую идею об источнике энергии двойных лепестков. Возможно, за излучение *всех* радиоволн в ядрах галактик отвечал единственный механизм. Возможно, этот механизм непосредственно передавал энергию электронам и магнитным полям, излучаемым из центра; возможно, он также излучал эту энергию по направлению к гигантским лепесткам, чтобы на месте насыщать энергией поля и электроны; и, возможно, механизм в ядрах радиогалактик (каким бы он ни был) был того же типа, что и тот, который дает энергию квазарам.

9. Наитие

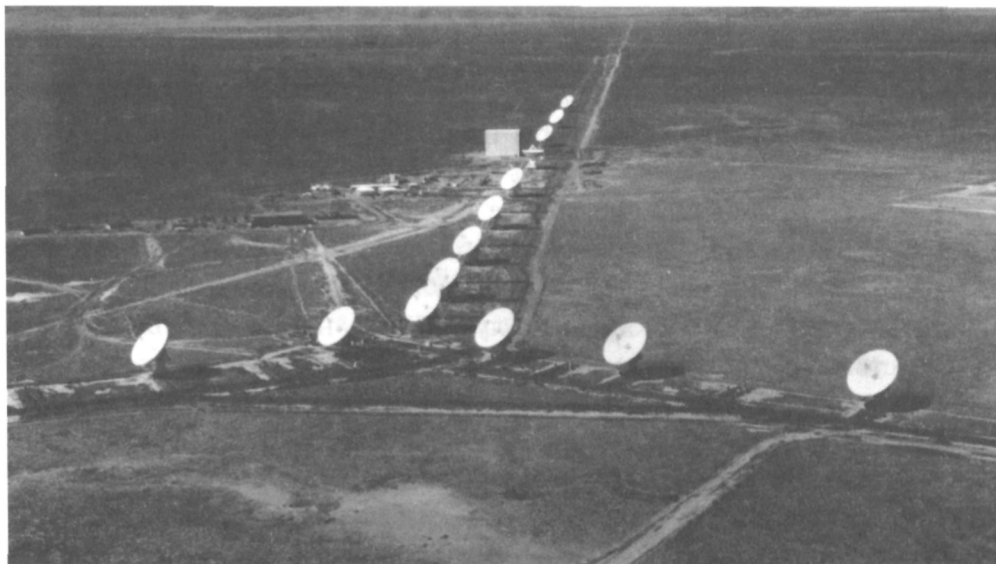
Вначале Рис подозревал, что лучи, переносящие энергию от ядра к лепесткам, состоят из ультранизкочастотных электромагнитных волн. Однако после теоретических расчетов стало ясно, что подобные лучи при любых условиях не смогли бы пробиться через межгалактический газ.

Как это часто бывает, не вполне верное предположение Риса стимулировало верное. Малкольм Лонгэйр, Мартин Райль и Питер Шеуер в Кембридже взяли эту идею за основу и модифицировали ее очень простым способом: они оставили лучи Риса, но предположили, что лучи состоят из горячего намагниченного газа, а не из электромагнитных волн. Рис быстро согласился, что *газовые струи (джеты)* будут работать, и вместе со своим студентом Роджером Блэндфордом рассчитал свойства, которые должны иметь эти струи.

Несколькими годами позже это предсказание газовых струй, вырывающихся из центрального объекта как источника энергии радиоизлучающих лепестков, было эффектно подтверждено при помощи новых гигантских интерферометров в Англии, Голландии и Америке, особенно с помощью американского очень большого антенного многоэлементного телескопа VLA (Very Large Array — очень большой массив) на равнинах Св. Августина в Нью-Мексико (рис. 9.5). Интерферометры увидели джеты, и они имели предсказанные свойства. Они простирались от ядра галактики до обоих лепестков, и можно даже было видеть, как они врезаются в газ и тормозятся до полной остановки.

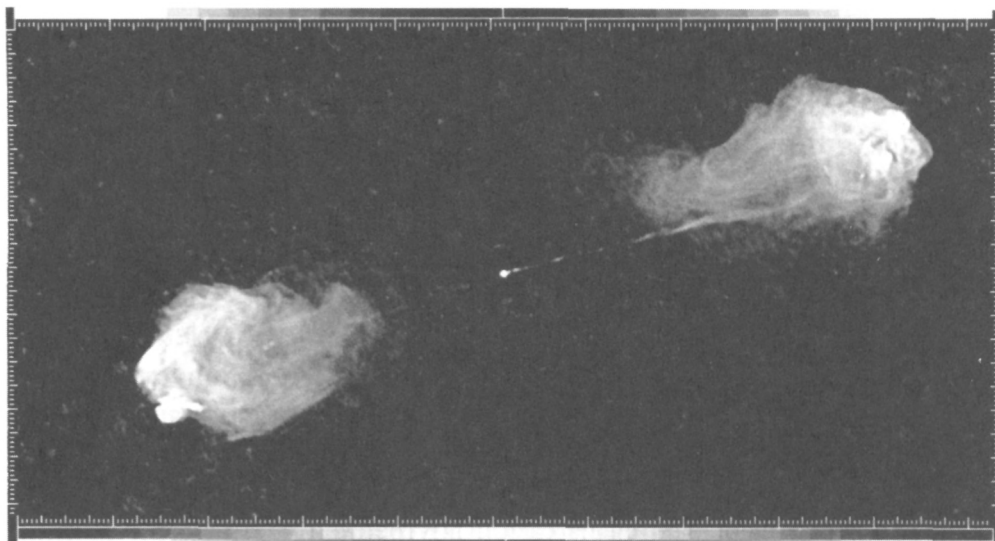
VLA использует ту же технику «пятен на тарелке», что и радиоинтерферометры 1940-х и 1950-х (рис.9.2), но их тарелка во много раз больше и использует гораздо больше пятен (гораздо больше связанных радиотелескопов). Они достигают разрешения в одну угловую секунду, примерно такого же, как в лучших оптических телескопах, — громадное достижение, если сравнивать с первыми грубыми инструментами Янски и Ребера, сделанными за сорок лет до этого. Но совершенствования на этом не остановились. К началу 1980-х годов с помощью интерферометров со сверхдлинной базой VLBI (Very Long Baseline Interferometer), состоящих из радиотелескопов на противоположных концах континента или мира, были получены картины ядер радиогалактик и квазаров с разрешением в 1000 раз лучшим, чем у оптических телескопов. (Выходные сигналы каждого телескопа в VLBI записывались на магнитной ленте вместе с временными метками от атомных часов, а затем с помощью компьютера после считывания и объединения данных всех лент получали общее изображение.)

Полученные с помощью VLBI в начале 1980-х изображения показали, что струи вырываются из самой внутренней части ядер галактик,



9.5. *Вверху:* VLA радиоинтерферометр на равнине Св. Августина в Нью-Мексико.

Внизу: Изображение радиогалактики Cygnus A, сделанное с помощью этого интерферометра Р.А.Перли, Дж.В.Дрейером и Дж.Дж.Коуэном. Совершенно отчетливо видна струя, питающая правый лепесток; струя, питающая левый лепесток, видна гораздо хуже. Обратите внимание на колоссальное улучшение разрешения на этой картине радиоизлучения по сравнению с контурной картой Ребера 1944 г., которая вообще не показывала лепестков (рис 9.1г), с радиокартой 1953 г. Дженнисона и Дас Гупты, на которой едва проявилось существование лепестков (два прямоугольника на рис.9.3г), а также с картой Райля 1969 г. (рис. 9.3г). [Обе фотографии предоставлены NRAO/AUI]



9. Наитие

имеющей размер в несколько световых лет или, как в случае некоторых квазаров подобных 3C273, от ярко светящегося объекта размером не больше светового месяца. Главный механизм предположительно находится внутри такого светящегося объекта и обеспечивает энергией не только сам объект, но и струи, которые в свою очередь питают радиолепестки. Струи дали и другой ключ к пониманию природы основного механизма. Некоторые струи остаются совершенно прямыми на расстояниях в миллион световых лет или даже больше. Если бы их источник вращался, то подобно вращающейся воде в сливе раковины он порождал бы спиральные струи. Поэтому наблюдаемая прямолинейность струй свидетельствовала о том, что центральный механизм выстреливал их в одном и том же направлении в течение долгого времени. Насколько долгого? Поскольку газ струй не может двигаться со скоростью выше скорости света, и поскольку длина некоторых струй превышает миллион световых лет, направление извержения должно было оставаться неизменным больше миллиона лет. Чтобы добиться такой стабильности, «сопла» механизма, испускающего струи, должны быть закреплены на чрезвычайно устойчивом объекте, на чем-то вроде долгоживущего *гироскопа*. (Напомню, что гироскоп представляет собой быстро вращающийся объект, в течение долгого времени удерживающий постоянное направление оси своего вращения. Такие гироскопы являются ключевыми компонентами пассивных навигационных систем самолетов и ракет.) Среди десятков предположений, выдвинутых в начале 1980-х годов для объяснения механизма квазаров, лишь одно включало гигантский супергироскоп с большим временем жизни, с размерами меньше светового месяца и возможностью генерации мощных струй. Эта уникальная гипотеза состояла в том, что это гигантская вращающаяся черная дыра.

Гигантские черные дыры

Идея о том, что квазары и радиогалактики могут питаться энергией от гигантских черных дыр, была предложена Эдвардом Салпетером и Яковом Борисовичем Зельдовичем в 1964 г. (в первый год Золотого века, глава 7). Эта идея была очевидным приложением открытия Зельдовича—Салпетера того факта, что падающие на черную дыру потоки должны сталкиваться и излучать (см. рис.8.4).

Более полное и реалистичное описание падения газовых потоков на черную дыру было дано в 1969 г. британским астрофизиком из Кембриджа Дональдом Линден-Беллом. Линден-Белл приводил убедительные доводы, что после того как газовые потоки столкнутся, они

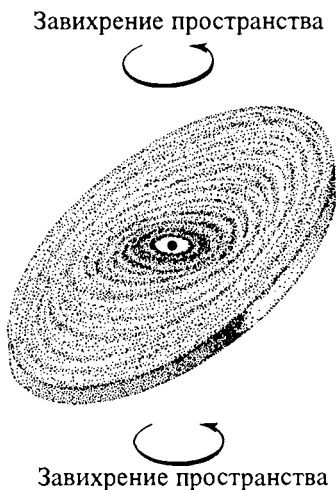
соединятся, и центробежная сила вынудит их вращаться, делая много оборотов по спирали вокруг черной дыры, пока они не упадут на нее. Вращаясь, они образуют объект в форме диска, во многом похожий на кольца вокруг планеты Сатурн — *аккреционный диск*, как его назвал Линден-Белл, поскольку газ собирается, аккрецируется (от латинского *accretio* — приращение, увеличение) черной дырой. (Справа на рис. 8.7 показан такой диск вокруг небольшой черной дыры внутри объекта Лебедь X-1 в представлении художника.) В аккреционном диске прилегающие газовые потоки должны тереться друг о друга, и это интенсивное трение будет нагревать диск до высоких температур.

В 1980-х годах астрофизики поняли, что ярко светящийся объект в центре 3C273 размером в 1 световой месяц или даже меньше, возможно, является аккреционным диском Линден-Белла, нагретым таким трением.

Обычно мы полагаем, что трение — слабый источник теплоты. Вспомним несчастного бойскаута, тщетно пытающегося разжечь огонь трением двух палочек друг о друга. Однако бойскаут ограничен своей слабой мускульной силой, тогда как в аккреционном диске трение питается гравитационной энергией. Поскольку мощность гравитации очень велика, во много раз больше, чем у ядерной энергии, трение вполне может нагреть диск и заставить его светиться в 100 раз сильнее самых ярких галактик.

* * *

Каким образом черная дыра может вести себя подобно гироскопу? Джеймс Бардин и Джакобус Петтерсон из Йельского университета нашли ответ в 1975 г. Если черная дыра быстро вращается, она ведет себя в точности как гироскоп. Направление ее вращения всегда остается строго зафиксированным и неизменным, а завихрение пространства вблизи черной дыры, обусловленное вращением (рис. 7.7), остается всегда строго ориентированным в том же направлении. Бардин и Петтерсон показали с помощью математических расчетов, что это завихрение пространства вблизи черной дыры должно захватывать внутреннюю часть аккреционного диска и плотно удерживать его в экваториальной плоскости черной дыры, независимо от того, как он был ориентирован вдали от нее (рис. 9.6). При захвате нового газа из межзвездного пространства удаленные от центра части диска могут изменить свою форму, но ориентация диска вблизи поверхности черной дыры измениться из-за этого не может. Этому препятствует гирос-



9.6. Вращение черной дыры приводит к завихрению пространства вокруг нее, и это завихрение удерживает внутреннюю часть аккреционного диска в экваториальной плоскости дыры

копическое действие черной дыры. Вблизи черной дыры диск всегда остается в ее экваториальной плоскости.

Без решения Керром уравнений поля Эйнштейна гироскопическое действие черной дыры оставалось бы неизвестным, и, наверное, квазары оставались бы непонятными. Имея в руках решение Керра, астрофизики в середине 1970-х годов подошли к ясному и элегантному объяснению. Впервые главную роль в объяснении астрономических наблюдений играла концепция черной дыры как динамического объекта, а не просто как «дырки в космосе».

Насколько сильным может быть завихрение пространства вблизи гигантской черной дыры? Ответ вывел Джеймс Бардин. Он математически показал, что газ, аккрецирующий на черную дыру из диска, должен постоянно заставлять черную дыру вращаться все быстрее и быстрее. К тому времени как черная дыра поглотит достаточное количество падающего на нее по спирали газа, чтобы удвоить свою массу, она станет вращаться почти с максимально возможной скоростью — скоростью, выше которой центробежные силы будут мешать ее дальнейшему ускорению (глава 7). Поэтому гигантские черные дыры должны обычно иметь скорость вращения, близкую к максимальной.

* * *

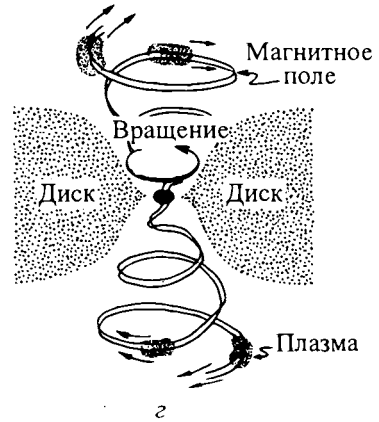
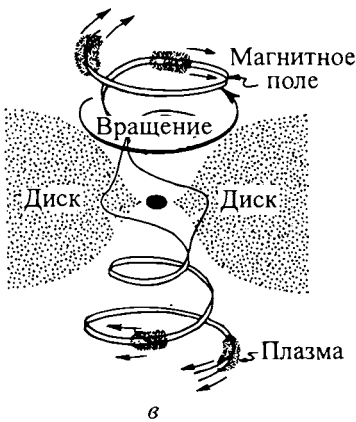
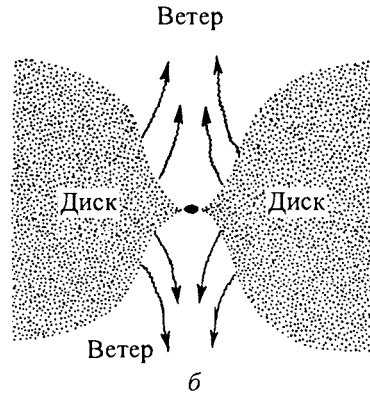
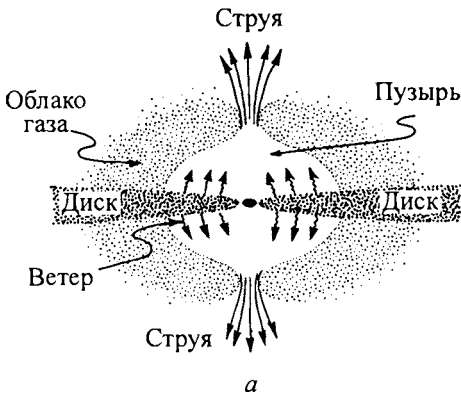
Каким образом черная дыра и ее диск образуют две противоположно направленные струи? На удивление просто, как догадались в сере-

дине 1970-х годов Блэндфорд, Рис и Линден-Белл из Кембриджского университета. Существует четыре возможных способа образования струй, и каждый из них может работать.

Во-первых, Блэндфорд и Рис поняли, что диск может быть окружен холодным газовым облаком (рис. 9.7). Ветер, дующий с нижней и верхней поверхности диска (такой же ветер дует с поверхности Солнца), может создать внутри окружающего холодного газа горячий газовый пузырь. Затем горячий газ может пробить устья в нижней и верхней оболочке холодного облака и вырваться наружу. Так же как сдавленная насадка на садовом шланге создает тонкую быструю струю, устья в холодном облаке собирают в струи вытекающий раскаленный газ. Направления струй будет зависеть от положения устьев. Если холодное облако вращается вокруг той же оси, что и черная дыра, то наиболее вероятные положения находятся на общей оси вращения, т. е. на прямой, перпендикулярной плоскости внутренней части аккреционного диска — устья в этих местах будут образовывать струи, направление которых будет закреплено гироскопическим вращением черной дыры.

Во-вторых, поскольку диск весьма горяч, его внутреннее давление очень велико, и это давление должно раздувать его пока он не станет очень толстым (рис. 9.7б). Как показал Линден-Белл, в этом случае орбитальное движение газа диска вызовет центробежные силы, которые сформируют на верхней и нижней поверхности диска подобные водоворотам воронки. Эти воронки полностью аналогичны тем, которые иногда образуются, когда вода вытекает через сливное отверстие ванны. При этом черная дыра подобна сливному отверстию, а газ диска — воде. Поверхность этих воронок-водоворотов из-за трения газа должна быть настолько горячей, что они сами должны порождать ветер, а воронки будут собирать этот ветер в струи — рассуждал Линден-Белл. Направление струй будет тем же, что и у воронок, которые, в свою очередь, твердо зафиксированы на оси гироскопическим вращением.

В-третьих, как представлялось Блэндфорду, магнитные силовые линии, захватываемые диском и застревающие в нем, будут вынуждены под действием орбитального движения диска круг за кругом вращаться вокруг черной дыры (рис. 9.7в). Вращающиеся силовые линии примут форму спиралей, расходящихся вверх и в стороны (или в стороны и вниз). Электрические силы должны удерживать раскаленный газ (плазму) на вращающихся силовых линиях, поскольку плазма может двигаться лишь вдоль силовых линий, но не поперек них. Поскольку силовые линии вращаются, центробежные силы должны вы-



9.7. Четыре способа, с помощью которых черная дыра или ее аккреционный диск могут обеспечивать энергией парные струи. (а) Ветер с диска выдувает пузырь в окружающем вращающемся газовом облаке; раскаленный газ пузыря пробивает в облаке вдоль оси вращения устья, и из них вырываются струи раскаленного газа. (б) Диск под действием огромного внутреннего жара раздувается, и поверхность раздувшегося вращающегося диска формирует две воронки, которые собирают ветер с поверхности диска в две струи. (в) Магнитные силовые линии, захваченные диском, вовлекаются в его орбитальное вращение; при вращении вдоль магнитных силовых линий выбрасывается наружу вверх и вниз плазма, и образуются две намагниченные струи. (г) Магнитные силовые линии пронизывающие черную дыру, вовлекаются во вращение искривлением пространства вокруг черной дыры и вращаясь эти силовые линии выбрасывают плазму вверх и вниз, образуя две намагниченные струи

талкивать плазму наружу вдоль силовых линий, образуя две намагниченные струи, одна из которых выстреливает в стороны и вверх, а другая — в стороны и вниз. И опять-таки направление струй будет строго привязано к вращению черной дыры.

Четвертый способ образования струй интереснее остальных и требует больших объяснений. В этом четвертом способе черная дыра пронизывается магнитными силовыми линиями, как показано на рис. 9.7г.

При вращении черной дыры она втягивает в свое вращение и силовые линии, заставляя их отбрасывать плазму вверх и вниз, точно так же как и в третьем способе, образуя две струи. Струи выстреливают вдоль оси вращения, и их направление поэтому прочно привязано к гироскопическому вращению черной дыры. Этот способ был придуман Блэндфордом вскоре после защиты им диссертации в Кембридже, вместе с аспирантом Романом Знаком, и потому получил название *процесс Блэндфорда–Знака*.

Процесс Блэндфорда–Знака представляет особенный интерес, поскольку энергия, уходящая вместе со струями, черпается непосредственно из колоссальной энергии вращения черной дыры. (Это должно быть очевидно, поскольку именно вращение черной дыры скручивает пространства, завихрение пространства заставляет вращаться магнитные силовые линии, а вращение силовых линий извергает струи наружу.)

Но как такое возможно? Ведь в процессе Блэндфорда–Знака горизонт черной дыры оказывается пронизанным магнитными силовыми линиями? А такие силовые линии будут чем-то вроде «волос», которые могут превратиться в электромагнитные волны и излучиться и, согласно теореме Прайса (глава 7), *должны* излучиться. Фактически теорема Прайса справедлива только тогда, когда одинокая черная дыра располагается далеко от других объектов. Черная дыра, которую мы обсуждаем, не одинока; она окружена аккреционным диском. Если силовые линии торчат из черной дыры, как на рис.9.7г, то линии, выходящие в северную полусферу дыры и выходящие в южную полусферу, оказываются продолжением друг друга, и единственный способ для этих силовых линий выйти наружу — это пробиться через раскаленный газ аккреционного диска. Но раскаленный газ не позволит силовым линиям пройти, он прочно удерживает их в области пространства вблизи внутренней поверхности диска, а поскольку значительная часть этой области занята черной дырой, большая часть пойманных силовых линий пронизывает черную дыру.

Откуда же берутся эти магнитные силовые линии? Из самого диска. Весь газ во Вселенной хоть немного намагничен, и газ диска не является исключением³. Мало помалу собираясь около черной дыры, он приносит с собой свои магнитные силовые линии. Приближаясь к черной дыре, газ, каждая порция газа, соскальзывает со своих магнит-

³ Магнитные поля постоянно образовывались в течение всего срока существования Вселенной в результате движения звездного и межзвездного газа, а избавиться от них после возникновения чрезвычайно трудно. Когда межзвездный газ аккумулируется в аккреционном диске, он приносит с собой и магнитные поля.

9. Наитие

ных линий и проходит горизонт, оставляя после себя силовые линии, торчащие наружу, как на рис. 9.7г. Эти пронизывающие силовые линии, прочно удерживаемые окружающим диском, должны в ходе процесса Блэндфорда—Знаека черпать энергию вращения черной дыры.

Все четыре способа образования струй (устья в газовых областях, ветер с воронок, завихрение силовых линий, захваченных полем, и процесс Блэндфорда—Знаека), возможно, в разной степени действуют в квазарах, радиогалактиках и в центрах некоторых других своеобразных галактик (называемых *галактиками с активными ядрами*).

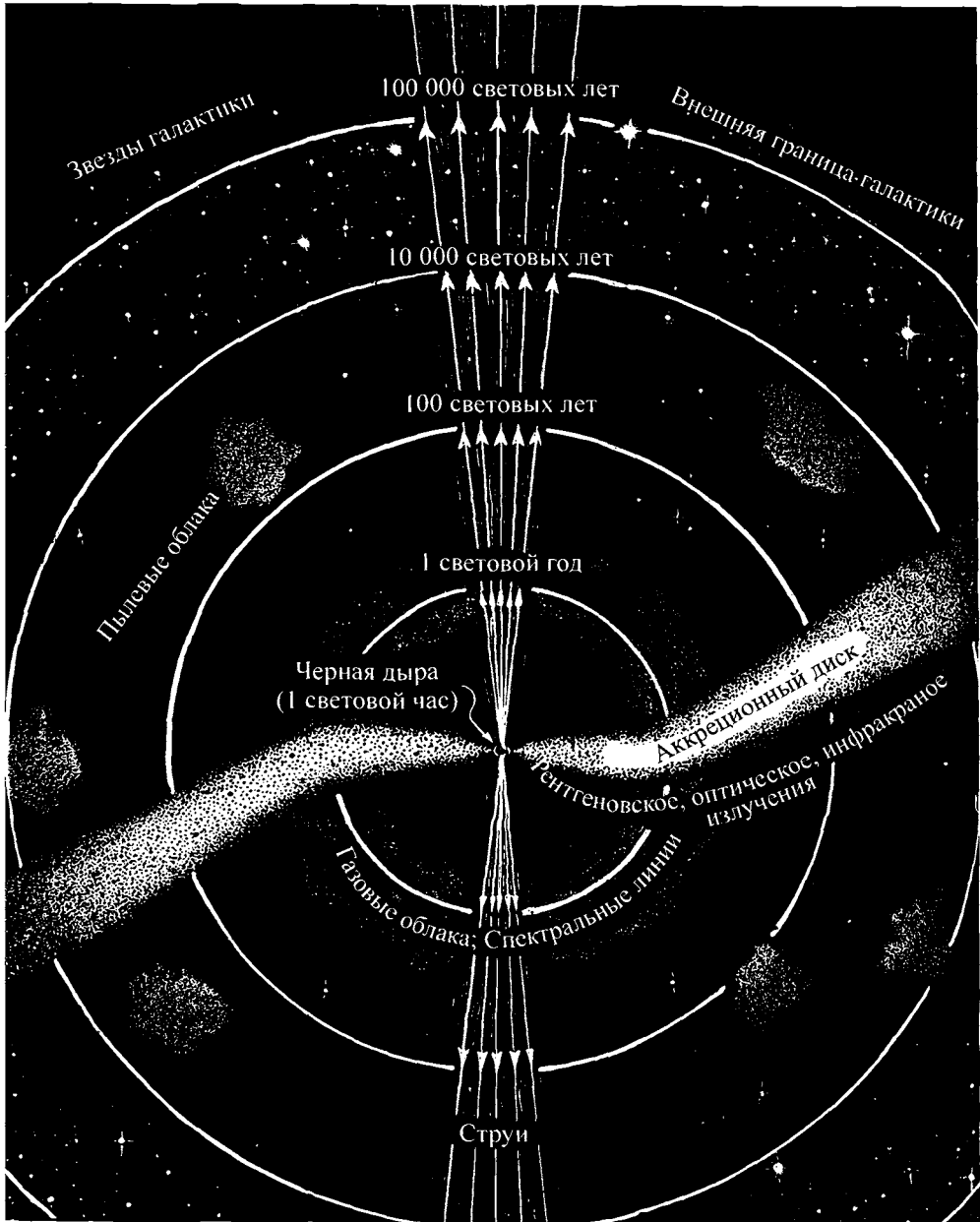
* * *

Если квазары и радиогалактики черпают энергию от одного и того же механизма — черной дыры, почему они настолько различны? Почему свет от квазара кажется приходящим от ярко светящегося звездоподобного источника размером в 1 световой месяц или даже меньше, тогда как свет от радиогалактики приходит от скопления звезд подобного Млечному Пути размером в 100000 световых лет?

В действительности квазары почти наверняка не сильно отличаются от радиогалактик — их центральное ядро также окружено звездной галактикой размером в 100000 световых лет. Однако в квазарах центральная черная дыра особенно интенсивно питается аккрецирующим газом (рис. 9.8), и разогрев под действием трения, соответственно, очень силен. Этот ужасный жар заставляет диск светиться настолько ярко, что его оптическое свечение в сотни и тысячи раз больше, чем у всех окружающих звезд в этой галактике вместе взятых. Астрономы, ослепленные сиянием диска, не могут видеть других звезд галактики, и поэтому объект выглядит как «квазизвезда» (т. е. подобная звезде крошечная яркая световая точка), а не как галактика.⁴

Внутренняя область диска настолько горяча, что испускает рентгеновские лучи; чуть дальше диск холоднее и испускает ультрафиолетовое излучение; еще дальше оптическое излучение (видимый свет); а самые внешние области еще холоднее и испускают инфракрасное излучение. Область, излучающая в световом диапазоне, обычно имеет размер около одного светового года, хотя иногда, например в 3C273, она может быть размером в световой месяц или еще меньше и потому может менять светимость за периоды длительностью не больше месяца. Большая часть рентгеновского и ультрафиолетового излучения, вырывающегося из внутренних областей, сталкивается с газовыми облаками

⁴Слово «квазар» является сокращением от «quasi-stellar» — квазизвезда.



9.8. Так мы сегодня понимаем структуру квазаров и радиогалактик. Эта подробная модель, основанная на данных наблюдений, была разработана Стерлом Финни в Калтехе, а также другими учеными

9. Наитие

и нагревает их на расстоянии нескольких световых лет от диска — именно эти нагретые облака излучают спектральные линии, которые позволили открыть квазары. Намагниченный ветер, дующий от диска в некоторых, но не во всех, квазарах может быть достаточно сильным и достаточно хорошо сколлапсированным, чтобы образовать радиоизлучающие струи.

В радиогалактиках, в отличие от квазаров, центральный аккреционный диск предположительно относительно малоподвижен. Эта малоподвижность означает малое трение, а потому слабый нагрев и низкую светимость и, следовательно, диск светит не так ярко, как остальная галактика. Поэтому астрономы видят в оптические телескопы галактику, а не диск. Однако диск, вращающаяся черная дыра и магнитные поля, пронизывающие черную дыру, вместе порождают сильные струи, вероятно так, как это показано на рис.9.7г (процесс Блэндфорда—Знаека), и эти струи извергаются из галактики в межгалактическое пространство, где питают энергией гигантские галактические радиоизлучающие лепестки.

* * *

Эти объяснения квазаров и радиогалактик, опирающиеся на черные дыры, настолько удачны, что возникает искушение заключить, что они *должны* быть правильными, а галактические струи являются уникальными подписями, кричащими нам: «Я иду от черной дыры!» Однако астрофизики более осторожны. Они хотели бы иметь абсолютно железный случай. Все еще остается возможность объяснить все наблюдаемые свойства радиогалактик и квазаров, используя альтернативный, без черной дыры, механизм: быстро вращающаяся, намагниченная сверхмассивная звезда, в миллионы или миллиарды раз более тяжелая, чем Солнце, — тип звезд, никогда не наблюдавшийся астрономами, но которые, как предполагает теория, могут образовываться в ядрах галактик. Подобные сверхмассивные звезды должны вести себя во многом так же, как аккреционный диск. Сжимаясь до меньшего размера (но до размера все же большего, чем критическая окружность), они должны высвобождать колоссальное количество гравитационной энергии — эта энергия через трение может нагревать звезду настолько, что она начинает ярко светить подобно аккреционному диску, а магнитные силовые линии, привязанные к звезде, могут вращаться и струями выбрасывать плазму.

Может оказаться, что некоторые радиогалактики и квазары черпают энергию от таких сверхмассивных звезд. Однако физические законы

настаивают, что подобная звезда должна непрерывно сжиматься до все меньшего и меньшего объема, а затем, при достижении критической окружности, схлопнуться с образованием черной дыры. Полное время жизни звезды до момента схлопывания должно быть намного меньше, чем возраст Вселенной. Это предполагает, что хотя самые молодые радиогалактики и квазары *могли бы* управляться сверхмассивными звездами, более старые почти всегда питаются от гигантских черных дыр *почти* наверняка, но не *абсолютно* точно. Эти аргументы не являются вполне железными.

* * *

Насколько распространены черные дыры? Свидетельства, постепенно собранные в 1980-е годы, предполагают, что такие черные дыры населяют не только ядра большинства квазаров и радиогалактик, но и ядра большинства больших обычных (не радио) галактик, подобных нашему Млечному Пути и Туманности Андромеды, и даже ядра некоторых малых галактик, подробных карликовым спутникам Туманности Андромеды, М32. В обычных галактиках (Млечный Путь, Туманность Андромеды, М32) черная дыра предположительно либо вообще не окружена аккреционным диском, либо окружена диском очень разреженным, излучающим мало энергии.

Свидетельства присутствия подобной черной дыры в нашем Млечном Пути (к 1993 г.) пока неоднозначны и далеко не прочны. Одно из ключевых мест этих свидетельств заключается в орбитальном движении облаков газа вблизи центра нашей галактики. Инфракрасные наблюдения этих облаков, проведенные Чарльзом Таунсом с коллегами из Университета Калифорнии в Беркли, показали, что облака обращаются вокруг объекта, имеющего массу около 3 миллионов солнечных масс, а радионаблюдения открыли очень характерный, хотя и не слишком сильный, радиоисточник на месте этого центрального объекта — радиоисточник на удивление малого размера, не больше нашей Солнечной системы. Это как раз те данные наблюдений, которые можно было бы ожидать от неподвижной черной дыры в 3 миллиона солнечных масс с тонким аккреционным диском, но они также легко могут быть объяснены и по-другому.

* * *

Возможность того, что гигантские черные дыры могут существовать и населять ядра галактик, стала оглушительным сюрпризом для

9. Наитие

астрономов. Однако ретроспективно нетрудно понять, как они могли бы там формироваться.

В любой галактике, если две звезды проходят близко друг к другу, гравитационные поля сначала их разворачивают, а затем разбрасывают в направлениях отличных от первоначального. (Тот же поворот и последующий разлет изменяет орбиты космических аппаратов NASA при их встрече с планетами, например с Юпитером.) При развороте и разлете одна из звезд обычно улетает внутрь, к центру галактики, а другая наружу, от центра. Суммарный эффект многих подобных разворотов и разлетов состоит в перемещении некоторых звезд галактики глубже к ядру. Точно так же оказывается, что совокупным эффектом трения галактического межзвездного газа является смещение его значительной части к ядру галактики.

Чем больше газа и звезд накапливается в ядре, тем сильнее становится гравитация агломерата. В конечном счете, гравитация агломерата может стать настолько прочной, что сокрушит внутреннее давление, и агломерат начнет схлопываться с образованием гигантской черной дыры. Кроме того, массивные звезды в агломерате могут схлопываться по отдельности, образуя меньшие дыры, и эти малые дыры могут сталкиваться друг с другом, с другими звездами и газом, образуя все большие и большие дыры, пока не сформируется единственная гигантская дыра, доминирующая в ядре. Оценки времени, требующегося для таких схлопываний, столкновений и слияний, показывают, что возможно (но не обязательно), что большинство галактик уже успели вырастить в своих ядрах гигантские черные дыры.

Если бы астрономические наблюдения действительно не показывали, что ядра галактик населены гигантскими черными дырами, то астрофизики даже сегодня, вероятно, не предсказали бы их. Однако так как наблюдения действительно свидетельствуют о существовании гигантских черных дыр, астрофизики легко приспособились к этому факту. Этот показательный пример свидетельствует о том, насколько плохо мы в действительности понимаем процессы, происходящие в ядрах галактик.

* * *

А что в будущем? Не стоит ли нам начать волноваться, что гигантская дыра в ядре нашего Млечного Пути может проглотить Землю? Несколько чисел помогут нам расслабиться. Центральная дыра нашей галактики (если она действительно существует) имеет массу приблизительно в 3 миллиона солнечных и, таким образом, имеет окружность

приблизительно равную 50 миллионам километров, или 200 световых секунд — около одной десятой окружности орбиты Земли вокруг Солнца. Это ничтожный размер по сравнению с размером самой галактики. Наша Земля вместе с Солнцем обращается вокруг центра галактики по орбите с окружностью 200000 световых лет, что приблизительно в 30 миллиардов раз больше, чем окружность дыры. Если бы дыра проглотила, в конечном счете, большую часть массы галактики, ее окружность распухла бы только приблизительно до 1 светового года, что все еще в 200000 раз меньше, чем наша орбита.

Конечно, примерно через 10^{18} лет (в 100 миллионов раз больше возраста Вселенной), которые потребуются центральной дыре для поглощения большей части массы нашей галактики, орбиты Земли и Солнца сильно изменятся. Невозможно предсказать детали этих изменений, поскольку мы не знаем положения и движения всех тех других звезд, с которыми могут столкнуться Солнце и Земля в течение 10^{18} лет. Таким образом, мы не можем предсказать, окажутся ли Земля и Солнце, в конечном счете, в центральной черной дыре галактики или будут выброшены прочь из галактики. Однако мы можем быть уверенными, что, если Землю, в конечном счете, проглотит дыра, это падение случится в будущем примерно через 10^{18} лет, и за это время Землю и человечество почти наверняка смогут постигнуть многие другие катастрофы.

РЯБЬ КРИВИЗНЫ

глава, в которой гравитационные волны несут к Земле закодированные симфонии столкновений черных дыр, а физики изобретают инструменты, чтобы следить за этими волнами и расшифровывать эти симфонии

Симфонии

В ядре удаленной галактики за миллиард световых лет от Земли и миллиард лет тому назад образовался плотное скопление из газа и сотен миллионов звезд. Скопление постепенно сжималось, поскольку то одна, то другая звезда выскакивала наружу, а оставшиеся 100 миллионов еще плотнее сбивались в центре. После 100 миллионов лет скопление сжалось до размера в несколько световых лет, и маленькие звезды начали иногда сталкиваться и сливаться, формируя большие звезды. Большие звезды потребляли их топливо и затем схлопывались, образуя черные дыры, а черные дыры, пролетая вблизи друг друга, иногда объединялись в пары и начинали обращаться вокруг друг друга.

Рисунок 10.1 показывает вложенные диаграммы для одной такой двойной *черной дыры*. Каждая дыра создает глубокую яму (сильное искривление пространства-времени) во вложенной поверхности, и поскольку дыры обращаются вокруг друг друга, вращающиеся ямы производят рябь кривизны, которая начинает распространяться во все стороны со скоростью света. Рябь формирует разворачивающуюся спираль в материи пространства-времени вокруг двойной системы, напоминаящую струи воды от быстровращающегося разбрызгивателя на лужайке.

Так же как каждая капля воды летит от разбрызгивателя в сторону почти по радиусу, так и каждый кусочек кривизны летит в сторону от черных дыр почти по радиусу; и так же как летящие в стороны капли

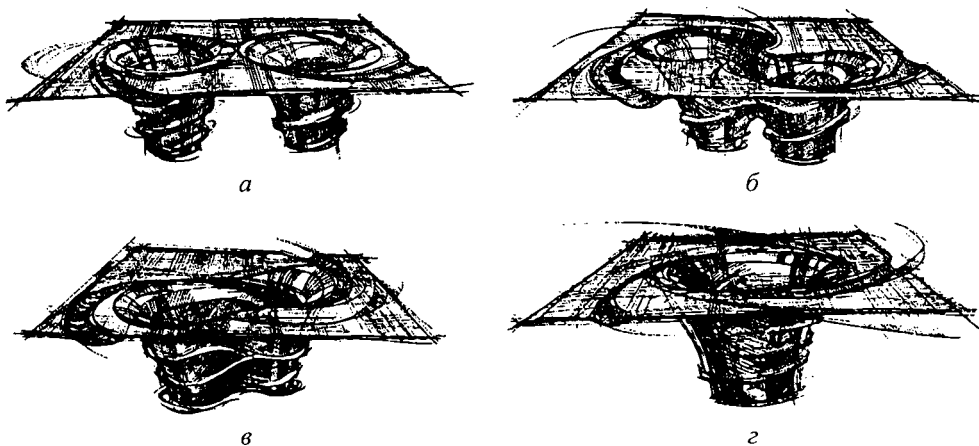


10.1. Вложенная диаграмма, изображающая искривление пространства в плоскости орбиты двойной системы, образованной двумя черными дырами. В центре — две ямы, которые представляют сильное искривление пространства-времени вокруг двух дыр. Эти ямы — такие же, как и те, с которыми мы сталкивались на предыдущих вложенных диаграммах черных дыр, например, на рис. 7.6. Поскольку дыры обращаются относительно друг друга, они создают распространяющуюся во все стороны рябь кривизны, называемую *гравитационными волнами*. [Предоставлено Проектом LIGO, Калифорнийский технологический институт]

все вместе образуют спиральные струи воды, так и все кусочки кривизны вместе формируют спиральные хребты и долины в ткани пространства-времени.

Так как кривизна пространства-времени — это то же самое, что гравитация, рябь кривизны является фактически волнами гравитации, или *гравитационными волнами*. Общая теория относительности Эйнштейна недвусмысленно предсказывает, что такие гравитационные волны должны появляться всякий раз, когда две черные дыры начинают обращаться вокруг друг друга, так же как и вообще в случае обращения вокруг друг друга двух любых звезд.

Улетая в окружающее пространство, гравитационные волны толкают дыры к центру, аналогично тому, как пуля дает отдачу стреляющему ружью. Отдача волн приводит к сближению черных дыр и к ускорению их обращения, т. е. она заставляет их двигаться друг к другу по медленно закручивающейся внутрь спирали. Закручивающаяся спираль постепенно высвобождает гравитационную энергию, одна половина которой уходит в волны, а другая в увеличение орбитальных скоростей черных дыр.



10.2. Вложенные диаграммы, изображающие кривизну пространства вокруг двойной системы, состоящей из двух черных дыр. Диаграммы были дополнительно разрисованы художником, чтобы создать ощущение движения. Каждая следующая диаграмма показывает более поздний момент времени в процессе сближения двух дыр по скручивающейся спирали. На диаграммах (а) и (б) горизонты дыр — круги у основания ям. Горизонты сливаются как раз перед диаграммой (в), образуя единый, имеющий форму гантели горизонт. Вращающаяся гантеля испускает гравитационные волны, которые уносят ее деформацию, оставляя позади гладкую вращающуюся черную дыру Керра на диаграмме (г). [Предоставлено Проектом LIGO, Калифорнийский технологический институт]

Спиральное обращение черных дыр происходит сначала медленно, но чем ближе дыры подходят друг к другу, тем быстрее они движутся, тем интенсивнее порождаемая ими рябь кривизны, тем быстрее они теряют энергию и тем быстрее происходит скручивание спирали (рис. 10.2а, б). В конечном счете, когда каждая дыра приобретает скорость, почти равную скорости света, их горизонты соприкасаются и сливаются. Там, где ранее было две дыры, теперь остается только одна быстро вращающаяся гантелевидная дыра (рис. 10.2в). При вращении этого гантелевидного горизонта излучается рябь кривизны, и эта рябь толкает утолщения к центру дыры, постепенно сближая концы гантели, пока они не исчезают (рис. 10.2г). Горизонт вращающейся дыры становится совершенно гладким и круглым в экваториальном поперечном сечении, в точном соответствии с формой, следующей из решения уравнения поля Эйнштейна, полученного Керром (глава 7).

Исследуя окончательную гладкую черную дыру, невозможно никаким образом узнать ее прошлую историю. Нельзя различить, была ли она образована при слиянии двух меньших дыр или прямым схлопыванием звезды, состоящей из вещества, или даже схлопыванием звезды, состоящей из антивещества. Черная дыра не имеет никаких «волос», которые позволили бы расшифровать ее историю (глава 7).

Однако история полностью все же не потеряна. Осталась запись: она закодирована в ряби кривизны пространства-времени, которую испускали сливающиеся дыры. Эти волны кривизны похожи на звуковые волны симфонии. Так же как симфония кодируется в модуляции звуковых волн (большая амплитуда здесь, меньшая там, более высокая частота колебаний здесь и более низкая там), история слияния кодируется в модуляциях ряби кривизны. И так же как звуковые волны доносят от оркестра до аудитории закодированную симфонию, летящая рябь кривизны несет остальной Вселенной закодированную историю слияния черных дыр.

Рябь кривизны начинает свое путешествие наружу, проходя через ткань пространства-времени и через скопление звезд и газа, где родились две дыры. Скопление несколько не поглощает и не искажает эту рябь, и закодированная в ней история остается совершенно неизменной. Направленная наружу рябь распространяется через материнскую галактику скопления, а затем в межгалактическом пространстве через кластер галактик, в котором находится материнская галактика, а затем далее от одного кластера к другому к нашей метagalактике, к нашей собственной галактике Млечный Путь, в нашу Солнечную систему, проходит через Землю и улетает дальше к другим далеким галактикам.

Если мы, люди, будем достаточно умны, мы сможем отследить пролетающую рябь кривизны. Наши компьютеры помогут перевести ее в звуковые колебания, и мы тогда сможем услышать симфонию черных дыр: симфонию, в которой сначала высота тона и громкость постепенно повышаются, когда черные дыры сходятся по спирали, затем звук странным образом меняется, когда они сливаются в одну деформированную дыру, и затем медленно опускается на одной ноте, когда постепенно уменьшаются и исчезают образовавшиеся выпячивания горизонта.

Если мы сможем расшифровать этот сигнал, симфония муара будет содержать массу информации:

1. Симфония будет содержать подпись, гласящую: «Я пришла от пары черных дыр, которые сходятся по закручивающейся спирали и сливаются». Это будет той абсолютно определенной подписью черной дыры, которую астрономы до настоящего времени напрасно искали с помощью света, рентгеновского излучения (глава 8) и радиоволн (глава 9). Поскольку свет, рентгеновское излучение и радиоволны рождаются далеко от горизонта дыры и поскольку они излучаются другим видом материи (горячими, высокоскоростными электронами), который совершенно отлича-

ется от того, из которого сделана дыра (чистая кривизна пространства-времени), постольку они, распространяясь через лежащее на пути вещество космоса, могут сильно искажаться, донося до нас довольно мало информации о дыре и никаких однозначных подписей. Рябь кривизны (гравитационные волны) в отличие от этого рождается очень близко к горизонту сливающихся дыр. Она состоит из той же самой материи (деформация ткани пространства-времени), что и сами дыры, она вообще не искажается, распространяясь через вещество и, как следствие, она может донести до нас подробную информацию о дырах и определенную подпись черной дыры.

2. Симфония ряби может рассказать нам о том, насколько тяжелой была каждая из дыр, как быстро они вращались, какая форма была у их орбит (круговая? вытянутая?), где находятся на нашем небе эти дыры и как далеко они от Земли.
3. Симфония будет содержать частичную карту кривизны пространства-времени сходящихся по спирали дыр. Впервые мы сможем определенно проверить предсказания общей теории относительности относительно черных дыр: согласуется ли карта, нарисованная на основании симфонии, с решением уравнений поля Эйнштейна, полученным Керром (глава 7)? Покажет ли эта карта завихрение пространства около черной дыры, которое требует решение Керра? Согласуется ли количественно это завихрение с решением Керра? Согласуется ли с решением Керра изменение завихрения при приближении к горизонту?
4. Симфония опишет слияние горизонтов этих двух дыр и неопределенных колебаний сразу после начала слияния дыр колебаний, о которых сегодня мы имеем только самое неопределенное представление. Мы понимаем их только в общих чертах, поскольку они управляются особенностью общих законов теории относительности Эйнштейна, которую мы плохо понимаем: *нелинейностью* (Врезка 10.1). «Нелинейность» означает, что сильная кривизна приводит к еще более сильной кривизне, которая в свою очередь рождает еще большую кривизну, так же как происходит нарастание лавины, когда струйка скользящего снега втягивает в движение новый снег, который в свою очередь захватывает еще больше снега, пока весь заснеженный склон горы не приходит в движение. Мы понимаем, как ведет себя эта нелинейность в статичной черной дыре; там она отвечает за удержание дыры — это «клей» дыры. Но мы не понимаем то, что собой представляет нелинейность и как она ведет себя, к каким эффектам она

приводит, когда сильная кривизна является чрезвычайно динамической. Слияние и вибрация двух дыр является той перспективной «лабораторией», в которой мы можем найти такое понимание. Понимание может прийти лишь при тесном сотрудничестве физиков-экспериментаторов, которые ловят рябь кривизны от сливающихся дыр, приходящую из удаленных частей Вселенной, и физиков-теоретиков, которые моделируют слияние на суперкомпьютерах.

Врезка 10.1

Нелинейность и ее следствия

Величину называют *линейной*, если ее полное значение является суммой ее частей, иначе она *нелинейна*.

Мой семейный доход линейен: он является суммой зарплаты моей жены и моей собственной. Сумма, которая находится в моем пенсионном фонде, нелинейна — это не сумма всех вкладов, которые я туда внес, она гораздо больше, поскольку каждый вклад приводит к вложениям фонда, дающим прибыль, которая, в свою очередь, вкладывается снова, давая свои проценты.

Объем воды, текущей в трубе сточного коллектора, линейен — это сумма вкладов от всех домов, которые присоединены к трубе. Объем снега, обрушивающегося в лавине, нелинейен — слабая струйка снега может вызвать сползание всего заснеженного склона горы.

Линейные явления просты, их легко анализировать и легко предсказывать. Нелинейные явления сложны и трудно предсказуемы. Линейные явления показывают только небольшое число видов поведения, которые легко классифицировать. Нелинейные явления показывают большое богатство типов поведения, разнообразие которых ученые и инженеры только начали оценивать в последние годы, когда столкнулись с таким видом нелинейного поведения, как *хаос*. (Изыщное введение в понятие хаоса см. в книге Gleick, 1987.)

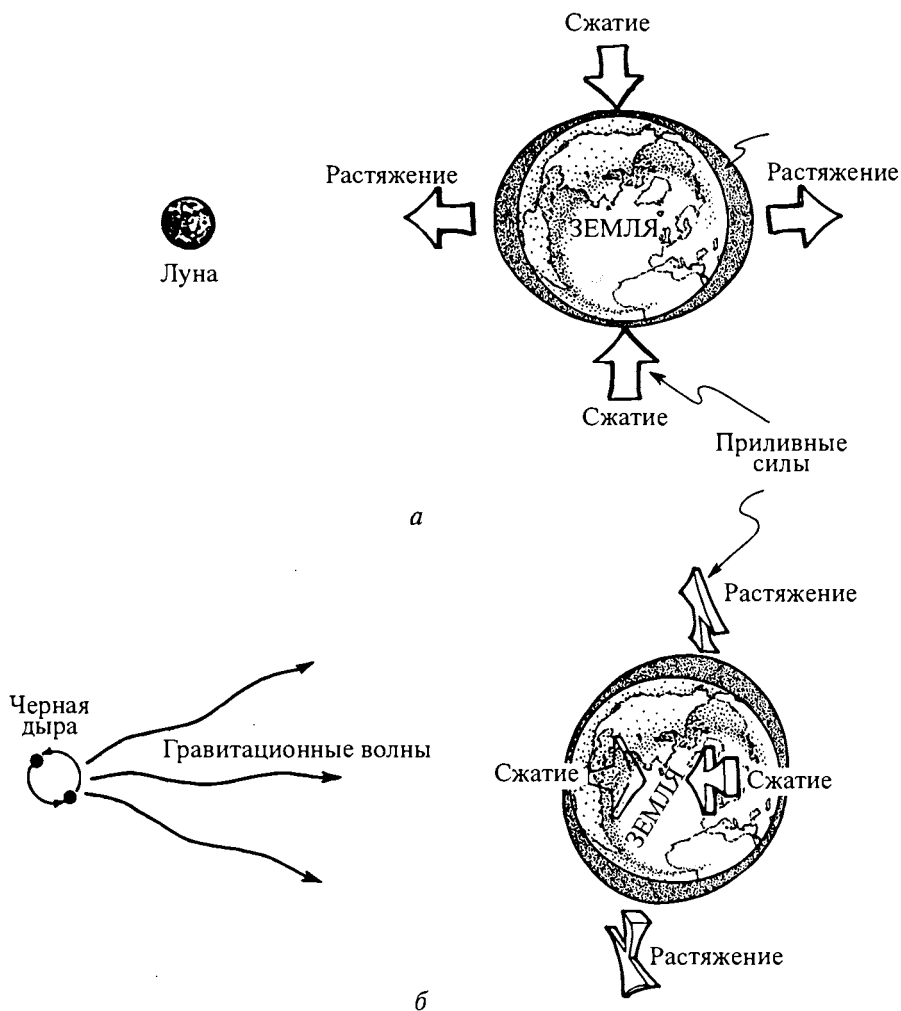
Когда кривизна пространства-времени мала (как в Солнечной системе), она почти линейна, например, океанские приливы на Земле являются суммой приливов, обусловленных кривизной пространства-времени, созданной Луной (приливная гравитационная сила), и приливов, вызванных Солнцем. В отличие от этого, когда кривизна пространства-времени становится сильной (как при большом взрыве или около черной дыры), общие релятивистские законы гравитации Эйнштейна предсказывают, что кривизна должна быть чрезвычайно нелинейной — одним из самых нелинейных явлений во Вселенной. Однако у нас пока еще почти нет экспериментальных данных, показывающих нам эффекты гравитационной нелинейности, и мы еще настолько неопытны в решении уравнений Эйнштейна, что можем их решать и знаем о поведении этой нелинейности только в простых ситуациях, например, вокруг статичной вращающейся черной дыры.

Статичная черная дыра обязана своим существованием гравитационной нелинейности: без гравитационной нелинейности дыра не могла бы поддерживать себя, так же как без нелинейности газа не могло бы сохраняться большое красное пятно на Юпитере. Когда схлопывающаяся звезда, образующая черную дыру, исчезает под горизонтом дыры, она теряет возможность каким-либо образом влиять на дыру и, что самое важное, гравитация звезды больше не может поддерживать черную дыру. В этом случае звезда продолжает существовать исключительно благодаря гравитационной нелинейности: кривизна пространства-времени черной дыры непрерывно нелинейно регенерируется, без помощи звезды; и самообразующаяся кривизна служит «клеем», связывающим черную дыру воедино.

Статичная черная дыра разожгла наш аппетит, и нам хочется узнать больше. К каким другим явлениям может привести гравитационная нелинейность? Некоторые ответы могут прийти от слежения и расшифровки ряби кривизны пространства-времени, вызванной слиянием черных дыр. Там мы могли бы увидеть хаотическое, причудливое поведение, которое совсем не ожидали.

Для достижения этого понимания потребуется слежение за симфонической рябью кривизны от черных дыр. Как можно за ней следить? Ключом является материальная природа кривизны: кривизна пространства-времени является тем же самым, что и гравитационные приливные силы. Кривизна пространства-времени, созданная Луной, вызывает на Земле океанские приливы и отливы (рис. 10.3a); аналогичные приливы должна вызывать и рябь кривизны пространства-времени в гравитационной волне (рис. 10.3б).

Общая теория относительности настаивает, однако, что океанские приливы, вызванные Луной и гравитационной волной, имеют три главных отличия. Первое отличие — распространение. Приливные силы гравитационной волны (рябь кривизны) похожи на световые волны или радиоволны. Они распространяются от источника к Земле со скоростью света, колеблясь в процессе распространения. В отличие от этого, приливные силы Луны напоминают электрическое поле заряженного тела. Так же как электрическое поле жестко связано с заряженным телом и всегда перемещается вместе с телом, как иголки перемещаются вместе с ежом, приливная сила жестко связана с Луной, и Луна несет ее с собой постоянно в неизменном виде, всегда готовую достать и сжимать и растягивать все, что попадает в ее поле действия. Приливные силы Луны сжимают и растягивают океаны Земли так, что кажется, что происходят изменения каждые несколько часов, только потому, что Земля вращается в поле этих сил. Если бы Земля не вращалась, то растяжение и сжатие были бы постоянными и неизменными.



- 10.3. Приливные силы, вызванные Луной и гравитационной волной. (а) Приливные силы Луны растягивают и сжимают океаны Земли. Растяжение происходит в продольном направлении, а сжатие — в поперечном. (б) Приливные силы гравитационной волны растягивают и сжимают океаны Земли. Эти силы полностью поперечны и создают растяжение в одном поперечном направлении, а сжатие в другом

Второе отличие — направление приливов (рис. 10.3а, б): Луна вызывает приливные силы во всех пространственных направлениях. Она растягивает океаны в продольном направлении (по направлению к Луне и от нее) и сжимает в поперечных направлениях (перпендикулярных направлению на Луну). В отличие от этого, гравитационная волна вообще не производит никаких приливных сил в продольном направлении (вдоль направления распространения волны). Однако в поперечной плоскости волна растягивает океаны в одном направлении (направление вверх-вниз на рис. 10.3б) и сжимает по другому на-

10. Рябь кривизны

правлению (направление вперед-назад на рис. 10.3б). Эти растяжения и сжатия являются колебательными. Когда проходит гребень волны, растяжение происходит в направлении вверх-вниз, а сдавливание в направлении вперед-назад, при проходе минимума все меняется, и сжатие происходит в направлении вперед-назад, а растяжение в направлении вверх-вниз, с прибытием следующего гребня все опять переворачивается, снова с растяжением в направлении вверх-вниз и сжатием в направлении вперед-назад.

Третье отличие между лунными приливами и приливами, вызванными гравитационными волнами, состоит в их величине. Луна вызывает приливы высотой около 1 м, поэтому разность между приливом и отливом составляет около 2 метров. В отличие от этого, гравитационные волны от сливающихся черных дыр должны вызывать океанский прилив на Земле не выше 10^{-14} м, т. е. на 10^{-21} часть размера Земли (в 10000 раз меньше размера атома и всего в 10 раз больше размера атомного ядра). Поскольку приливные силы пропорциональны размерам объекта, на который они действуют (глава 2), гравитационные волны будут приливным образом деформировать любой объект, на который они действуют, на 10^{-21} часть его размера. В этом смысле величина 10^{-21} является *амплитудой волн*, достигающих Земли.

Почему эти волны такие слабые? Потому что сливающиеся черные дыры находятся от нас так далеко. Амплитуда гравитационных волн, так же как и световых волн, ослабляется обратно пропорционально пройденному расстоянию. Когда волны еще находятся близко к черным дырам, их амплитуда имеет порядок 1, что означает, что они сжимают и растягивают любой объект на величину, сравнимую с размером объекта. Человек был бы немедленно убит таким сильным растяжением или сжатием. Однако когда волны достигают Земли, их сила ослабляется примерно на величину $(1/30 \text{ окружности черной дыры})/(\text{расстояние, пройденное волной})^1$. Для черных дыр, имеющих массу в 10 солнечных, находящихся на расстоянии в миллиард световых лет от нас, эта амплитуда волны $(1/30) \times (180 \text{ километров окружности горизонта})/(\text{миллиард световых лет}) \approx 10^{-21}$. Поэтому волны изменяют размер океанов Земли на величину $10^{-21} \times (10^7 \text{ метров размера Земли}) \approx 10^{-14}$ метра, что в 10 раз больше размеров атомного ядра.

Совершенно безнадежно, конечно, пытаться измерить такой крошечный прилив на поверхности волнующегося океана. Не таким без-

¹ Коэффициент $1/30$ получается из детальных расчетов на основании уравнения поля Эйнштейна. Он включает множитель $1/(2\pi)$, который примерно равен $1/6$, для преобразования окружности в радиус и дополнительный множитель $1/5$, следующий из особенностей уравнения поля.

надежным делом оказываются, однако, перспективы измерить приливные силы гравитационных волн, действующие на тщательно сконструированный лабораторный прибор — *детектор гравитационных волн*.

Болванки

Джозеф Вебер был первым человеком, который имел достаточно интуиции, чтобы понять, что попытки детектирования гравитационных волн совсем не безнадежны. Он был выпускником Военно-морской академии США со степенью бакалавра инженерного дела. Во время второй мировой войны он служил на авианосце Лексингтон, пока тот не затонул во время боя в Коралловом море, затем стал командным офицером на охотнике за подводными лодками № 690 и сопровождал бригадного генерала Теодора Рузвельта младшего и 1900 десантников во время высадки на берег при вторжении в Италию в 1943 г. После войны он стал главой Отдела электронного противодействия Бюро кораблей военно-морских сил США. Его репутация эксперта по радио и радарным технологиям была настолько велика, что в 1948 г. ему была предложена и им принята позиция профессора электротехники в Мэрилендском университете — полного профессора в возрасте двадцать девять для всего лишь выпускника колледжа со степенью бакалавра.

Преподавая электротехнику в Мэриленде, Вебер готовился к изменениям в своей карьере: он работал над диссертацией и получил степень Ph.D в области физики² в Католическом университете, частично под руководством того же человека, который был руководителем Джона Уиллера, Карла Херцфельда. От Херцфельда Вебер узнал достаточно о физике атомов, молекул и излучения, чтобы в 1951 г. изобрести собственный вариант лазера, но у него не было тогда возможности для экспериментальной демонстрации своей концепции. Тогда же, когда Вебер опубликовал свое предложение, две другие исследовательские группы: одна в Колумбийском университете, возглавляемая Чарльзом Таунсом, а другая в Москве, под руководством Николая Геннадьевича Басова и Александра Михайловича Прохорова, независимо изобрели альтернативные варианты механизма и создали рабочие варианты лазеров.³ И хотя статья Вебера была первой публикацией по поводу механизма работы лазеров, он не получил никакого признания: Нобелевская премия и патенты ушли ученым Москвы и Колум-

² Доктор философии — аналог нашей ученой степени кандидат наук. [Прим. ред.]

³ В действительности эти лазеры давали сверхвысокочастотное излучение (коротковолновые радиоволны), а не свет и назывались поэтому не «лазеры», а «мазеры». «Настоящие» лазеры, которые излучают свет, будут успешно сконструированы несколькими годами позже.

10. Рябь кривизны

бии⁴. Разочарованный, но сохранивший дружеские отношения с Таунсом и Басовым, Вебер задумался о новом направлении исследований.

Как часть этих исследований Вебер провел год в группе Джона Уиллера, став специалистом в области общей теории относительности и сделав вместе с Уиллером теоретические исследования о свойствах гравитационных волн, следующих из этой теории. К 1957 г. он нашел свое новое направление. Он начал разворачивать первую в мире программу детектирования и слежения за гравитационными волнами.

В конце 1957, весь 1958 и начало 1959 г. Вебер пытался изобрести различные схемы детектирования гравитационных волн. Это были упражнения ума с помощью карандаша и бумаги, а не экспериментальные усилия. Он заполнил идеями, возможными конструкциями детектора и вычислениями четыре 300-страничные тетради. Одна за другой идея отставлялась как бесперспективная. Одна конструкция за другой оказывалась малочувствительной. Но некоторые все-таки оставляли надежду, и из них Вебер в конце концов выбрал конструкцию, основанную на цилиндрической алюминиевой болванке, длиной около 2 метров, диаметром в полметра, весящей 1 тонну, ориентированную широкой частью к приходящей волне (рис. 10.4).

Приливные силы гравитационных волн будут сначала сжимать, потом растягивать, затем снова сжимать концы такой болванки. Болванка имеет собственную моду колебаний⁵, которая может резонансным образом откликаться на эту осциллирующую приливную силу, моду, у которой концы болванки вибрируют относительно ее центра. Эта собственная мода, как звон колокольчика, настроенного камертона или винного бокала, имеет хорошо определенную частоту, так же как определенную частоту имеет колокольчик, камертон или винный бокал. Так же как колокольчик, камертон и бокал можно заставить откликаться в унисон звуковым волнам, соответствующим их собственной частоте, болванка может вибрировать в унисон с колебаниями приливной силы, имеющими частоту, равную частоте собственной моды. Чтобы использовать подобный твердотельный гравитационно-волновой детектор, нужно подстроить его размер под собственную частоту, соответствующую частоте приходящих гравитационных волн.

Какие это могут быть частоты? В 1959 г., когда Вебер разворачивал свой проект, мало кто верил в черные дыры (глава 6), а те, кто верил, мало пока понимали их свойства. Никто и представить не мог, что черные дыры могут сталкиваться и сливаться, порождая рябь кривиз-

⁴ Округ Колумбия, США. [Прим. ред.]

⁵ Тип колебаний. [Прим. ред.]

ны пространства-времени с закодированной информацией об истории столкновений. Никто не мог дать предположительных указаний и на другие источники гравитационных волн.

Поэтому Вебер начинал свои усилия практически вслепую. Его единственной зацепкой была грубая (но правильная) оценка, что гравитационные волны, вероятно, должны иметь частоты, существенно ниже примерно 10000 Гц (10000 колебаний в секунду) — это соответствует частоте обращения объекта, движущегося со скоростью света (максимально возможной) около самой компактной разумной звезды по орбите, имеющей длину окружности близкую к критической. Таким образом, Вебер сконструировал самые лучшие, какие только мог, детекторы, имеющие резонансные частоты, лежащие ниже 10000 Гц, и надеялся, что Вселенная обеспечит волны на выбранной частоте. Ему повезло. Резонансные частоты его болванок были около 1000 Гц (1000 колебаний в секунду), и оказалось, что некоторые волны от сливающихся черных дыр должны колебаться как раз на этой частоте, так же как волны от взрывов сверхновых и сливающихся пар нейтронных звезд.

Наиболее сложным аспектом проекта Вебера было создание датчика для слежения за колебаниями твердотельных антенн. Эти вызванные гравитационными волнами колебания, как он ожидал, должны быть ничтожно малы, меньше размера ядра атома [но в 1960-х он еще не знал, насколько меньше: всего $10^{-21} \times$ (двухметровую длину болванок), т.е. согласно современным оценкам порядка 10^{-21} метра, что в миллион раз меньше диаметра атомного ядра]. Большинству физиков в конце 1950-х и в 1960-х измерение даже одной десятой диаметра атомного ядра казалось невозможным. Но не для Вебера. Он придумал датчик, который мог это сделать.

Датчик Вебера был основан на пьезоэлектрическом эффекте, благодаря которому в некоторых материалах (определенных кристаллах и специальной керамике) при их небольшом сжатии появляется на концах электрическое напряжение. Веберу хотелось бы сделать свою антенну из такого материала, но это было бы слишком дорого, поэтому он сделал лучшее, что мог: он сделал твердотельную антенну из алюминия, а затем приклеил пьезоэлектрические кристаллы вблизи середины антенны (рис. 10.4). При дрожании болванки ее поверхность сжимает и растягивает кристаллы. На каждом кристалле появляется переменное напряжение, и Вебер соединил последовательно кристаллы в одну электрическую цепь, так что их малые переменные напряжения складывались в большее напряжение, которое можно было зарегистрировать электронным образом, даже если колебания антенны составляли только одну десятую размера атомного ядра.



10.4. Джозеф Вебер демонстрирует пьезоэлектрические кристаллы, наклеенные около середины его алюминиевой твердотельной антенны (около 1973 г.). Гравитационные волны должны вызывать взаимные колебания концов болванки, и эти колебания должны сдавливать и растягивать кристаллы, так что они будут производить переменное напряжение, которое можно электронным образом зарегистрировать. [Фото Джеймса П. Блэра, предоставлено Национальным географическим обществом]

В начале 1960-х годов Вебер был одиночкой, единственным физиком-экспериментатором, занимающимся поиском гравитационных волн. Чувствуя горький привкус неудачного для него прошлого лазерного соревнования, он наслаждался этим одиночеством. Однако в 1970-х достигнутая им впечатляющая чувствительность и свидетельства того, что он, возможно, детектировал волны (оглядываясь назад, я убежден, что это не так), привлекли десятки других экспериментаторов, а в 1980-х уже более сотни талантливых экспериментаторов были вовлечены в соревнование с ним по превращению гравитационно-волновой астрономии в реальность.

* * *

Я впервые встретился с Вебером на противоположном от Монблана склоне Французских Альп летом 1963 г., через четыре года после

начала его проекта детектирования гравитационных волн. Я был тогда выпускником, только начавшим исследования в области теории относительности, и вместе с тридцатью пятью другими студентами со всего мира я приехал в Альпы на интенсивные занятия двухмесячной летней школы, в основном фокусирующиеся на вопросах релятивистской теории гравитации Эйнштейна. Нашими преподавателями были величайшие специалисты в области релятивистской теории — Джон Уиллер, Роджер Пенроуз, Чарльз Мизнер, Брюс де Витт, Джозеф Вебер и другие. Мы учились у них в ходе лекций и частных бесед, рядом со сверкающими снежными вершинами Агиль-де-Миди и Монблана, в окружении бриллиантово-зеленых лугов, на которых пасутся красивые коровы, рядом с живописной деревушкой Лезуш, расположенной на несколько сотен метров ниже у подножия холма, на котором располагалась наша школа.

В этой потрясающей обстановке Вебер читал лекции о гравитационных волнах и своем проекте их детектирования, а я заворожено слушал. Между лекциями я и Вебер беседовали о физике, о жизни, об альпинизме, и я почувствовал в нем родственную душу. Мы оба были одиночками, ни я, ни он не любили обстановку напряженного соревнования и напряженного совместного интеллектуального штурма. Мы оба предпочитали бороться с проблемой в одиночку, изредка обращаясь за советом и помощью к друзьям, но не соперничая с теми, кто хочет победить нас в области новых идей или открытий.

В течение следующих десятилетий, когда исследования черных дыр начали разогреваться и входить в свой Золотой век (Глава 7), я начал находить их во многом неприятными — слишком много напряжения, слишком много соревнования, слишком много рывков и наскоков. Поэтому я начал искать другую область исследований, где было бы больше места для моих локтей, к которой я мог бы приложить большую часть своих усилий, продолжая одновременно часть времени работать над черными дырами и другими проблемами. Стимулированный Вебером, я выбрал гравитационные волны.

Как и Вебер, я видел, что гравитационные волны как область исследований, являются ребенком с блестящим будущим. Вступая в эту область в пору ее детства, я мог получить удовольствие от ее развития, я мог бы заложить фундамент, на котором будут основываться потом другие, и я мог делать это, не чувствуя чужого дыхания за спиной, поскольку большинство других теоретиков-релятивистов тогда сфокусировались на черных дырах.

Веберу было нужно сначала заложить экспериментальные основы: изобретение, конструкция и постепенное улучшение детекторов. Мне

10. Рябь кривизны

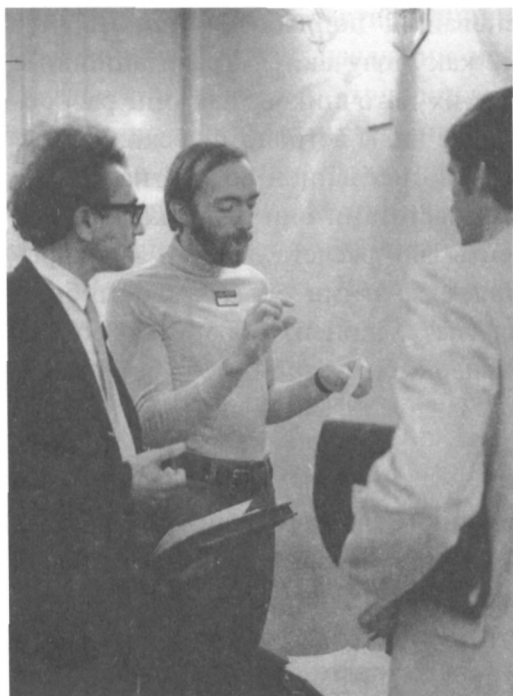
же нужны были теоретические основания: попробовать понять, что говорят законы Эйнштейна о том, как получаются гравитационные волны, какую отдачу вызывают они у их источников, как они распространяются; попытаться выяснить, какие виды астрономических объектов могут генерировать самые сильные во Вселенной волны, насколько сильными они могут быть и с какими частотами они будут колебаться; изобрести математические инструменты для расчета деталей закодированных в волнах симфоний, исполняемых этими объектами, чтобы к тому времени, когда Вебер или другие, наконец, обнаружат волны, можно было сравнить теорию с экспериментом.

* * *

В 1969 г. я провел по приглашению Зельдовича шесть недель в Москве. В один из дней Зельдович сделал перерыв в бомбардировке меня и других новыми идеями (главы 7 и 12) и отвез меня в Московский университет, чтобы представить молодому физику-экспериментатору Владимиру Брагинскому. Брагинский, стимулированный результатами Вебера, в течение нескольких лет занимался разработкой техники детектирования гравитационных волн: он был первым экспериментатором после Вебера, вступившим в эту область. Он также в это время проводил захватывающий эксперимент по поиску *кварков* (фундаментальных строительных блоков протонов и нейтронов) и эксперимент по проверке утверждения Эйнштейна, что все объекты, независимо от их природы и состава, падают в гравитационном поле с одним и тем же ускорением (утверждение, которое лежит в основе описания Эйнштейна гравитации как кривизны пространства).

Я был впечатлен. Брагинский был умен, глубок и имел великолепное чутье в физике; он был приветлив и открыт, мог также легко говорить о политике и о науке. Мы быстро стали близкими друзьями и научились уважать взгляды друг друга. Для меня, либерального демократа в американском спектре политических взглядов, свобода индивидуума была важнее всех других соображений. Ни одно правительство не должно иметь права диктовать кому-либо, как он должен жить. Для Брагинского, который был не доктринерским коммунистом, определяющей была ответственность индивидуума перед обществом. Мы отвечаем за своих собратьев и мы находимся в мире, где злодеи, такие как Иосиф Сталин, могут прийти к власти, если мы не будем бдительны.

Брагинский предвидел то, до чего не додумался больше никто. Во время нашей встречи в 1969 г., а затем снова в 1971 и 1972 гг. он



Слева: Джозеф Вебер, Кип Торн и Тони Тайсон на конференции по гравитационному излучению в Варшаве, Польша, сентябрь 1975 г. *Справа:* Владимир Брагинский и Кип Торн в Пасадене, Калифорния, октябрь 1984 г. [Слева: фото Марек Хольцмана, предоставлено Анджеем Траутманом; справа: предоставлено Валентином Н. Руденко]

предупреждал меня, что используемые для поиска гравитационных волн твердотельные антенны имеют фундаментальное предельное ограничение. Как он заявлял, это ограничение исходит из законов квантовой механики. Хотя обычно мы думаем о квантовой механике, как о чем-то, что управляет поведением крошечных объектов, таких как электроны, атомы и молекулы, если мы будем проводить достаточно точные измерения колебаний антенны в одну тонну, мы увидим, что эти колебания тоже ведут себя квантовомеханическим образом, и это квантовомеханическое поведение, в конечном счете, вызовет проблемы в детектировании гравитационных волн. Брагинский убедился в этом, проведя расчеты предельной чувствительности пьезоэлектрических кристаллов Вебера и некоторых других видов датчиков, которые можно было бы использовать для измерения колебаний твердотельных антенн.

Я не понимал, о чем говорит Брагинский, я не понимал его аргументов, не понимал его выводов и не понимал их важности и потому не обращал на это особого внимания. Мне казались гораздо более важными другие вещи, которым он меня учил: от него я узнал,

10. Рябь кривизны

как планировать эксперимент, как разрабатывается экспериментальная установка, как предсказать шум, который будет мешать работе установки, и как бороться с этим шумом, чтобы установка смогла выполнить свою задачу; а от меня Брагинский узнавал о том, как следует понимать законы гравитации Эйнштейна и как выделять их предсказания. Мы быстро становились единой командой, совместным проектом, в который каждый из нас вносил свой опыт и мастерство, и за истекшие два (уже больше трех. — *Прим. ред.*) десятилетия мы получили много удовольствия от совместной работы и сделали несколько открытий.

Каждый год в начале и середине 1970-х, когда мы виделись в Москве, Пасадене, Копенгагене или Риме, или где-то еще, Брагинский повторял свои предупреждения о квантовомеханической проблеме, подстерегающей детекторы на твердотельных антеннах, и все эти годы я не понимал. Его предупреждения были немного мутными, поскольку сам он полностью не понимал, почему это происходит. Однако в 1976 г., после того как Брагинский и, независимо, Робин Гиффард из Стэнфордского университета смогли сделать это предупреждение более ясным, я вдруг понял. Я, наконец, осознал, что предостережение было серьезным: предельная чувствительность твердотельного детектора серьезно ограничивается *принципом неопределенностей*.

* * *

Принцип неопределенностей является фундаментальной особенностью законов квантовой механики. Он утверждает, что если вы делаете очень точные измерения положения какого-то объекта, то в процессе измерения вы неизбежно толкаете объект, тем самым, случайным и непредсказуемым образом возмущая его скорость. Чем аккуратнее ваше измерение положения, тем сильнее и тем более непредсказуемо возмущается скорость объекта. Какой бы умный метод измерения положения вы не изобретали, вам не удастся обойти это ограничение природы (см. Врезку 10.2).

Врезка 10.2

Принцип неопределенностей и корпускулярно-волновой дуализм

Принцип неопределенностей тесно связан с корпускулярно-волновым дуализмом (Врезка 4.1), т. е. со свойством частиц вести себя иногда как волны, а иногда как частицы.

ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ И СКЛАДКИ ВРЕМЕНИ

Если вы измерите положение частицы (или любого другого объекта, например, торца болванки) и узнаете, что она находится в некоторой области в пределах погрешности измерения, то независимо от того, как волна, соответствующая частице, выглядела до этого, измерительный прибор во время измерения «пнет» волну и загонит ее в границы погрешности. Поэтому волна будет заключена в некоторой области, которая будет выглядеть примерно следующим образом:



Такая сосредоточенная волна содержит много длин волн, покрывающих интервал от размера области погрешности (помеченной сверху словом *макс*) до малого размера краев, в которых начинается и заканчивается волна (помечено словом *мин*). Более конкретно сосредоточенная волна может быть представлена в виде суммы или суперпозиции следующих волн колебаний, которые имеют длину волны, уменьшающуюся от макс до мин.

Вспомним теперь, что чем короче длина волны, тем больше энергия колебаний и поэтому тем больше скорость частицы. Поскольку измерение привело к тому, что волна теперь находится в некотором диапазоне длин волн, то энергия и скорость частицы теперь тоже находятся в некотором соответствующем диапазоне. Другими словами, энергия и скорость стали неопределенными.

$$\text{[Localized Wave Packet]} = \text{[Long Wavelength Wave]} + \text{[Medium Wavelength Wave]} + \text{[Short Wavelength Wave]} + \dots$$

Подведем итог. Измерение сосредоточивает волну частицы в границах погрешности (первая диаграмма сверху); это приводит к тому, что волна состоит теперь из многих волн в некотором диапазоне (вторая диаграмма); этот диапазон длин волн соответствует некоторому диапазону энергий и скоростей, поэтому скорость оказывается неопределенной. Как бы вы ни старались, вы не сможете избежать появления этой неопределенности скорости при измерении положения частицы. Более того, если более внимательно присмотреться к этой цепочке рассуждений, то можно увидеть, что она предсказывает, что чем точнее ваше измерение, т. е. чем уже границы погрешности, тем больше диапазон длин волн и скоростей и поэтому тем больше неопределенность скорости частицы.

Соотношение неопределенностей управляет не только измерениями микрообъектов, таких как электроны, атомы, и молекулы, но и измерением больших объектов. Однако поскольку большой объект имеет большую инерцию, пинок от измерения изменит его скорость

10. Рябь кривизны

на очень малую величину. (Возмущение скорости будет обратно пропорциональным массе объекта.)

Соотношение неопределенностей, приложенное к гравитационно-волновому детектору, говорит, что чем точнее сенсор измеряет положение торца или стороны дрожащей болванки, тем сильнее и случайный пинок по болванке, вызванный измерением.

В случае неточного сенсора пинок может быть малым и несущественным, но поскольку сам сенсор имеет плохую чувствительность, вы не сможете хорошо узнать амплитуду колебаний антенны и, таким образом, не сможете следить за слабыми гравитационными волнами.

В случае чрезвычайно точного сенсора пинок настолько силен, что он существенно изменит колебания болванки. Эти большие непредсказуемые изменения замаскируют эффект от любой гравитационной волны, которую вы попытаетесь обнаружить.

Где-нибудь между этими двумя крайностями находится оптимальная точность сенсора, такая, что его разрешение не настолько плохое, чтобы ничего нельзя было узнать, и не настолько хорошее, чтобы вызвать непредсказуемый сильный пинок. При этом оптимальном разрешении, которое теперь называют *стандартным квантовым пределом Брагинского*, эффект, оказываемый пинком на чувствительность, равен ограничению чувствительности датчика. Никакой датчик не может контролировать колебания антенны точнее, чем этот стандартный квантовый предел. Насколько велик этот предел? Для двухметровой антенны в одну тонну он примерно в 100000 раз меньше, чем размер атомного ядра.

В 1960-х никто серьезно не рассматривал потребность в таких точных измерениях, поскольку никто ясно не понимал, насколько слабы на самом деле гравитационные волны от черных дыр и других астрономических объектов. Но к середине 1970-х, подстрекаемые экспериментальным проектом Вебера, я и другие теоретики начали выяснять, насколько сильны могут быть самые сильные гравитационные волны. Ответ был 10^{-21} , и это означало, что гравитационные волны заставят 2-метровую болванку колебаться с амплитудой всего $10^{-21} \times (2 \text{ метра})$, или в миллион раз меньше диаметра атомного ядра. Если эти оценки были верны (а мы знали, что они были очень приблизительными), то сигнал гравитационной волны был бы *в десять раз меньше, чем стандартный квантовый предел Брагинского*, и поэтому, возможно, вообще не мог быть обнаружен с помощью твердотельного детектора и любого из известных видов датчиков.

Хотя это было весьма тревожно, не все еще было потеряно. Глубокая интуиция Брагинского подсказала ему, что если эксперимента-

торы будут особенно умны, они смогут обойти этот стандартный квантовый предел. Он спорил, что должен быть другой путь проектирования чувствительного датчика, такой, что непредсказуемый и неизбежный пинок не будет скрывать влияние гравитационных волн на антенну. Такой чувствительный датчик Брагинский назвал *квантово-неразрушающим*⁶: «квантово», потому что пинок датчика происходит согласно законам квантовой механики, «неразрушающим», потому что чувствительный датчик делается так, чтобы пинок не разрушал то, что вы хотите измерить — влияние гравитационных волн на твердотельный детектор. У Брагинского не было рабочей конструкции квантово-неразрушающего датчика, но его интуиция подсказывала ему, что такой детектор можно сделать.

На сей раз я слушал внимательно, и следующие два года моя группа в Калтехе и группа Брагинского в Москве пытались изобрести квантово-неразрушающий датчик.

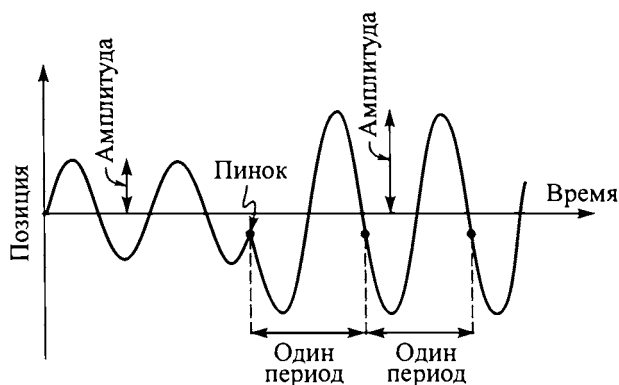
Мы нашли ответ одновременно осенью 1977 г., но пришли к нему разными путями. Я живо помню мое возбуждение, когда идея пришла ко мне и Карлтону Кейвсу⁷ во время интенсивного обсуждения за завтраком в Сальном (студенческий кафетерий Калтеха). И я помню то горько-сладкое чувство, когда узнал, что Брагинский, Юрий Воронцов и Фарид Халили в значительной части нашли ту же идею в Москве в то же самое время. Горькое, поскольку я испытываю великое удовлетворение, когда оказываюсь первым в открытии чего-то нового, сладкое, потому что мне настолько нравится Брагинский, что я испытываю удовольствие, разделяя с ним честь открытия.

Наша полная идея квантово-неразрушающего измерения довольно абстрактна и позволяет разработать разнообразные датчики, преодолевающие стандартный квантовый предел Брагинского. Абстрактность идеи, однако, делает ее довольно сложной для объяснения, поэтому здесь я опишу только один (не очень практичный) пример квантово-неразрушающего детектора⁸. Этот пример Брагинский назвал *стробоскопическим детектором*.

⁶ quantum nondemolition. Брагинский замечательно владеет нюансами английского языка, он может конструировать красноречивые английские фразы, описывающие новую идею, гораздо лучше, чем многие американцы или британцы.

⁷ Ключевые основы для нашей идеи были заложены нашим коллегой Уильямом Унру из Университета Британской Колумбии. Разработка идеи и ее следствий была выполнена мной вместе с Кейвсом и тремя другими коллегами, которые находились с нами за обеденным столом, когда пришла идея: Рональд Драйвер, Вернон Сандберг и Марк Циммерманн.

⁸ Полная идея описана в работах Caves et al. (1980) и Braginsky, Vorontsov and Thorne (1980).



10.5. Принципы, лежащие в основе стробоскопического квантово-неразрушающего измерения. По вертикали отложено положение торца колеблющейся болванки, по горизонтали — время. Если в момент времени, обозначенный как *пинок*, произвести очень точное и быстрое измерение положения, то в этот момент времени детектор, делающий измерение, передаст болванке резкий, неизвестный пинок, изменив, таким образом, амплитуду колебаний бруска непредсказуемым образом. Однако положение торца болванки не изменится точно через один период колебаний после пинка, через два или три. Это положение будет тем же, что и во время пинка, и не будет зависеть от величины пинка

Стробоскопический детектор основан на характерной особенности колебаний: если болванке дать очень резкий пинок неизвестной силы, то амплитуда колебаний изменится, но независимо от того, насколько изменится амплитуда, точно через один период колебаний после пинка колеблющийся торец болванки вернется к тому же самому положению, которое он имел в момент пинка (черные точки на рис. 10.5). По крайней мере, так будет, если гравитационная волна (или некоторая другая сила) в это время не сжимала и не растягивала болванку. Если же волна (или другая сила) в это время *все же* сжимала болванку, то положение болванки через один период изменится.

Чтобы обнаружить волну, в таком случае нужно делать датчик, который делает стробоскопические измерения колеблющихся торцов болванки, датчик, который очень быстро измеряет положение торцов болванки один раз за период колебаний. Такой датчик каждый раз во время измерения будет пинать болванку, но пинки не будут изменять положение торцов болванки в те моменты, когда производятся последовательные измерения. Если обнаружится, что положение изменилось, значит, на болванку действовала гравитационная волна (или некоторая другая сила).

Хотя квантово-неразрушающие датчики решили задачу стандартного квантового предела Брагинского, к середине 1980-х я стал довольно пессимистично оценивать перспективность и плодотворность гравитационно-волновой астрономии на основе твердотельных детекторов. Мой пессимизм был связан с двумя причинами.

Во-первых, хотя твердотельные детекторы, построенные Вебером, Брагинским и другими, достигли гораздо лучшей чувствительности, чем можно было даже мечтать в 1950-х, они все еще могли уверенно детектировать волны с амплитудой только 10^{-17} и более. Это было в 10000 раз меньше, чем требовалось для успеха, если я и другие правильно оценили амплитуду гравитационных волн, достигающих Земли. Само по себе это возражение еще не было серьезным, поскольку продвижение технологии часто приводило к 10000-кратному улучшению чувствительности инструментов в течение в двух десятилетий или даже быстрее. [Одним из примеров является угловое разрешение радиотелескопов, которое улучшилось с десятков градусов в середине 1940-х до нескольких угловых секунд в середине 1960-х (глава 9). Другим примером может служить чувствительность астрономических детекторов рентгеновского излучения, которая выросла в 10^{10} раз между 1958 и 1978 гг., т. е. улучшалась со средним темпом 10000 раз каждые восемь лет (глава 8).] Однако темп улучшения чувствительности твердотельных антенн был столь медленным, а перспективы развития техники и технологии в этой области были настолько умеренными, что не было видно никакой разумной возможности достичь 10000-кратного роста чувствительности в обозримом будущем. Таким образом, оставалось рассчитывать только на гравитационные волны, гораздо более сильные, чем оценка 10^{-21} — возможность реальная, но вряд ли кто-нибудь был счастлив, на нее полагаясь.

Во-вторых, даже если бы твердотельные антенны смогли обнаружить гравитационные волны, с помощью них было бы невероятно трудно раскодировать переносимые волнами сигналы симфоний, фактически, им бы это сделать не удалось. Причина была проста: так же как камертон или бокал откликаются в унисон только на звук, частота которого близка к его собственной частоте, так и болванка откликается только на гравитационные волны, частота которых находится около ее собственной частоты. Говоря на техническом языке, твердотельный детектор является *узкополосным* (слово *полоса* здесь означает диапазон частот, на которые откликается детектор). Но информация о симфониях слияния должна обычно кодироваться в очень широкой полосе частот. Чтобы выделить эту информацию, потребовалось бы

10. Рябь кривизны

создать «ксилофон» из многих болванок, каждая из которых покрывает свой крошечный интервал частот сигнала. Сколько твердотельных детекторов потребуется для такого ксилофона? Для того типа антенн, которые тогда разрабатывались и строились, — несколько тысяч — слишком много, чтобы такое решение было практичным. В принципе, существовала возможность расширить частотный диапазон таких детекторов и обойтись, тем самым, скажем, десятком болванок, но это потребовало бы куда большего прогресса в технике, чем даже достижение чувствительности в 10^{-21} .

Хотя в 1980-х я воздерживался от публичных высказываний, отражающих мой пессимистичный взгляд, сам я рассматривал ситуацию как трагичную, поскольку Вебером, Брагинским и многими моими другими друзьями было вложено в твердотельные детекторы так много усилий, а также потому, что я был убежден, что гравитационное излучение потенциально может перевернуть наши представления о Вселенной.

LIGO

Чтобы понять, к какому перевороту может привести детектирование и дешифровка гравитационных волн, вспомним детали предыдущих переворотов: тех, которые были вызваны развитием рентгеновских и радиотелескопов (главы 8 и 9).

В 1930-х, до появления радиоастрономии и рентгеновской астрономии, наши знания о Вселенной появлялись почти исключительно благодаря свету. Свет показывал нам тихую и статичную Вселенную, в которой доминировали звезды и планеты, мирно передвигающиеся по своим орбитам и светящие ровным светом, Вселенную, в которой на изменения требуются миллионы и миллиарды лет.

Это представление о спокойной Вселенной вдребезги разбилось в 1950-х, 1960-х и 1970-х, когда радиоволны и рентгеновские лучи показали нам бурную сторону нашей Вселенной: струи, извергаемые из галактических ядер, квазары с меняющейся яркостью, более яркие, чем наша галактика, пульсары с мощными лучами, бьющими из поверхности и вращающимися с высокой скоростью. Самые яркие объекты, наблюдаемые в оптические телескопы, — это Солнце, планеты и несколько ближайших статичных звезд. Самыми яркими объектами, видимыми с помощью радиотелескопов, являются мощные взрывы в ядрах удаленных галактик, обеспечиваемые энергией (вероятно) гигантских черных дыр. Самыми яркими объектами для рентгеновских телескопов являются малые черные дыры и нейтронные звезды, отбрасывающие горячий газ у своих компаньонов в двойной системе.

Что такого особенного в радиоволнах и рентгеновских лучах, что позволило им совершить такой впечатляющий переворот? Ключевым является то, что они обеспечили нас совершенно другим видом информации, чем та, которую приносит свет: свет с длиной волны в полмикрона излучается в первую очередь атомами, находящимися в атмосферах звезд и планет, и поэтому рассказывает нам об этих атмосферах. Радиоволны, имеющие в 10 миллионов раз большую длину волны, излучаются в основном электронами, обращающимися по спиралям с околосветовыми скоростями в магнитных полях, и поэтому сообщают нам о замагниченных струях, извергаемых из ядер галактик, о гигантских магнитных межгалактических лепестках, созданных струями и о магнитных лучах пульсаров. Рентгеновские лучи, имеющие длины волн в тысячи раз более короткие, чем свет, излучаются в основном электронами сверхгорячего газа, падающего на черные дыры и нейтронные звезды, и поэтому говорят нам непосредственно об аккрецирующем газе и косвенно о черных дырах и нейтронных звездах.

Разница между светом, с одной стороны, и радиоволнами и рентгеновскими лучами меркнет по сравнению с отличиями между электромагнитными волнами (видимым, инфракрасным, ультрафиолетовым светом, радиоволнами, рентгеновскими и гамма-лучами) современной астрономии и гравитационными волнами. Соответственно, гравитационные волны должны привести к революции в нашем понимании Вселенной даже большей, чем совершили радиоволны и рентгеновские лучи. Среди отличий между электромагнитными и гравитационными волнами и их следствиями можно отметить следующие⁹:

- Гравитационные волны должны сильнее всего излучаться крупномасштабными когерентными колебаниями кривизны пространства-времени (например, в результате столкновения и слияния двух черных дыр) и крупномасштабными перемещениями гигантских объемов материи (например, при схлопывании ядра звезды, вызывающим образование сверхновой, или при сближении по спирали двух обращающихся вокруг друг друга нейтронных звезд). Поэтому гравитационные волны должны показать нам движения гигантских масс и гигантские кривизны. В отличие от этого, космические электромагнитные волны обычно излучаются по отдельности, огромным числом отдельных и независимых

⁹ Эти отличия, их следствия и ожидаемые особенности гравитационных волн, приходящих от разных астрофизических источников, были выяснены в результате работы множества теоретиков, в их числе Тибо Дамур из Парижа, Леонид Гришук из Москвы, Такаши Намура из Киото, Бернард Шуц из Уэльса, Стюарт Шапиро из Итаки, штат Нью-Йорк, Клиффорд Уилл из Сент-Луиса и я сам.

10. Рябь кривизны

атомов или электронов, и эти отдельные электромагнитные волны, каждая из которых колеблется немного иначе, затем накладываются друг на друга, образуя суммарную волну, которую и наблюдают астрономы. В результате, в первую очередь мы узнаем от электромагнитных волн о температуре, плотности и магнитных полях, под действием которых находятся излучающие атомы и электроны.

- Гравитационные волны сильнее всего излучаются областями пространства с такой сильной гравитацией, что в них не работает описание Ньютона, которое поэтому должно быть заменено описанием Эйнштейна, т. е. областями, в которых движутся, колеблются и сворачиваются с околосветовыми скоростями гигантские объемы материи и пространственно-временной кривизны. Примерами могут служить Большой взрыв, породивший нашу Вселенную, столкновения черных дыр и пульсации новообразованных нейтронных звезд в центре взрывов сверхновых. Поскольку эти области сильной гравитации обычно окружены плотными слоями вещества, поглощающего электромагнитные волны (но не поглощающего гравитационные), области с сильной гравитацией не могут нам их посылать. Электромагнитные волны, которые видят астрономы, следовательно, почти полностью приходят из областей со слабой гравитацией, где скорости невелики, например, с поверхностей звезд и сверхновых.

Эти отличия предполагают, что те объекты, симфонии которых нам хотелось бы изучить с помощью гравитационно-волновых детекторов, будут практически не видны в видимом свете, радиоволнах и рентгене, а объекты, которые астрономы изучают сейчас в световом, рентгеновском и радиодиапазонах, будут почти не видны с помощью гравитационных волн. Гравитационная Вселенная должна выглядеть абсолютно не так, как выглядит электромагнитная Вселенная; гравитационные волны должны научить нас тому, что мы никогда не узнаем от волн электромагнитных. Именно поэтому гравитационные волны должны вызвать революцию в наших представлениях о Вселенной.

Можно оспорить это утверждение, сославшись на то, что наше теперешнее, основанное на электромагнитных волнах понимание Вселенной настолько полнее того, что у нас было в 1930-х, что гравитационно-волновая революция не будет такой впечатляющей, как переворот, вызванный радио и рентгеновскими волнами.

Мне это кажется сомнительным. Я болезненно чувствую недостаточность нашего понимания, когда оцениваю печальное состояние сегодняшних оценок силы гравитационных волн, в которых купается

Земля. Для каждого типа гравитационно-волновых источника, который когда-либо предлагался, за исключением, разве, слияния обычных двойных звезд, либо при заданном расстоянии сила гравитационного излучения имеет неопределенность на несколько порядков, либо также на несколько порядков различаются оценки частоты встречаемости таких источников (а тем самым, и возможное расстояние до ближайшего из них). Часто неопределенной является даже сама возможность существования таких источников.

Эти неопределенности вызывают значительные неудобства при планировании и разработке гравитационно-волновых детекторов. Это отрицательная сторона. Положительная сторона заключается в том, что когда гравитационные волны, наконец, будут обнаружены и изучены, мы, может быть, будем вознаграждены многими сюрпризами.

* * *

В 1976 г. я еще не был так пессимистически настроен по поводу твердотельных детекторов. Наоборот, я был в высшей степени оптимистичен. Первое поколение детекторов недавно дало первые результаты и имело чувствительность, которая была замечательно хорошей по сравнению с тем, что можно было раньше предполагать. Брагинский и другие изобрели множество умных и обещающих идей для колоссального улучшения в будущем, а я, как и многие другие, только начинал понимать, что гравитационным волнам предстоит сделать революцию в нашем понимании Вселенной.

Мой энтузиазм и оптимизм вел меня, когда я боролся с собой одним ноябрьским вечером 1976 г., до поздней ночи бродил по улицам Пасадены, раздумывая, стоит ли предлагать Калтеху создание проекта детектирования гравитационных волн. Аргументы «за» были очевидны: для науки в целом — огромный интеллектуальный прорыв, если проект оказывается удачным; для Калтеха — возможность оказаться у основания захватывающего нового поля деятельности; для меня — возможность иметь рядом, в моем собственном институте, команду экспериментаторов, с которой я бы мог взаимодействовать, не полагаясь только на Брагинского и его команду на другом конце света, а также возможность играть более важную роль (а тем самым, и возможность получать большее удовольствие), чем я это мог себе позволить, общаясь в Москве. Аргументы «против» были также очевидны: этот проект был рискованным, для его успеха потребовались бы огромные вложения со стороны Калтеха и Национального научного фонда США, а также грандиозные затраты времени и энергии от меня

10. Рябь кривизны

и других участников, и после всего этого он все равно мог провалиться. Эта затея была гораздо более рискованной, чем вхождение Калтеха в радиоастрономию двадцать три года назад (глава 9).

После многих часов самоанализа приманки преимуществ надо мной победили. А после нескольких месяцев изучения всех рисков и преимуществ факультет астрономии и физики Калтеха и администрация единогласно одобрили мое предложение при условии выполнения двух задач. Мы должны были найти выдающегося физика-экспериментатора, который мог бы возглавить проект, и этот проект должен быть достаточно большим и сильным, чтобы иметь хорошие шансы на успех. Это означало, как мы полагали, что проект должен был быть много большим и сильным, чем усилия Вебера в Мэрилендском университете, усилия Брагинского в Москве и любые другие разворачивавшиеся в то время попытки.

Первый шаг состоял в поиске руководителя. Я полетел в Москву, чтобы попросить совета у Брагинского и прощупать его на предмет занятия этого поста. Мои прощупывания привели к сильнейшим колебаниям. Он разрывался между возможностью работать с гораздо лучшими технологическими возможностями, которые он имел бы в Америке и гораздо лучшим мастерством техников в Москве (например, изощренное стеклодувное дело было почти утеряно в Америке, но не в Москве). Он разрывался между необходимостью строить проект с нуля в Америке и идиотскими препятствиями, которые ставила неэффективная бюрократическая система на пути его собственного проекта в Москве. Он разрывался между лояльностью к своей родной стране и отвращением к ее недостаткам, между чувством, что Америка является варварской страной, вследствие нашего отношения к бедным и к всеобщему медицинскому обслуживанию, и пониманием того, что жизнь в его стране является скудной из-за некомпетентности чиновников. Он разрывался между дружбой и богатством в Америке и боязнью мести КГБ, которая грозила его семье, друзьям и, возможно, ему самому, если бы он «дезертировал». В конце концов, он ответил отказом и рекомендовал Рональда Дривера из Университета Глазго.

Другие, с кем я консультировался, также с энтузиазмом отзывались о Дривере. Как и Брагинский, он был в высшей степени креативен, изобретателен и осторожен, т. е. обладал многими качествами, необходимыми для успеха проекта. Руководство факультета и Калтеха собралось о нем и о других возможных руководителях всю возможную информацию, выбрало Дривера и пригласило его на факультет, чтобы инициировать проект. Как и Брагинский, Дривер колебался, но, в конце концов, сказал «да». Начало было положено.

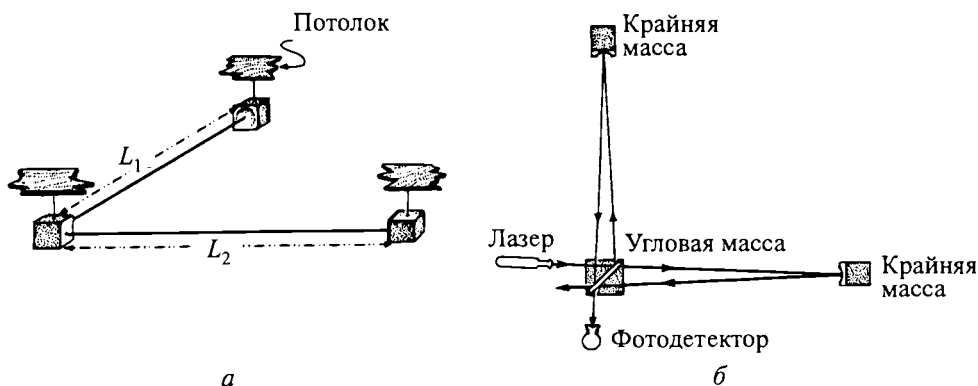
Предлагая проект, я предполагал, что, так же как Вебер и Брагинский, Калтех сосредоточится на строительстве твердотельных детекторов. К счастью (оглядываясь назад), Драйвер настоял на радикально другом направлении. В Глазго он в течение пяти лет работал над твердотельными детекторами и мог поэтому ясно оценивать их ограничения. Он считал, что гораздо более обещающими были *интерферометрические* гравитационно-волновые детекторы (для краткости *интерферометры*, хотя они совершенно отличаются от радиоинтерферометров, описанных в главе 9).

Использовать для детектирования гравитационных волн интерферометры в простейшей форме предложили в 1962 г. два русских друга Брагинского (Михаил Герценштейн и Владислав Пустовойт) и независимо в 1964 г. Джозеф Вебер. В 1969 г. Райнер Вайс, не знавший об этих ранних предложениях, разработал более совершенную схему интерферометрического детектора и в 1970 г. начал вместе со своей группой в Массачусеттском технологическом институте (MIT) разрабатывать и строить такой детектор. Такой же проект начал в Малибу, в Калифорнии, Роберт Форвард с коллегами из Исследовательской лаборатории Хьюза. Детектор Форварда был первым заработавшим. К концу 1970-х интерферометрические детекторы стали серьезной альтернативой твердотельным детекторам. Драйвер добавил к их конструкции свои собственные хитроумные разработки.

* * *

На рис. 10.6 показана главная идея интерферометрического гравитационно-волнового детектора. К потолку на краях и в углу L -образного интерферометра подвешены на струнах три массы (рис 10.6а). Когда в лабораторию сверху или снизу приходит первый максимум гравитационной волны, его приливные волны должны раздвинуть массы в одном плече буквы « L » и одновременно сдвинуть их вдоль другого плеча. В результате этого длина первого плеча L_1 (т. е. расстояние между двумя его массами) увеличится, а длина второго плеча L_2 уменьшится. Следя за изменением разности $L_1 - L_2$ можно искать гравитационные волны.

Слежение за величиной $L_1 - L_2$ производится интерферометрическим образом (рис. 10.6б и Врезка 10.3). Лазерный луч светит на *расщепитель пучка*, который закреплен на угловой массе. Расщепитель половину луча отражает, а половину пропускает, расщепляя, таким образом, луч на два. Два луча направляются по двум плечам к крайним массам, отражаются от находящихся на них зеркал и затем возвращаются на расщепитель пучка. Делитель наполовину отражает и наполо-



10.6. Лазерный интерферометрический гравитационно-волновой детектор. Этот инструмент очень похож на тот, который использовали Майкельсон и Морли в 1887 г. для поиска движения Земли относительно эфира (глава 1). Детальное описание см. в тексте

вину пропускает каждый из лучей, так что часть одного луча соединяется с частью другого луча и светит в сторону лазера, а другие части лучей, соединившись, падают на фотодетектор. Если гравитационных волн нет, вклады двух плечей интерферируют таким образом (Врезка 10.3), что весь свет из интерферометра возвращается по направлению к лазеру, а на фотодетектор не попадает ничего. Если гравитационная волна изменит немного величину $L_1 - L_2$, то два луча в двух плечах будут путешествовать на немного изменившиеся расстояния и будут интерферировать немного по-другому — крошечная часть их общего света теперь пойдет к фотодетектору. Следя за количеством света, приходящего на фотодетектор, можно следить за изменением разницы между L_1 и L_2 и, таким образом, регистрировать гравитационные волны.

* * *

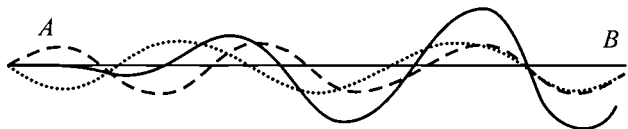
Интересно сравнить твердотельный детектор и интерферометр. Твердотельный детектор использует для слежения за приливными силами гравитационных волн колебания отдельного твердотельного цилиндра. Интерферометрический детектор использует для слежения за приливными силами относительные движения масс, подвешенных на струнах.

Врезка 10.3

Интерферометры и интерферометрия

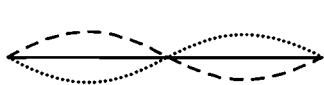
Если в одной и той же области пространства распространяются две или больше волны, они «линейно» (Врезка 10.1) накладываются

друг на друга, т. е. они попросту складываются. Например, следующие волны, показанные пунктирной и штриховой линиями, накладываются друг на друга, образуя волну, показанную сплошной линией.



Обратите внимание на места, подобные обозначенному буквой *A*, где провал одной (пунктирной) накладывается на гребень другой (штриховой) волны, по крайней мере частично, и образуют исчезающее малую суммарную волну (сплошная линия), а также на места, где, как в *B*, складываются два провала и волны усиливают друг друга. Говорят, что в первом случае имеет место деструктивная *интерференция*, а во втором — конструктивная. Такие наложения с интерференцией возможны для любых типов волн: морских, радио, световых, гравитационных, и такая интерференция играет ключевую роль в работе радиоинтерферометров (глава 9) и интерферометрических детекторов гравитационных волн.

В интерферометрическом детекторе на рис. 10.6б расщепитель луча накладывает половину луча из одного плеча на половину луча из другого плеча и направляет их к лазеру, а также складывает другие половины лучей и посылает их на фотодетектор. Если никакая гравитационная волна или другая сила не двигала массы и зеркала на них, то световые волны будут иметь вид, как на следующих рисунках, где штриховой линией показана волна из первого плеча, пунктирной — из другого, а сплошная линия изображает суммарную полную волну.

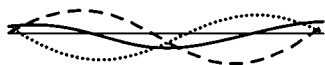


К фотодетектору

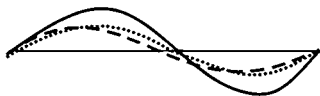


К лазеру

Направляемые к фотодетектору волны интерферируют деструктивно, поэтому полная суммарная волна исчезает, что означает, что детектор вообще не видит никакого света. Если гравитационная волна или какая-либо другая сила немного удлиняет одно плечо и укорачивает другое, то волны из одного плеча приходят на расщепитель луча с небольшой задержкой по отношению к волнам из другого плеча, и наложение имеет следующий вид:



К фотодетектору



К лазеру

Деструктивная интерференция в направлении фотодетектора теперь уже не идеальная, и фотодетектор получает немного света. Количество света, которое он получает, пропорционально разнице длин $L_1 - L_2$, которая, в свою очередь, пропорциональна гравитационно-волновому сигналу.

10. Рябь кривизны

Твердотельный детектор использует для слежения за колебаниями, вызванными волнами, электрический датчик (например, сжимаемый болванкой пьезокристалл). Интерферометрический детектор для слежения за вызванным волной движением своих масс использует интерференцию световых волн.

Болванка откликается в унисон только на гравитационные волны в узком частотном диапазоне, и поэтому для декодирования симфонии волн требуется ксилофон из многих болванок. Массы интерферометра болтаются свободно и откликаются на волны всех частот, больших чем примерно одно колебание в секунду¹⁰, и поэтому интерферометр имеет широкую полосу: чтобы расшифровать всю симфонию достаточно трех-четырех детекторов.

Сделав плечи интерферометров в тысячи раз длиннее, чем болванки (несколько километров вместо единиц метров), можно сделать приливные силы волн в тысячу раз большими, тем самым улучшив в тысячу раз чувствительность инструмента¹¹. В отличие от этого длину болванки нельзя сильно увеличить. Болванка длиной в 1 километр будет иметь собственную частоту меньше, чем одно колебание в секунду, и поэтому не сможет работать на частотах, на которых находятся, как мы считаем, наиболее интересные источники. Более того, чтобы работать на таких низких частотах, для защиты твердотельной антенны от колебаний земной поверхности и флуктуаций гравитации земной атмосферы пришлось бы запустить такую болванку в космос, что было бы бессмысленно дорогим удовольствием.

Поскольку интерферометр в тысячу раз длиннее твердотельной антенны, он также в тысячу раз менее чувствителен к «пинку», производимому процессом измерения. Эта нечувствительность означает, что интерферометрам не нужно избегать с помощью сложных в конструировании квантово-неразрушающих датчиков¹².

Если у интерферометров столько больших преимуществ перед твердотельными детекторами (гораздо большая полоса частот и гораздо лучшая чувствительность), почему же Брагинский, Вебер и другие не делали интерферометры? Когда я спросил об этом в середине 1970-х

¹⁰Отклику на частотах более низких, чем 1 колебание в секунду, мешают струны, на которых подвешены массы. Они не позволяют массам свободно двигаться в ответ на такие низкочастотные волны.

¹¹ На самом деле улучшение чувствительности происходит не таким прямым образом, и достичь такой предельной чувствительности гораздо сложнее, чем сказано, но все же приведенное описание в общих чертах верно.

¹² Прогресс в развитии интерференционных детекторов за истекшие 12 лет привел к тому, что и этот тысячекратный запас оказался исчерпанным, и в настоящее время активно разрабатываются схемы квантово-невозмущающих датчиков для следующего поколения гравитационно-волновых антенн. [*Прим. ред.*]

Брагинского, он ответил, что твердотельные детекторы просты, а интерферометры пугающе сложны. Маленькая сплоченная команда, такая как у него была в Москве, имела некоторый шанс сделать хорошо работающую твердотельную антенну и открыть гравитационные волны. Однако для разработки, отладки и успешной работы интерферометрического детектора требовалась гигантская команда и огромное количество денег. И даже при наличии такой гигантской команды и при таких огромных вложениях Брагинский сомневался в конечном успехе создания столь сложного детектора.

Десятью годами позже, когда накопилось достаточно свидетельств тому, что твердотельные детекторы не смогут достичь чувствительности 10^{-21} , Брагинский посетил Калтех и был потрясен прогрессом, достигнутым с интерферометром командой Дривера. Он пришел к выводу, что, в конечном счете, с помощью интерферометров можно будет добиться успеха. Но огромная команда и большие денежные затраты были не для него, поэтому, вернувшись в Москву, он перенаправил большую часть работы своей команды на другие направления, далекие от детектирования гравитационных волн¹³. (В других лабораториях в мире твердотельные антенны продолжали строить, и это очень хорошо, поскольку они дешевы по сравнению с интерферометрами, пока еще более чувствительны¹⁴ и в долговременной перспективе могут сыграть свою роль на более высоких частотах.)

* * *

В чем состоит сложность интерферометрических детекторов? Ведь основная идея, описанная на рис. 10.6, выглядит довольно просто.

На самом деле рис. 10.6 является чрезмерным упрощением, поскольку игнорирует огромное количество возникающих препятствий. Трюки, к которым приходится прибегать, для того чтобы их обойти,

¹³ Через некоторое время команда Брагинского снова вернулась в эту область, когда стало ясно, что даже гигантских усилий Калтеха и финансов Национального научного фонда США недостаточно для решения всех множавшихся сложных проблем, встающих в процессе разработки и разворачивания полномасштабных гравитационных антенн. Была образована международная научная коллаборация LIGO (LIGO Scientific Collaboration) для координации усилий всех научных коллективов, работающих в этой области.

Московская группа под руководством член-корреспондента Российской академии наук В.Б.Брагинского внесла большой вклад в решение ряда важных задач в проекте (совершенствование подвеса пробных масс, исследование механических шумов, разработка новых методов квантово-неразрушающих измерений). Кроме того, это сотрудничество помогло научной группе выжить в трудные для отечественной науки годы. См. также примечание самого К.Торна далее. [*Прим. ред.*]

¹⁴ Сейчас, в 2005 г., после запуска двух 4-км антенн LIGO в США, 3-км антенны VIRGO в Италии, 600-метровой GEO в Германии и 300-метровой ТАМА в Японии это уже не так, и сравнение получается явно не в пользу детекторов на болванках. [*Прим. ред.*]

10. Рябь кривизны

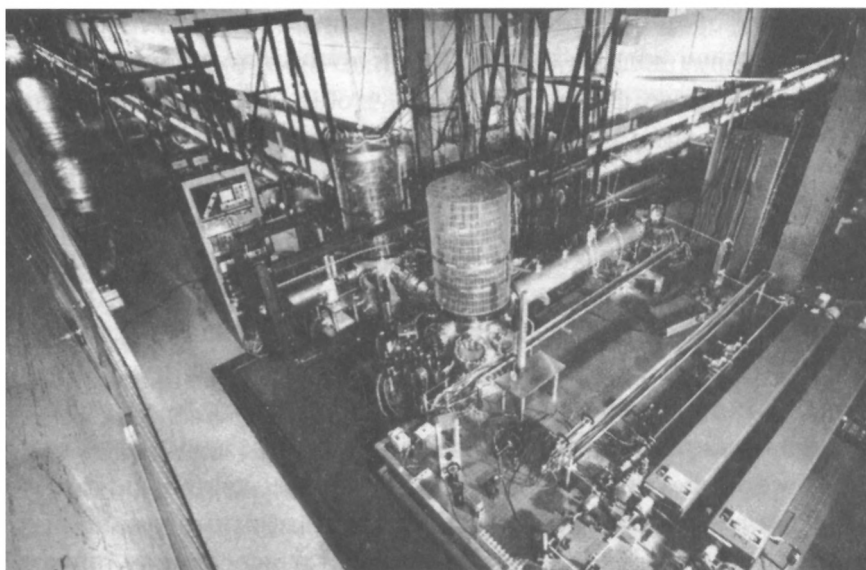
делают интерферометр чрезвычайно сложным инструментом. Например, лазерный луч должен быть нацелен точно в нужном направлении, иметь точно нужную форму и частоту, чтобы идеально согласовываться с интерферометром, а его мощность и частота не должны флуктуировать. После того как луч расщепляется на два, эти два луча должны бегать в плечах интерферометра не просто туда и обратно, как на рис. 10.6, а многократно, чтобы увеличить чувствительность к движениям масс, а после этих многократных отражений они должны точно встретиться опять на делителе. За каждой массой надо постоянно следить, чтобы ее зеркала были все время направлены в нужном направлении и не отклонялись из-за колебаний пола, и это нужно делать так, чтобы не замаскировать действие гравитационных волн. Чтобы достичь идеальной работы этих и многих-многих других составляющих, требуется постоянное одновременное слежение за многими разными частями интерферометра и его лазерными лучами и постоянное приложение сил обратной связи, поддерживающих идеальный режим.

Некоторое представление о сложности интерферометра можно получить по фотографии (рис. 10.7) 40-метрового *прототипа* интерферометрического детектора, который построили в Калтехе Драйвер и его команда — прототипа, который сам по себе гораздо проще, чем полномасштабный многокилометровый интерферометр, требуемый для достижения успеха.

* * *

В начале 1980-х четыре команды физиков-экспериментаторов трудились над разработкой инструментария и техники интерферометрических детекторов: команда Драйвера в Калтехе, команду, которую он основал в Глазго (теперь руководимая Джимом Хафом), команда Райнера Вайса в МИТ и команда, основанная Гансом Биллингом в Институте Макса Планка под Мюнхеном, в Германии. Это были маленькие и сплоченные команды, работающие более или менее независимо¹⁵, исповедующие свои собственные подходы к конструированию интерферометрических детекторов. В каждой команде отдельные ученые имели свободу в разработке и воплощении по собственному усмотрению новых идей, координация была очень незначительна. Это как раз тот тип работы, который нравится таким креативным ученым, как Брагинский, и та культура, в которой счастливее всего чувствуют себя такие одиночки, как я. Но это не та культура, которая

¹⁵ Хотя через Драйвера поддерживалась тесная связь между командами Глазго и Калтехе.



- 10.7. 40-метровый прототип интерферометрического гравитационно-волнового детектора, построенный в Калтехе (около 1989 г.). Стол впереди и передняя, заключенная в сетку вакуумная камера содержат лазеры и компоненты для подготовки лазерного луча к попаданию в интерферометр. Центральная масса также располагается во второй, закрытой сеткой вакуумной камере, над которой можно заметить свешивающуюся веревку от блока. Крайние массы находятся на удалении 40 метров в конце двух коридоров. Два луча плечей интерферометра проходят внутри толстых труб, которые тянутся на всю длину коридоров. [Предоставлено проектом LIGO, Калифорнийский технологический институт]

требовалась для разработки, создания, отладки и работы таких больших и сложных научных инструментов, какими являются многокилометровые интерферометры, требующиеся для успеха.

Для детальной разработки многих сложных частей такого интерферометра, для того чтобы соединить их все и добиться правильной совместной работы, чтобы держать под контролем затраты проекта и добиться его завершения в разумные сроки, нужна была совсем другая культура — культура плотной координации работы подгрупп в рамках каждой команды, с фокусированием каждой команды на четко определенных задачах, с единым руководителем, принимающим решения о том, что и кому нужно делать в первую очередь.

Путь от независимости и свободы к тесной координации является болезненным. Таким путем, сопровождаемым в процессе мучительными стонами, движется биологическое сообщество, расшифровывающее геном. И мы, гравитационно-волновые физики, следуем по этому пути с не меньшей болью и страданиями с 1984 г. Я, однако, уверен, что волнения, радость и научная отдача от детектирования гравитаци-

10. Рябь кривизны

онных волн и дешифровки их симфоний когда-нибудь сотрут из нашей памяти все пережитые страдания и боль.

Первым резким поворотом на нашем болезненном пути был вынужденный союз почти под дулом пистолета команд Калтеха и МІТ, каждая из которых состояла к тому времени примерно из 8 человек. Держал пистолет и требовал Ричард Айзексон из Национального научного фонда (NSF) США. Брак, в котором Калтех и МІТ должны были вместе разрабатывать интерферометр, был платой за финансовую поддержку на деньги налогоплательщиков. Драйвер (бешено сопротивлявшийся) и Вайс (с готовностью принявший неизбежность) принесли свои клятвы, а я стал советником этого союза, человеком, чьи обязанности заключались в том, чтобы искать компромисс, когда Драйвер тянул в одном направлении, а Вайс — в другом. Это был тернистый союз, эмоционально истощающий всех, но постепенно мы стали работать вместе.

Второй резкий поворот произошел в ноябре 1986 г. Комитет, состоящий из выдающихся физиков-специалистов в тех областях технологии, которые нами использовались, и экспертов по организации и менеджменту больших научных проектов, скрупулезно изучил наши достижения и планы и доложил о них NSF. Наш прогресс был высоко оценен, высокой оценки заслужили также наши планы и перспективы на успех в детектировании и расшифровке гравитационных волн. Однако наша культура работы была признана ужасной, мы все еще были тесно привязаны к свободолобивой культуре, в которой родились, а таким образом мы никогда не смогли бы добиться успеха — такое решение было доложено NSF. Тройка Драйвер–Вайс–Торн должна была быть по решению комитета заменена единственным директором, который бы спаял талантливых индивидуалов в сплоченную и эффективную команду и мог бы организовать проект, принимая твердые и мудрые решения на каждой крупной развилке.

Опять появилось дуло пистолета. Если вы хотите, чтобы проект продолжался, сообщил нам Айзексон из NSF, вы должны найти такого директора и учиться работать с ним так же, как футбольная команда работает с великим тренером или как оркестр с великим дирижером.

Нам повезло. В середине нашего поиска был уволен Робби Вогт.

Вогт — блестящий физик-экспериментатор, обладающий волевым характером. Он возглавлял проекты создания и управления научными приборами космических аппаратов, руководил созданием гигантского астрономического интерферометра миллиметрового диапазона и реорганизовал структуру научных исследований в Лаборатории реактивного



Часть ученых из команд Калтех/МІТ, работавших над проектом LIGO в конце 1991 года. *Слева:* некоторые члены команды Калтеха, против часовой стрелки, начиная с правого верхнего угла: Аарон Гиллеспи, Фред Рааб, Мэгги Тейлор, Сейджи Кавамура, Робби Вогт, Рональд Драйвер, Лайза Сиверс, Алекс Абрамовичи, Боб Спиро, Майк Цукер. *Справа:* некоторые из членов команды МІТ, против часовой стрелки, начиная с верхнего правого угла: Джой Ковалик, Ярон Хефец, Нергиз Малвала, Райнер Вайс, Дэвид Шумейкер, Джой Джияйми. [Слева: предоставлено Кеном Роджерсом/Black Star; справа: предоставлено Эриком Л. Симмонсом]

движения (JPL) NASA, которая поддерживает большую часть исследовательских межпланетных космических программ США, а после этого стал проректором Калтеха. На этом посту Вогт, хотя и был чрезвычайно эффективен, постоянно сталкивался с президентом Калтеха Марвином Голдбергером в ожесточенных схватках по вопросам управления Калтеха. После нескольких лет битв Голдбергер его уволил. Вогт не мог по своему темпераменту работать *под* теми, с суждениями которых был в корне не согласен, но, будучи сверху, он был великолепен. Он был тем самым директором, дирижером и тренером, который нам был нужен. Если кто-то и мог спаять нас в сплоченную команду, то это был именно он.

«Вам будет тяжело работать с Робби, — сказал нам бывший член его команды, работавшей над интерферометром миллиметрового диапазона, — будут и раны, и обиды, но оно того стоит. Ваш проект будет ждать удача».

В течение нескольких месяцев Драйвер, Вайс и я упрашивали Вогта стать директором. Наконец, он согласился, и, как и обещалось, шестью годами позже наша объединенная команда Калтеха и Масачусетса, набившая синяки и шишки, но эффективная, мощная и

10. Рябь кривизны

сплоченная, быстро растет, подходя к критической численности (около 50 ученых и инженеров), требуемой для успеха проекта. Однако успех проекта зависит не только от нас. Согласно плану Вогта важный вклад в наши центральные усилия будет сделан и другими учеными¹⁶, которые, хотя и будут оставаться в слабой связи с нашей группой, смогут сохранить индивидуальный свободный стиль, от которого мы были вынуждены отказаться.

* * *

Ключом к успеху наших усилий будет создание и работа национально научного комплекса, названного *Лазерная Интерферометрическая Гравитационно-волновая Обсерватория*, или *LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory)*. LIGO будет состоять из двух L-образных вакуумных систем, одна вблизи Хэнфорда, штат Вашингтон, а другая около Ливингстона в Луизиане, где физики будут создавать и использовать многие последовательные поколения постоянно улучшающихся интерферометров (см. рис.10.8)¹⁷.

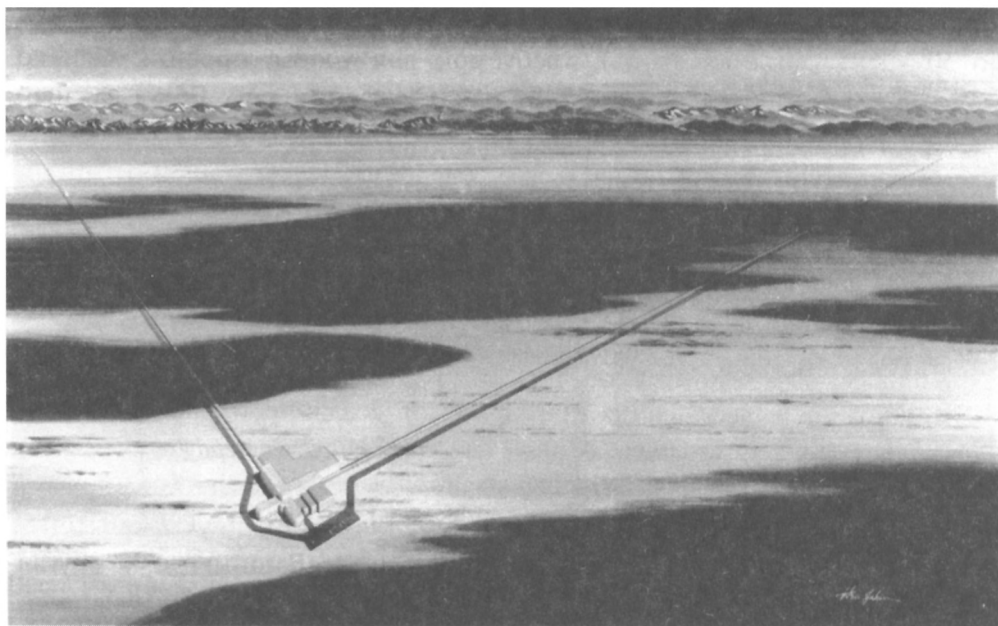
Почему два объекта, а не один? Потому что лежащие на поверхности земли гравитационно-волновые детекторы всегда подвержены влиянию трудно учитываемых шумов, которые могут симулировать гравитационно-волновые всплески, например, струна, на которой подвешена масса, может по неизвестной причине немного скрипнуть, качнув массу и симулировать, тем самым, приливную силу волны. Однако такой шум почти никогда не может случиться одновременно в двух независимых, далеко разнесенных детекторах. Поэтому, чтобы быть уверенными, что наблюдаемый сигнал вызван гравитационными волнами, а не шумом, следует убедиться, что он появился одновременно в обоих детекторах.

При наличии только одного детектора обнаружение и слежение за гравитационными волнами невозможно.

Хотя для детектирования гравитационной волны достаточно двух детекторов, для полного декодирования симфонии волн, т. е. извлече-

¹⁶ К 1993 г. это сотрудничество включало группу Брагинского в Москве, группу, возглавляемую Бобом Байером в Стэнфордском университете, группу Джима Фэллера из Университета Колорадо, группу Питера Саулсона из Сиракузского университета и группу Сэма Финна из Северо-Западного университета.

¹⁷ Сейчас, в 2005 г., первое поколение антенн заступило на дежурство в Хэнфорде и Ливингстоне с чувствительностью близкой к 10^{-21} и начало слежение за Вселенной. Одновременно разрабатываются планы дальнейшего совершенствования интерферометров. Самые свежие новости и большое количество материалов о LIGO заинтересованные читатели могут найти в Интернете, на официальном сайте проекта <http://ligo.caltech.edu/> [Прим. ред.]



10.8. Художественная концепция L -образной вакуумной системы и экспериментального корпуса в углу буквы « L » антенны LIGO около Хэнфорда. [Предоставлено проектом LIGO, Калифорнийский технологический институт]

ния всей содержащейся в ней информации, желательно иметь три, а лучше четыре таких сооружения, как можно дальше разнесенных друг от друга. Совместная франко-итальянская команда построит третью антенну, названную VIRGO¹⁸ около Пизы в Италии. VIRGO и LIGO вместе образуют международную сеть для извлечения полной информации из сигнала. Команды из Англии, Германии, Японии и Австралии изыскивают средства для создания дополнительных антенн, подключенных к этой сети.

Строительство такой амбициозной сети сооружений для обнаружения волн, которых никто и никогда не видел, может показаться слишком смелым. На самом деле, это не так смело, поскольку существование гравитационных волн уже было доказано в результате астрономических наблюдений, за что Джозеф Тейлор и Рассел Халс из Принстонского университета получили в 1993 г. Нобелевскую премию. Тейлор и Халс обнаружили с помощью радиотелескопа две нейтронные звезды, одна из которых является пульсаром, обращающиеся вокруг друг друга с периодом 8 часов, и с помощью исключительно

¹⁸ Она названа так по имени кластера галактик в созвездии Девы (Virgo), откуда могут приходить гравитационные волны. [Эта трехкилометровая антенна, а также 600-метровая в Германии и 300-метровая в Японии сейчас, к 2005 г., уже построены. — Прим. ред.]

10. Рябь кривизны

тщательных радиоизмерений убедились, что звезды сближаются по спирали в точности с той скоростью (на 2,7 миллиардных частей в год), которую предсказывают законы Эйнштейна, учитывающие эффект отдачи излучаемых во Вселенную гравитационных волн. Кроме слабых толчков гравитационных волн ничто иное объяснить наблюдаемое спиральное сближение этих нейтронных звезд не может.

* * *

Как будет выглядеть гравитационно-волновая астрономия в начале XXI века? Возможен такой сценарий:

К 2007 г. в полную силу работают восемь интерферометров, каждый длиной несколько километров. Они сканируют космос в поисках всплесков гравитационных волн. Две антенны работают в Пизе, в Италии, две в Ливингстоне, в Луизиане, на юго-востоке Соединенных Штатов, две в Хэнфорде в штате Вашингтон, на северо-западе Америки, и две в Японии. Из пары интерферометров на каждом месте один является «рабочей лошадкой», инструментом, который следит за колебаниями в диапазоне от 10 до 1000 Гц, а другой, только недавно разработанный и установленный, продвинутый «специальный» интерферометр, который обнаруживает колебания в диапазоне от 1000 до 3000 Гц.

Однажды на Землю приходит пакет гравитационных волн от удаленного космического источника. Каждый гребень волны сначала толкает массы детекторов в Японии, затем проходит сквозь Землю и достигает детекторов в Вашингтоне, а затем в Луизиане и, наконец, в Италии. В течение примерно минуты гребни волны сменяются провалами и наоборот. Массы каждого детектора слегка вздрагивают, изменяя длины путей лазерных пучков и, тем самым, меняя мощность света, падающего на фотодетекторы. Сигналы с восьми фотодиодов передаются через сеть на центральный компьютер, который извещает команду ученых о том, что на Землю прибыл еще один минутный всплеск гравитационных волн, уже третий на этой неделе. Компьютер объединяет сигналы с выходов восьми фотодетекторов, вычисляя четыре вещи: наиболее вероятное положение источника всплеска на небе, границы области ошибок, в которых заключено это наиболее вероятное положение, и две *волноформы*, две осциллирующие кривые, аналогичные тем, которые вы получите, если будете исследовать звук симфонии с помощью осциллографа. История источников закодирована именно в этих формах (рис. 10.9).

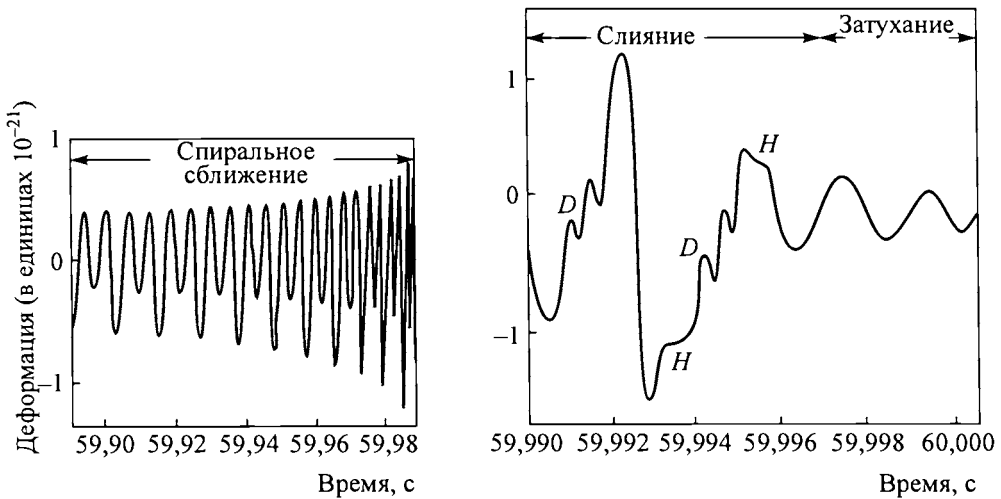
Две формы получаются потому, что гравитационная волна имеет две *поляризации*. Если волна проходит вертикально через интерферометр, то одна поляризация описывает приливные силы, которые вызывают колебания в направлениях восток—запад и север—юг, а другая описывает колебания вдоль направлений северо-запад—юго-восток и северо-восток—юго-запад. Каждый детектор, в зависимости от своей ориентации чувствует некоторую комбинацию из этих двух поляризаций, а из откликов восьми детекторов компьютер воссоздает две формы волны.

Затем компьютер сравнивает полученные волноформы с теми, которые содержатся в большом каталоге, так же как наблюдатель может опознать высоко летящую птицу, сравнив ее профиль с картинками в соответствующей книге. Каталог был составлен на основании численного моделирования источников на компьютерах, а также на основе предшествующих наблюдений за гравитационными волнами от сталкивающихся и сливающихся черных дыр, нейтронных звезд, вращающихся нейтронных звезд (пульсаров) и взрывов сверхновых. Идентификация этого всплеска оказывается простой (если бы это был, например, всплеск от сверхновой, все было бы сложнее). Волноформа однозначно показывает уникальную подпись двух сливающихся черных дыр.

Волноформа имеет три участка:

- Первый участок длительностью в одну минуту (из которой показаны на рис. 10.9 только последние 0,1 секунды) представляет собой колебания деформации, с постепенно нарастающей амплитудой и частотой — это как раз та форма, которая ожидается от спирального сближения двух объектов в двойной системе. Чередование меньших и больших колебаний отражает тот факт, что орбита является не круглой, а немного эллиптической.
- Сегмент длительностью в 0,01 секунды почти идеально соответствует недавним (в начале XXI века) результатам, полученным моделированием на суперкомпьютерах слияния двух черных дыр в одну. Согласно этим моделям пики, обозначенные буквой *H*, соответствуют моментам касания и слияния горизонтов черных дыр, однако парные флуктуации, обозначенные буквой *D*, являются новым открытием, впервые сделанным с помощью нового специального интерферометра. Более старые рабочие лошадки не могли обнаружить эти флуктуации из-за их более высокой частоты, они не проявляются в результатах суперкомпьютерного моделирования и являются настоящим вызовом для теоретиков, требуя объяснения. Возможно, это были первые намеки на причудливые нелинейные колебания пространственно-временной

10. Рябь кривизны



- 10.9. Одна из двух волноформ, вызванная слиянием двух черных дыр. Деформация, вызванная волной, отложена по вертикали в единицах 10^{-21} ; время в секундах отложено по горизонтали. Первый график показывает только последние 0,1 секунды части волноформы, соответствующей спиральному сближению звезд; предшествующая минута выглядит аналогично, с постепенным увеличением амплитуды и частоты колебаний. Второй график показывает в растянутом масштабе последние 0,01 секунды. Участки волноформы, связанные со спиральным сближением и *затуханием*, мы сейчас, в 1993 г., хорошо понимаем на основании решений уравнений поля Эйнштейна. Как выглядит участок, связанный со *слиянием*, мы пока не знаем (показанная кривая является плодом моей собственной фантазии); будущее моделирование на суперкомпьютерах должно позволить рассчитать и это. В тексте предполагается, что это моделирование успешно сделано в начале XXI века

кривизны сливающихся черных дыр, о которых ранее не подозревали. Теоретики, заинтригованные перспективами, возвращаются к моделированию в поисках признаков таких парных осцилляций.

- Третий сегмент длительностью 0,03 секунды (на рис. 10.9 показано только его начало) состоит из колебаний постоянной частоты с постепенно уменьшающейся амплитудой, точно таких, которые ожидаются от пульсаций деформированной черной дыры, пытающейся стряхнуть все свои деформации. Такую же форму имеют затухающие колебания звучащего колокола. Деформации представляют собой два выступа, как у гантели, вращающихся вокруг экватора черной дыры и постепенно исчезающие в процессе того, как рябь кривизны уносит их энергию (рис. 10.2 вверх).

И компьютерного анализа деталей волноформ не только восстанавливается история спирального сближения, слияния и затухания, но и определяются массы и скорости обращения исходных и конечной чер-

ных дыр. Каждая из исходных черных дыр имела массу в 25 солнечных и медленно вращалась. Конечная черная дыра имеет массу в 46 солнечных и вращается со скоростью, составляющей 78 процентов от максимальной. Энергия недостающих 4 солнечных масс ($2 \times 25 - 46 = 4$) была преобразована в рябь кривизны и унесена гравитационными волнами. Полная площадь поверхности исходных черных дыр была равна 136000 квадратных километров. Полная площадь поверхности конечной дыры больше, как это требует второй закон механики, черных дыр (глава 12) и составляет 144000 квадратных километров. Волноформы также позволяют определить, что расстояние черной дыры от Земли составляет 1 миллиард световых лет с точностью около 20 процентов. Волноформы также говорят нам, что мы на Земле находимся почти перпендикулярно плоскости исходных орбит и смотрим теперь на северный полюс вращающейся черной дыры, и показывают, что эксцентриситет (вытянутость) исходных орбит составляла 30 процентов.

Из времени прихода гребней волны на детекторы в Японии, Вашингтоне, Луизиане и Италии компьютер определяет положение черной дыры на небе. Поскольку Япония почувствовала колебания первой, дыра находилась в это время примерно над Японией и под ногами Америки и Европы. Детальный анализ времен прихода позволяет определить наиболее вероятное положение черной дыры с погрешностью около 1° . Если бы дыра была меньше, ее колебания были бы чаще, и это позволило бы определить ее положение точнее, но для таких массивных черных дыр 1° — это все, что может дать сеть антенн. В следующие десятилетия, когда интерферометрические детекторы будут работать на Луне, погрешность по одному из измерений будет уменьшена в 100 раз.

Поскольку орбиты исходных дыр были вытянутыми, компьютер заключает, что две дыры были захвачены на орбиты вокруг друг друга только за несколько часов до слияния и излучения всплеска. (Если бы они обращались вокруг друг друга дольше нескольких часов, отдача гравитационных волн, излучаемых двойной системой, сделала бы их орбиты круглыми.) Недавний захват означает, что черные дыры, вероятно, находились в плотном скоплении черных дыр и массивных звезд в центре некоторой галактики.

Затем компьютер просматривает каталоги оптических, радио и рентгеновских галактик, в поисках той, которая находится в пределах 1° от найденного положения и на расстоянии от 0,8 до 1,2 миллиарда световых лет от Земли и имеет выраженное ядро. Обнаруживается 40 кандидатов, которые передаются астрономам. В течение нескольких лет

10. Рябь кривизны

эти сорок кандидатов будут детально исследованы с помощью радио, миллиметровых, оптических, рентгеновских и гамма телескопов. Постепенно станет ясно, что у одной из галактик-кандидатов имеется ядро, в котором тогда, когда свет покинул ее, начал зарождаться агломерат из газа и звезд, который в ходе 1 000 000-летней бурной эволюции приведет, в конце концов, к рождению гигантской черной дыры и затем квазара. Благодаря всплеску гравитационной волны, который позволил обратить внимание на эту особенную галактику, астрономы смогут теперь выяснить детали рождения гигантских черных дыр.

ЧТО ТАКОЕ РЕАЛЬНОСТЬ?

глава, в которой пространство-время искривлено по воскресеньям и плоское по понедельникам; горизонты по воскресеньям сделаны из вакуума и по понедельникам из зарядов, но воскресные эксперименты согласуются с понедельничными во всех деталях

Действительно ли пространство-время искривлено? Может быть, оно на самом деле плоское, а «кривы» часы и линейки, с помощью которых мы его измеряем (см. Врезку 11.1)? Может быть, даже самые точные часы немного отстают или спешат, а самые точные линейки сжимаются или растягиваются, когда мы переносим их от точки к точке и крутим их так и сяк? Может быть, пространство-время «кривит» от наших часов и линеек?

Да.

На рис.11.1 приведен конкретный пример: даны измерения радиусов и окружностей вокруг невращающейся черной дыры. Слева мы видим диаграмму, показывающую искривление пространства у черной дыры. Пространство на этой диаграмме искривлено, потому что расстояния измеряются линейками, которые мы считаем заведомо точными и не меняющими свою длину, куда бы и как бы мы их ни прикладывали. Линейки показывают, что горизонт вокруг черной дыры имеет окружность длиной 100 км. Вокруг дыры проведена также окружность с вдвое большей длиной, 200 км, и расстояние от нее до горизонта измерено с помощью точной линейки; оно составляет 37 км. Если бы пространство было плоским, это радиальное расстояние было бы равно разности радиусов внешней окружности $200/2\pi$ км и горизонта $100/2\pi$ км, т.е. приблизительно 16 км. Чтобы получилось большее радиальное расстояние, 37 км, пространство должно иметь искривленную форму, в виде раструба музыкальной трубы (см. диаграмму).

Врезка 11.1

Совершенные линейки и часы

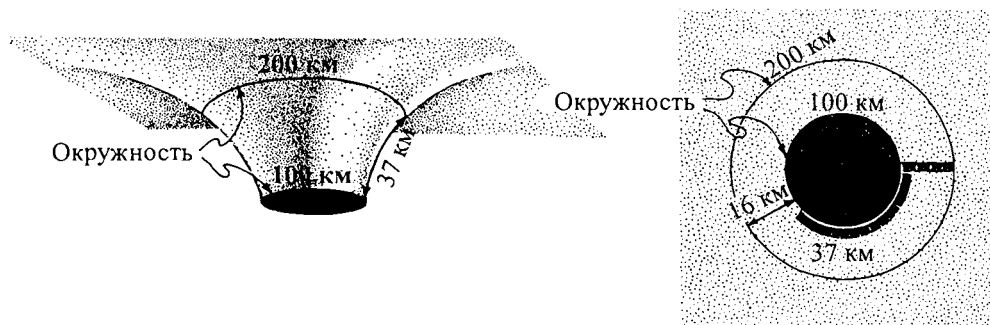
Под «совершенными часами» и «совершенными линейками» в этой книге подразумеваются часы и линейки, наиболее точные в нашем мире, совершенство которых проверяется на атомно-молекулярном уровне.

Точнее говоря, совершенные часы должны «тикать» в одном ритме с колебаниями атомов и молекул. Лучшие атомные часы в мире для этого и созданы. Поскольку колебания атомов и молекул контролируются тем, что я назвал в предыдущих главах «темпом течения времени», совершенные часы измеряют «временную» часть искривленного пространства-времени Эйнштейна.

Отметки на совершенных линейках должны иметь однородные и стандартные расстояния по сравнению с длинами волн света, излученного атомами и молекулами, например, по отношению к «длине волны 21 см», излучаемой молекулами водорода. Это равносильно тому, что если измерения длины производятся линейкой при фиксированной и стандартной температуре (скажем, ноль градусов Цельсия), то она всегда содержит одинаковое число атомов между отметками длины. Это, в свою очередь, гарантирует, что совершенные линейки измеряют пространственные длины искривленного пространства-времени Эйнштейна.

В этой главе вводится концепция «истинного» времени и «истинной» длины. Причем они не обязательно измеряются совершенными часами и совершенными линейками, т.е. это время и эта длина не обязательно основаны на атомно-молекулярных стандартах и не обязательно должны являться частью изогнутого пространства-времени Эйнштейна.

Если пространство вокруг черной дыры на самом деле плоское, а наши линейки растягиваются, нам может казаться, что искривлено пространство. Тогда истинная геометрия пространства такова, как показано в правой части рис. 11.1, а истинное расстояние от горизонта до окружности 16 км, как это следует из законов плоской геометрии Евклида. Из общей теории относительности, однако, следует, что это истинное расстояние нельзя измерить с помощью наших совершенных линеек. Возьмите линейку и приложите ее вдоль окружности вокруг черной дыры с внешней стороны от ее горизонта (черный отрезок дуги с делениями в правой части рис. 11.1). Будучи расположена по окружности, линейка измеряет истинное расстояние. Отрежьте кусок линейки длиной 37 км. Этот отрезок составляет 37 % всей длины окружности вокруг черной дыры. Теперь поверните линейку в радиальном направлении (прямая черная полоска с делениями на рис. 11.1). В соответствии с общей теорией относительности при повороте она сожмется. Если



Искривленное пространство-время

Плоское пространство-время

11.1. Измерения длины в окрестности черной дыры с двух различных точек зрения.

Слева: пространство-время считается искривленным, и совершенная линейка измеряет точную длину истинного пространства-времени. *Справа:* пространство-время считается плоским, и линейка является растяжимой. Совершенная линейка длиной 37 км, ориентированная вдоль окружности, измеряет точную длину в истинном плоском пространстве-времени. Но ориентированная по радиусу, эта линейка сжимается, причем тем сильнее, чем ближе она к черной дыре. Поэтому радиальное расстояние, измеренное с ее помощью, оказывается больше истинного (в нашем случае 37 км вместо истинных 16 км)

направить линейку по радиусу, ее истинная длина должна сжаться до 16 км и она будет доставать от горизонта точно до внешнего круга. Однако деления, которые остались на сжавшейся линейке, говорят о том, что ее длина по-прежнему 37 км. Таким образом, расстояние между горизонтом и окружностью равно 37 км. Люди подобные Эйнштейну, которые не знают, что линейка может растягиваться, и верят ее показаниям, делают вывод, что пространство искривлено. Однако те люди, которые, как я и вы, принимают растяжимость, знают, что линейка сжимается, а пространство на самом деле плоское.

Что могло заставить линейку сжаться, когда изменилась ее ориентация? Конечно, гравитация. В плоском пространстве правой части рис. 11.1 существует гравитационное поле. Оно контролирует размеры фундаментальных частиц, атомных ядер, атомов, молекул, всего на свете и заставляет их сжиматься в радиальном направлении. Сжатие велико возле черной дыры и уменьшается с удалением от нее, так как гравитационное поле, контролирующее это сжатие, генерируется черной дырой и его влияние уменьшается с расстоянием.

Гравитационное поле, влияющее на сжатие, имеет и другие следствия. Когда фотон или какая-нибудь другая частица пролетает рядом с дырой, поле действует на нее и искривляет ее траекторию. Траектория частицы изгибается вокруг черной дыры. Она становится кривой при измерениях в истинной плоской пространственно-временной гео-

11. Что такое реальность?

метрии черной дыры. Но люди подобные Эйнштейну, принимающие всерьез показания растяжимых линеек и часов, думают, что фотон движется по прямой линии в искривленном пространстве-времени.

Что же происходит на самом деле? Является ли пространство-время плоским, как мы думали до сих пор, или оно искривлено в действительности? Для физика подобного мне это неинтересный вопрос, потому что у него нет физических следствий. Обе точки зрения — изогнутого и плоского пространства-времени — дают совершенно одинаковые предсказания для измерений, выполненных с помощью совершенных линеек и часов, а также с помощью любых других физических приборов. Например, с обеих точек зрения радиальное расстояние между горизонтом и окружностью на рис. 11.1, *измеренное совершенной линейкой*, равно 37 км. Несогласие между ними заключается только в том, является ли измеренное расстояние «реальным». Но это уже вопрос не физики, а философии. Поскольку результаты всех экспериментов согласуются с обеих точек зрения, они физически эквивалентны. Какая из них сообщает нам «истинную правду», не важно с экспериментальной точки зрения. Пусть об этом спорят философы, а не физики. Более того, физики могут пользоваться попеременно обеими точками зрения (*и делают это*), пытаясь выводить предсказания из общей теории относительности.

* * *

Умственные процессы, которые характеризуют работу физиков-теоретиков, блестяще описал Томас Кун в своей концепции *парадигмы*. Кун, получивший степень доктора философии по физике в Гарвардском университете в 1949 г., стал впоследствии выдающимся историком и философом науки. Он ввел концепцию парадигмы в книге, написанной в 1962 г., *Структура научных революций*. Это одна из самых потрясающих книг, которые я когда-либо читал.

Парадигма — это целый набор средств, который используется сообществом ученых в процессе исследования какого-либо предмета, а также в процессе общения друг с другом при обсуждении результатов этого исследования. Искривленное пространство-время в общей теории относительности — это одна парадигма; плоское пространство-время — другая. Каждая из этих парадигм включает в себя три основных элемента: ряд физических *законов*, сформулированных на языке математики; ряд *иллюстраций* (мысленных, вербальных или на бумаге), которые описывают законы и помогают нам понимать друг друга; ряд *примеров* — проведенных ранее вычислений и решенных задач либо в

учебниках, либо в опубликованных научных статьях, которые являются правильными и интересными с точки зрения экспертов по теории относительности и которые мы используем в качестве образца в наших последующих вычислениях.

Парадигма искривленного пространства-времени включает в себя три вида математически сформулированных законов: уравнение поля Эйнштейна, которое описывает процесс искривления пространства-времени под влиянием вещества; формулы, описывающие способ измерения длин и промежутков времени в искривленном пространстве-времени Эйнштейна с помощью совершенных линеек и часов; формулы, описывающие движение материи и полей в искривленном пространстве-времени (например, что свободно движущиеся тела перемещаются по прямым линиям), т. е. геодезические свойства этого пространства-времени. *Парадигма плоского пространства-времени* также включает в себя три вида законов: закон, описывающий процесс возникновения гравитационного поля под действием вещества в плоском пространстве-времени; законы, которые описывают, каким образом это поле влияет на сжатие совершенных линеек и на растяжение промежутков времени, отмеряемых совершенными часами; законы, в соответствии с которыми частицы и поля движутся в гравитационном поле этого плоского пространства-времени.

Иллюстрации в парадигме искривленного пространства-времени включают диаграммы, помещенные в этой книге (например, левая часть рис. 11.1), и вербальные описания кривизны пространства-времени вокруг черных дыр (например, «подобное торнадо завихрение пространства вокруг вращающейся черной дыры»). Иллюстрации в парадигме плоского пространства-времени включают правую часть рис. 11.1, когда происходит сжатие линейки при изменении ее ориентации вдоль окружности на ориентацию вдоль радиуса, а также вербальное описание типа «под действием гравитационного поля происходит сжатие линеек».

К примерам в парадигме искривленного пространства-времени относится решение Шварцшильда для уравнения поля Эйнштейна, описанное в большинстве учебников по теории относительности, а также расчеты Израэля, Картера и Хокинга, показавшие, что у черной дыры нет «волос». К примерам в парадигме плоского пространства-времени можно отнести известные расчеты изменения массы черной дыры или другого тела при взаимодействии с гравитационными волнами, а также результаты вычислений Клиффорда Уилла, Тибо Дамура и др., показавших, как при вращении вокруг друг друга нейтронных звезд возникают гравитационные волны (волны поля, вызывающего сжатие пространства).

11. Что такое реальность?

Каждая часть парадигмы — законы, иллюстрации и примеры — существенна для моих мыслительных процессов в ходе исследования. Иллюстрации (мысленные или вербальные, а также те, которые можно увидеть на бумаге) служат главной путеводной нитью. Они дают мне интуитивное восприятие возможного поведения Вселенной; манипуляции ими или математическими схемами интересны с точки зрения новых озарений. Если на основании иллюстраций и зарисовок у меня возникает интересная мысль (например, «гипотеза об обруче» в главе 7), я затем пытаюсь подтвердить или опровергнуть ее тщательными математическими расчетами, основанными на строгих законах физики, лежащих в основе парадигмы. Примеры, иллюстрирующие парадигму, задают уровень точности, который требуется для получения достоверных результатов. Если точность плохая, результаты могут оказаться неверными; если точность слишком большая, расчеты могут занять неоправданно большое время. Примеры подсказывают, какие именно математические операции помогут мне добраться до цели сквозь трясину математических символов. Иллюстрации также помогают расчетам. С их помощью можно отыскать кратчайшие пути и избежать тупиковых решений. Если расчеты подтверждают или, по крайней мере, не опровергают мою идею, я довожу ее до сведения специалистов по теории относительности, пользуясь иллюстрациями и вычислениями, или других людей (например, читателей этой книги), пользуясь только вербальными иллюстрациями и рисунками в книге.

Физические законы в парадигме плоского пространства-времени можно вывести математически из законов в парадигме искривленного пространства-времени, и наоборот. Это означает, что два ряда законов являются разными *математическими представлениями* одного и того же физического явления, подобно тому как 0,001 и $1/1000$ являются разными математическими представлениями одного и того же числа. Математические формулы, описывающие эти законы, выглядят, однако, совершенно по-разному в двух представлениях, так же как иллюстрации и примеры, сопровождающие эти два ряда законов.

Например, в парадигме искривленного пространства-времени вербальной иллюстрацией уравнения поля Эйнштейна является утверждение, что «масса рождает кривизну пространства-времени». Если перевести на язык парадигмы плоского пространства-времени, уравнение поля описывается следующей вербальной иллюстрацией: «масса рождает гравитационное поле, которое управляет сжатием линеек и растяжением промежутков времени». Хотя обе версии уравнения поля Эйнштейна математически эквивалентны, их вербальные иллюстрации отличаются очень сильно.

В исследованиях, связанных с теорией относительности, очень важно уметь владеть обеими парадигмами. Некоторые задачи проще и быстрее решаются в парадигме искривленного пространства-времени; другие — с использованием идеи о плоском пространстве-времени. Параметры черной дыры лучше всего определять, пользуясь соображениями об искривленном пространстве-времени (например, так было сделано открытие, что черная дыра не имеет «волос»); гравитационно-волновые задачи лучше решать методами, характерными для плоского пространства-времени (например, проводить расчет гравитационных волн, возникающих в двойной системе нейтронных звезд при их вращении). Опытные физики-теоретики постепенно начинают чувствовать, какая парадигма больше всего подходит к той или иной ситуации, и по мере необходимости пользуются то одной, то другой точкой зрения. По воскресеньям, думая о черных дырах, они могут считать пространство-время искривленным, а по понедельникам, думая о гравитационных волнах, плоским. Такой скачок разума можно сравнить с тем, который испытываешь, когда смотришь на картину М.К.Эшера (рис. 11.2).

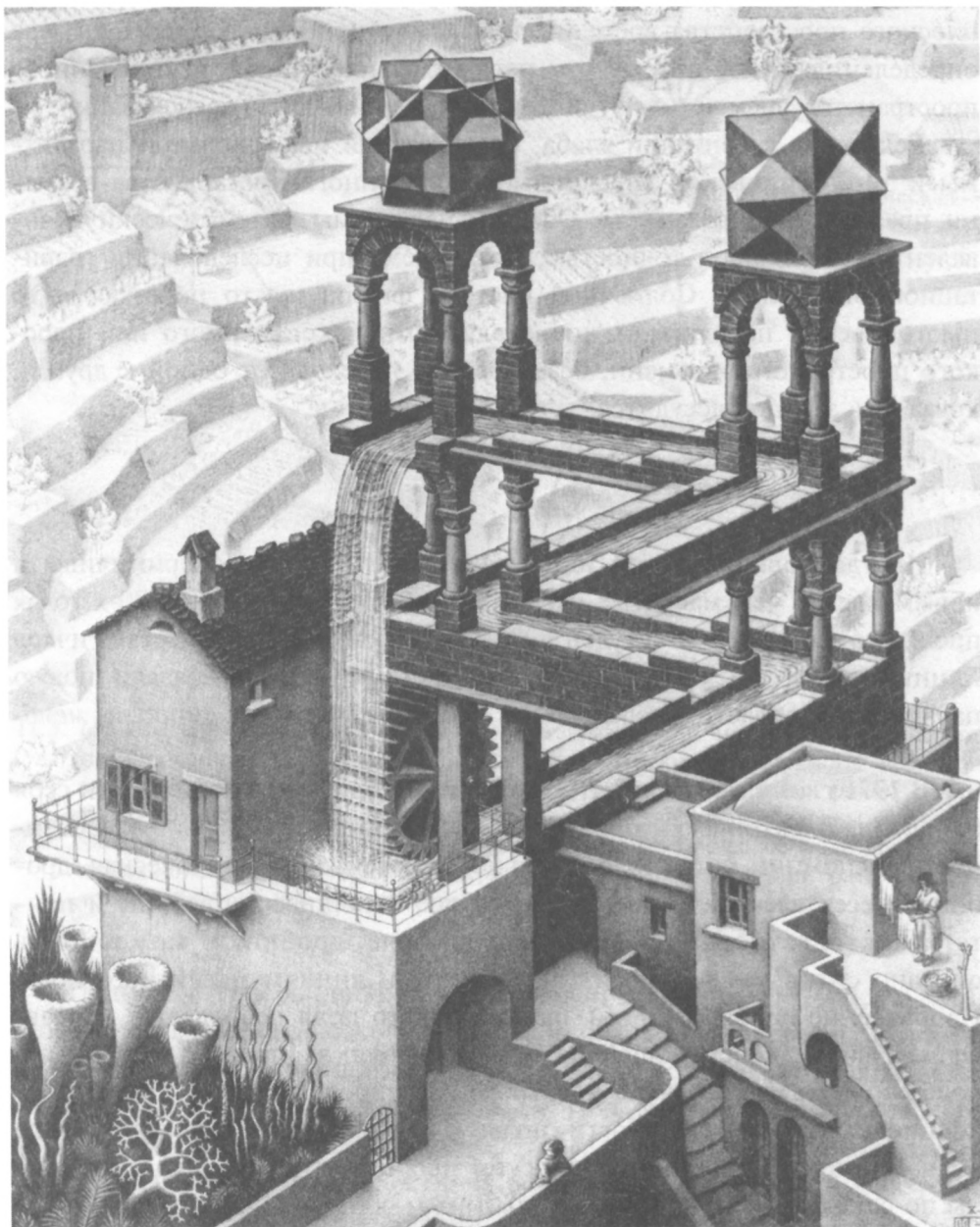
Законы, лежащие в основе обеих парадигм, математически эквивалентны. Отсюда наша уверенность в том, что при анализе той или иной физической ситуации мы получим одинаковые предсказания для результатов экспериментов в рамках обеих парадигм. Поэтому мы вольны пользоваться той или иной парадигмой в зависимости от ситуации.

Такая свобода дает некоторую власть. Физиков не всегда удовлетворяет концепция искривленного пространства-времени Эйнштейна, и в качестве дополнения к ней они развили концепцию плоского пространства-времени.

Еще одна парадигма — способ описания гравитации, предпринятый Ньютоном. В ней пространство и время считаются абсолютными, а сила гравитации распространяется мгновенно от одного тела к другому («действие на расстоянии», главы 1 и 2).

* * *

Ньютоновская парадигма гравитации, конечно, не эквивалентна эйнштейновской парадигме искривленного пространства-времени; они приводят к различным предсказаниям относительно того, какими должны быть результаты экспериментов. Томас Кун использует слова «научная революция», когда описывает интеллектуальные усилия, потребовавшиеся Эйнштейну для изобретения его парадигмы и убеждения коллег в том, что она точнее описывает гравитацию, чем нью-



- 11.2. Картина М.К.Эшера. При взгляде на нее можно испытать *скачок разума*, если посмотреть сначала с одной точки зрения (например, с вершины водопада), а затем — с другой точки зрения (с нижнего уровня потока). Этот скачок разума подобен тому, который испытывает физик-теоретик, переключаясь с парадигмы искривленного пространства-времени на парадигму плоского пространства-времени

тоновская парадигма (глава 2). Изобретение физиками парадигмы плоского пространства-времени *не было* научной революцией в смысле определения Куна, потому что парадигмы плоского и искривленного пространства-времени дают в точности одинаковые предсказания.

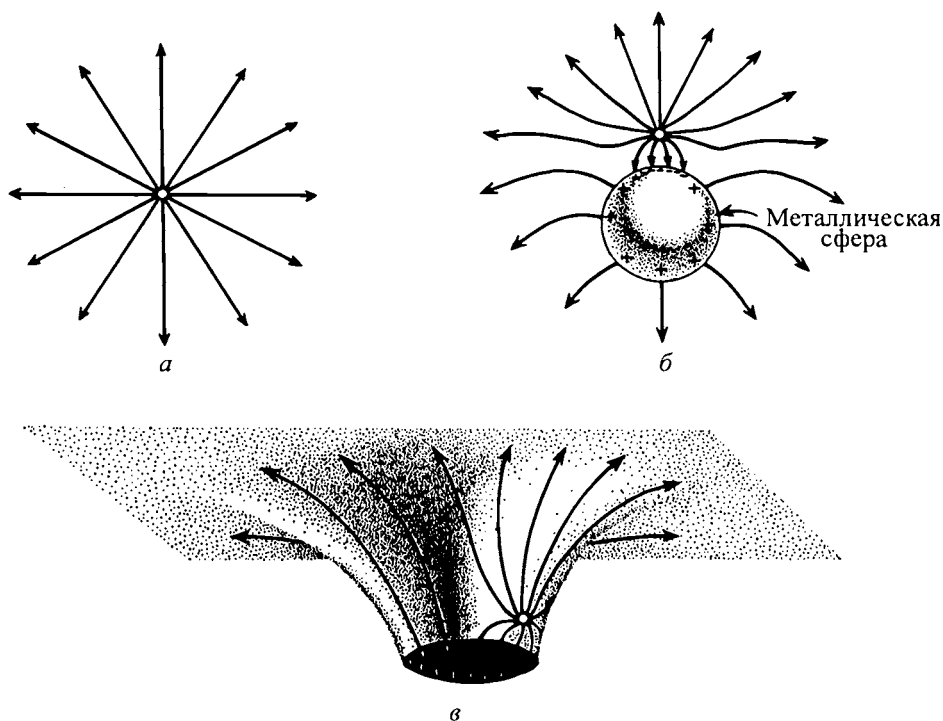
Если сила гравитации слаба, предсказания ньютоновской парадигмы и эйнштейновской парадигмы искривленного пространства-времени практически идентичны. Обе эти парадигмы математически эквивалентны с большой точностью. Вот почему при исследовании гравитационного поля в Солнечной системе физики часто пользуются то ньютоновской парадигмой, то парадигмами искривленного или плоского пространства-времени, безнаказанно переходя от одной к другой, когда им заблагорассудится.¹

* * *

Иногда новички в той или иной области более восприимчивы к новым идеям, чем маститые исследователи. Так случилось в 70-х годах прошлого века, когда студент Принстонского университета Ричард Ханни и молодой ученый «постдок» Ремо Руффини создали новую парадигму в области исследования черных дыр, введя понятие *мембраны*.

В 1971 г. они заметили, что горизонт черной дыры может вести себя наподобие электрически проводящей сферы. Чтобы понять эту особенность, вспомним, что положительно заряженная металлическая дробинка несет электрическое поле, которое отталкивает протоны и притягивает электроны. Электрическое поле дробинки может быть описано силовыми линиями, аналогичными линиям магнитного поля. Направление силовых линий электрического поля совпадает с направлением силы, действующей со стороны поля на протон (и противоположно силе действия на электрон), плотность силовых линий пропорциональна напряженности поля. Силовые линии электрического поля одиночной дробинки в плоском пространстве-времени направлены по радиусам наружу (рис. 11.3а). Таким образом, на протон действует сила, направленная по радиусу в направлении от дробинки. Поскольку плотность силовых линий поля уменьшается обратно пропорционально квадрату расстояния от дробинки, сила, действующая на протон, также уменьшается обратно пропорционально квадрату расстояния от него.

¹ Сравните с последним разделом главы 1 «Характер физических законов».



- 11.3. (а) Электрическое поле положительно заряженной, находящегося в покое изолированной металлической дробинки в плоском пространстве-времени. (б) Электрическое поле покоящейся дробинки и находящейся рядом с ним в плоском пространстве-времени проводящей металлической сферы. Электрическое поле дробинки поляризует сферу. (в) Электрическое поле дробинки, покоящейся вблизи горизонта черной дыры. Силовые линии расположены таким образом, что можно говорить о поляризации горизонта

Поднесем теперь дробинку к металлической сфере (рис. 11.3б). Поверхность металлической сферы состоит из электронов, которые могут свободно перемещаться по сфере, и положительно заряженных ионов, которые не могут перемещаться. Под действием электрического поля дробинки часть электронов сферы скапливается на ближайшей к дробинке части ее поверхности. В остальной части сферы образуется избыток ионов, другими словами, дробинка *поляризует*² сферу.

В 1971 г. Ханни и Руффини, а также независимо от них Роберт Уолд (Принстонский университет) и Джеф Коэн (Принстонский институт передовых исследований) рассчитали форму силовых линий электрического поля, создаваемого заряженной частицей вблизи горизонта

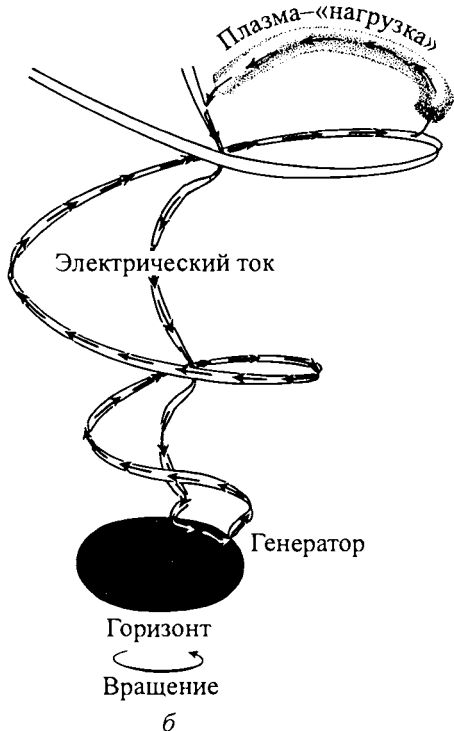
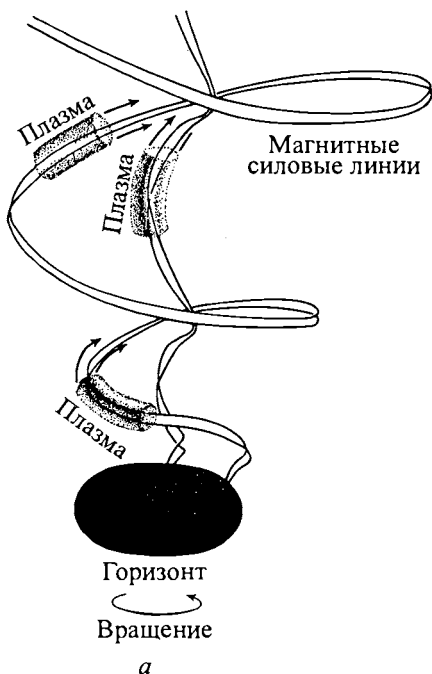
² Слово «поляризация» употребляется здесь в ином смысле, нежели «поляризованные гравитационные волны» и «поляризованный свет» (глава 10).

невращающейся черной дыры. Их расчеты, основанные на стандартной парадигме искривленного пространства-времени, показали, что кривизна пространства-времени искажает силовые линии так, как показано на рис. 11.3*в*. Ханни и Руффини заметили сходство этих силовых линий с силовыми линиями на рис. 11.3*б* (посмотрите на диаграмму (*в*) снизу; она практически такая же, как диаграмма (*б*)). Они предположили, что мы можем говорить о горизонте черной дыры в том же смысле, как мы говорим о металлической сфере. Таким образом, мы можем рассматривать горизонт как тонкую мембрану, состоящую из положительно и отрицательно заряженных частиц, похожую на металлическую поверхность сферы. Обычно число положительных частиц повсюду на мембране равно числу отрицательных частиц, т. е. в любой области мембраны суммарный заряд равен нулю. Однако если к горизонту поднести заряженную частицу, в ближайшей к частице области скапливается избыток отрицательных частиц; тем самым в других областях мембраны образуется избыток положительных частиц, т. е. мембрана поляризуется. В результате картина силовых линий электрического поля, сформированного заряженной частицей и горизонтом, приобретает вид, показанный на диаграмме (*в*).

Я не считаю себя новичком в теории относительности и когда я впервые услышал об этой идее, то посчитал ее смехотворной. Из общей теории относительности следует, что тело, падающее в черную дыру, не ощутит на ее горизонте ничего, кроме кривизны пространства-времени: никакой мембраны и никаких заряженных частиц. Объяснение, данное Ханни—Руффини по поводу искривления силовых линий электрического поля заряженного шарика, не может иметь ничего общего с реальностью. Это чистая выдумка. Я был уверен, что силовые линии искривляются вследствие кривизны пространства-времени и ничего более, что они искривляются вблизи горизонта из-за того, что на них действуют приливные силы гравитации (диаграмма (*в*)), а не из-за того, что они притягиваются к заряду на поляризованном горизонте. Я считал, что горизонт не может обладать никаким поляризованным зарядом. Я был не прав.

Спустя пять лет Роджер Блэндфорд и выпускник Кембриджского университета Роман Знаек сделали открытие, согласно которому энергия вращения черной дыры может преобразовываться с помощью магнитного поля в энергию мощных струй (процесс Блэндфорда—Знаека, глава 9 и рис. 11.4*а*). Расчеты Блэндфорда и Знаека, выполненные с учетом кривизны пространства-времени, показали, что в процессе извлечения энергии на горизонте черной дыры вблизи ее полюсов возникают электрические токи в виде положительно заряженных

11. Что такое реальность?



- 11.4. Две точки зрения на возникновение струй у вращающейся замагниченной черной дыры (*процесс Блэндфорда–Знаека*). (а) Вращение черной дыры вызывает в пространстве появление «водоворота», который приводит к вращению магнитных силовых линий, пронизывающих черную дыру. При вращении поля появляются центробежные силы, которые ускоряют плазму до высоких скоростей (ср. с рис. 9.7г). (б) Магнитные поля и закручивание пространства приводят к появлению большой разницы потенциалов между полюсами и экватором черной дыры; по существу, черная дыра становится генератором напряжения и мощности. Благодаря разности потенциалов в цепи возникает электрический ток. Мощность электрической энергии по цепи передается от черной дыры к плазме и ускоряет ее до высоких скоростей

частиц, падающих внутрь. Возле экватора токи вытекают с горизонта в виде падающих внутрь отрицательно заряженных частиц. Создавалось такое впечатление, что черная дыра является элементом электрической цепи.

Более того, из расчетов следовало, что черная дыра ведет себя в этой цепи как генератор напряжения (рис. 11.4б). Благодаря действию этого генератора напряжения ток вытекает с экватора на горизонте черной дыры, течет вверх вдоль магнитных силовых линий и удаляется на довольно большое расстояние от черной дыры, затем *плазмой* (которая представляет собой горячий газ, проводящий электрический ток) переносится к другим силовым линиям вблизи оси вращения черной дыры и втекает вдоль этих силовых линий обратно на горизонт.

Магнитные силовые линии в этой электрической цепи играют роль проводов, плазма действует как нагрузка, с помощью которой из цепи извлекается мощность, а вращающаяся черная дыра является источником энергии.

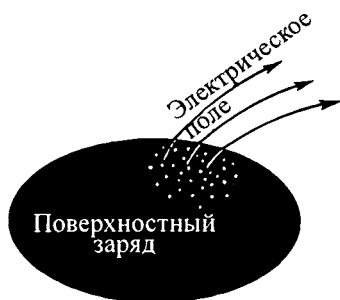
С этой точки зрения (рис. 11.4б), плазма ускоряется за счет мощности, переносимой по цепи, в результате чего происходит образование струй. С точки зрения главы 9 и рис.11.4а, ускорение плазмы происходит при вращении и закручивании магнитных силовых линий. Эти две точки зрения — всего лишь два разных способа рассмотрения одного и того же. В обоих случаях энергия поступает, в конце концов, из черной дыры. Будем ли мы считать, что энергия переносится в электрической цепи или же вдоль вращающихся силовых линий, — всего лишь дело вкуса.

Идея описания черной дыры в терминах электрической цепи была совершенно неожиданной, хотя она и была основана на стандартных законах физики в искривленном пространстве-времени. Казалось очень странным, что в черной дыре может течь ток — внутрь возле полюсов и наружу около экватора. В течение 1977 и 1978 гг. Знаек и, независимо от него, Тибо Дамур, незадолго до этого получивший степень доктора философии в Парижской обсерватории, раздумывали над этой странностью. Пытаясь понять поведение тока, они представили уравнения искривленного пространства-времени, описывающие вращение черной дыры, плазму и магнитное поле, в необычной форме и дали им интересную интерпретацию: ток, достигающий горизонта событий, не втекает в черную дыру. Вместо этого он распространяется по горизонту, и переносят его заряды типа тех, которые были введены Ханни и Руффини. Ток течет по горизонту от полюса к экватору, где он истекает вдоль магнитных силовых линий. Более того, Дамур и Знаек сделали открытие, что законы, которым подчиняется перемещение тока и зарядов по горизонту событий, являются элегантными версиями законов электричества и магнетизма в плоском пространстве-времени — это законы Гаусса, Ампера, Ома и закон сохранения заряда (рис. 11.5).

Дамур и Знаек вовсе не настаивали на том, что существо, падающее внутрь черной дыры, встретит на своем пути горизонт в виде мембраны, на котором будут существовать электрические заряды и токи. Они всего лишь утверждали, что поведение электрического поля, магнитного поля и плазмы вне черной дыры удобно рассматривать, представив себе горизонт событий в виде мембраны, на которой существуют заряды и токи.

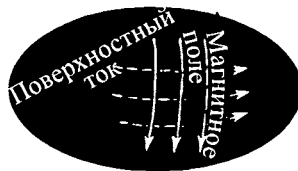
Прочтя статьи Дамура и Знаека, я внезапно понял, что они, вслед за Ханни и Руффини, фактически вводили новую парадигму в иссле-

11. Что такое реальность?



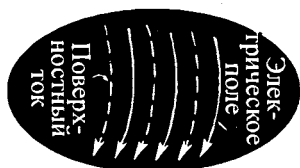
Закон Гаусса

а



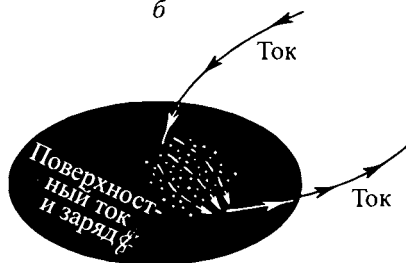
Закон Ампера

б



Закон Ома

в



Закон сохранения заряда

г

- 11.5. Законы, управляющие движением электрических зарядов и токов на горизонте событий черной дыры, имеющем вид мембраны. (а) Закон Гаусса — поверхностный заряд на горизонте в точности таков, что все пересекающие его силовые линии электрического поля на нем замыкаются и не проникают внутрь черной дыры; ср. с рис. 11.3. (б) Закон Ампера — поверхностный ток на горизонте создает магнитное поле, которое в точности уравнивает часть магнитного поля, параллельного горизонту, так что под горизонтом параллельного поля нет. (в) Закон Ома — поверхностный ток пропорционален напряженности того участка электрического поля, которое является касательным к поверхности; коэффициент пропорциональности равен сопротивлению величиной 377 Ом. (г) Закон сохранения заряда — заряд никогда не пропадает и не создается; все положительные заряды, попадающие на горизонт событий из внешней Вселенной, начинают перемещаться по нему, пока вновь не уходят во внешнюю Вселенную (в форме текущих внутрь отрицательных зарядов, нейтрализующих положительные заряды)

довании черных дыр. Эта парадигма была удивительно красивой. Она увлекла меня. Не в силах сопротивляться ее очарованию, я провел почти все 80-е годы в попытках придать этой идее законченную форму. Мы работали вместе с Ричардом Прайсом, Дугласом Макдональдом, Яном Редмаунтом, Вай-Мо Суэном, Рональдом Кроули и др. Результатом этих усилий явилась книга *Черные дыры: мембранный подход*.

Законы физики черных дыр с точки зрения мембранной парадигмы совершенно эквивалентны соответствующим законам в парадигме искривленного пространства-времени, до тех пока мы ограничиваемся рассмотрением пространства, внешнего по отношению к черной дыре.

Тем самым, обе парадигмы дают совершенно одинаковые предсказания по поводу того, какими должны быть результаты любых экспериментов и наблюдений, проводимых вне черной дыры, в том числе всех астрономических наблюдений, проводимых с Земли. Когда я думаю над астрономическими и астрофизическими следствиями, я нахожу совершенно естественным пользоваться обеими парадигмами (мембраны и искривленного пространства-времени), совершая время от времени между ними «скачки разума», как при рассмотрении картины Эшера. Парадигма искривленного пространства-времени, горизонты которой сделаны из пустого изогнутого пространства и времени, может оказаться полезной по воскресеньям, когда я размышляю над пульсациями черных дыр. Мембранная парадигма, в которой горизонт событий представляет собой электрически заряженную мембрану, может быть полезной по понедельникам, когда я раздумываю над тем, как образуются струи у черных дыр. Поскольку у меня есть гарантия, что я получу одинаковые выводы в обеих парадигмах, каждый день я могу пользоваться той из них, которая лучше всего отвечает моим потребностям.

Совсем другая ситуация внутри черной дыры. Любое существо, падающее внутрь черной дыры, обнаружит, что горизонт — это не мембрана, наделенная зарядом. Внутри черной дыры мембранная парадигма полностью теряет свою силу. Падающие существа, однако, должны заплатить за это открытие дорогую цену: они не смогут опубликовать свое открытие в научных журналах внешней Вселенной.

ИСПАРЕНИЕ ЧЕРНЫХ ДЫР

глава, в которой горизонт черной дыры, окутанный атмосферой излучения и горячих частиц, медленно испаряется, а черная дыра сжимается и затем взрывается

Рост черных дыр

Идея пришла к Стивену Хокингу ноябрьским вечером 1970 г., когда он готовился лечь спать. Она буквально ошеломила его. Никогда еще идеи не приходили к нему так внезапно.

Процесс подготовки ко сну был для ученого непростым делом. Амиотрофический боковой склероз (АБС) — болезнь, от которой страдает Хокинг, — разрушает нервы, отвечающие за работу мускулов, и мышцы постепенно выходят из строя. Передвигался он медленно, у него подкашивались ноги. Что бы он ни делал — чистил зубы, раздевался, с трудом облачался в пижаму и ложился в постель — ему приходилось все время держаться одной рукой за полку или за кровать. В этот вечер он двигался медленнее, чем обычно, так как его мысли целиком поглотила Идея. От этой Идеи он пришел в восторг, однако не поделился ею со своей женой Джейн. Ей бы это вовсе не понравилось, от него требовалось, чтобы он побыстрее лег спать.

Несколько часов пролежал он без сна. Ученый не мог заснуть. Мысли его блуждали вокруг Идеи, он обдумывал ее следствия и взаимосвязи с другими явлениями.

А родилась Идея от самого простого вопроса: сколько гравитационного излучения (ряби кривизны пространства-времени) может возникнуть при столкновении двух черных дыр и слиянии их в одну дыру? Хокинг смутно подозревал, что финальная черная дыра должна быть в некотором смысле больше, чем сумма двух первоначальных дыр. Но

в каком смысле? И сколько энергии будет при этом испущено в виде гравитационных волн?

И вот, когда он готовился ко сну, его осенило. Внезапно в его мозгу возникла серия картин и диаграмм, которые слились в одну Идею: увеличиться должен горизонт событий! Он был совершенно уверен в этом, картины и диаграммы сложились в недвусмысленное и строгое математическое доказательство. На полученный вывод не влияло практически ничего: ни массы первоначальных черных дыр (они могли быть одинаковыми или совершенно разными); ни их вращение (направление вращения черных дыр могло совпадать или быть противоположным, или же дыры могли вообще не вращаться); ни характер столкновения черных дыр («лоб в лоб» или в виде скользящего соприкосновения). Все это было не важно. *Площадь горизонта событий у финальной черной дыры должна быть всегда больше, чем сумма площадей горизонтов событий у первоначальных черных дыр.* Что же из этого следовало? Много всего, понял Хокинг, рассмотрев мысленно различные следствия *теоремы возрастания площади.*

Прежде всего, чтобы горизонт образовавшейся в результате слияния черной дыры имел большую площадь, эта дыра должна иметь большую массу (или, что то же самое, большую энергию). Но это также значит, что слишком много энергии потеряно на гравитационном излучении быть не может. Не «слишком много», однако и не так уж мало. Решив с учетом теоремы возрастания площади уравнение зависимости массы черной дыры от площади ее поверхности и вращения, Хокинг нашел, что в гравитационно-волновую энергию может превратиться до 50% массы сливающихся черных дыр. На массу образовавшейся черной дыры останется всего лишь 50%¹.

В течение нескольких месяцев, последовавших за бессонной ноябрьской ночью, Хокинг вывел много других следствий. Возможно, самым важным из них стал новый ответ на вопрос: как *ввести понятие горизонта событий «неспокойной» черной дыры*, например, когда она испытывает сильные колебания (что неизбежно во время столкнове-

¹ Может показаться, что теорема возрастания площади противоречит интуиции. По теореме Хокинга, сколь угодно большая доля массы черных дыр может превратиться в гравитационное излучение. Читатель, знакомый с алгеброй, может получить удовлетворение, рассмотрев пример двух невращающихся черных дыр, от слияния которых получается одна невращающаяся черная дыра, чей размер больше, чем у первоначальных дыр. Площадь поверхности невращающейся дыры пропорциональна квадрату длины окружности ее горизонта событий; последняя, в свою очередь, пропорциональна квадрату массы черной дыры. Из теоремы Хокинга следует, что сумма квадратов масс исходных черных дыр должна быть меньше квадрата массы полученной черной дыры. Несложные алгебраические выкладки показывают, что это ограничение на массы не противоречит условию, согласно которому масса окончательной черной дыры будет меньше суммы масс исходных черных дыр, т. е. не противоречит выводу об излучении некоторой доли исходных масс в виде гравитационных волн.

12. Испарение черных дыр

ний) или когда она быстро растет (после образования в результате взрыва звезды).

В физике очень важно уметь дать точное определение. Только после того как Герман Минковский ввел *определение* абсолютного интервала между двумя событиями (Врезка 2.1), он подошел к концепции «абсолютного» пространства-времени несмотря на относительный характер пространства и времени. Только после того как Эйнштейн ввел *определение* траекторий свободно падающих частиц как прямых линий (рис. 2.2), он пришел к идее искривленного пространства-времени (рис. 2.5) и вывел законы общей теории относительности. И только после того как Хокинг дал *определение* горизонта событий «неспокойной» черной дыры, стало возможным изучить характер изменения черных дыр в результате удара и падения на них осколков, оставшихся от соударения.

Многие физики вслед за Роджером Пенроузом до ноября 1970 г. считали, что горизонт событий черной дыры — это «пограничный слой, на котором силы гравитации способны удержать фотоны, стремящиеся покинуть черную дыру». Хокинг понял, что старое определение горизонта событий заводит в интеллектуальный тупик. Такому горизонту он дал название *видимый горизонт*² с несколько пренебрежительным оттенком, и это новое название укрепились за старым понятием.

У Хокинга были основания испытывать пренебрежение к старому определению. Во-первых, видимый горизонт — понятие не абсолютное, а относительное. Его местоположение зависит от того, в какой системе отсчета находится наблюдатель. Наблюдатель, падающий внутрь черной дыры, может увидеть его совсем в другом месте, чем наблюдатель, находящийся в покое вне черной дыры. Во-вторых, при падении вещества внутрь черной дыры неожиданно может произойти скачок видимого горизонта — его местоположение внезапно изменится. Такое странное поведение довольно трудно объяснить. В-третьих (и это самое важное), видимый горизонт никак не участвовал в том многообразии зрительных образов и диаграмм, благодаря которым у Хокинга родилась Новая Идея.

Новое определение горизонту событий, которое в противовес старому дал Хокинг, было абсолютным (одним и тем же во всех системах отсчета). Поэтому он назвал его *абсолютным горизонтом событий*. Хокинг считал этот горизонт событий прекрасным. Его определение было поистине великолепно: «Граница между теми событиями в простран-

² Более точное определение видимого горизонта событий дано во Врезке 12.1.

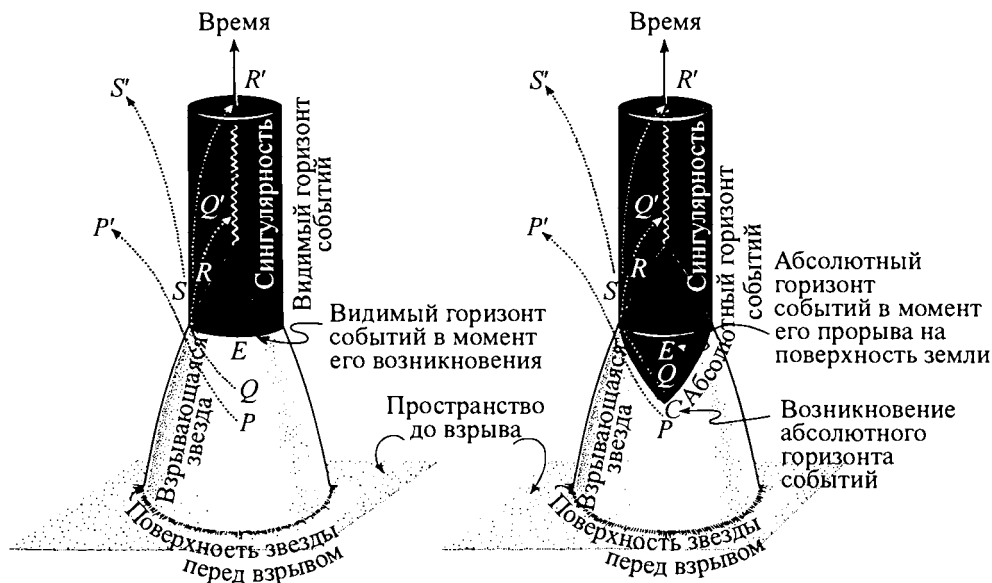
стве-времени (вне горизонта), от которых могут распространяться сигналы в удаленную Вселенную, и теми (внутри горизонта), от которых сигналы выходить не могут». У этого горизонта красивая эволюция: когда черная дыра поглощает материю, сталкивается с другой черной дырой и вообще участвует в каком-либо ином действии, ее абсолютный горизонт событий меняет форму и размер плавно, а не скачком (Врезка 12.1). Важно то, что понятие абсолютного горизонта очень хорошо согласуется с Новой Идеей Хокинга.

Врезка 12.1

Абсолютный и видимый горизонты событий у молодой черной дыры

На пространственно-временных диаграммах (см. ниже) показан процесс образования сферической черной дыры в результате взрыва сферической звезды (ср. рис. 6.7). Пунктирные линии обозначают *выходящие лучи света*, другими словами, это мировые линии (траектории в пространстве-времени) фотонов — самых быстрых сигналов, которые могут быть посланы наружу, во внешний космос. Представим себе оптимально-идеальную картину, когда фотоны не поглощаются и не рассеиваются веществом звезды.

Видимый горизонт событий (левая диаграмма) — это наиболее удаленные от центра точки, в которых световые лучи улавливаются черной дырой и возвращаются обратно в сингулярность (например, лучи QQ' и RR'). В точке E внезапно возникает видимый горизонт событий, там, где поверхность звезды сжимается до критического предела. *Абсолютный горизонт событий* (правая диаграмма) — это граница между событиями, от которых *могут* распространяться сиг-



12. Испарение черных дыр

налы во внешнюю Вселенную (например, событиями P и S , от которых сигналы распространяются в виде световых лучей PP и SS), и событиями, которые *не могут* послать никаких сигналов во внешнюю Вселенную (например, Q и R). Абсолютный горизонт формируется в центре звезды (событие C), перед тем как звезда сожмется до критического предела. В момент возникновения абсолютный горизонт представляет собой всего лишь одну точку, но затем он постепенно расширяется, как воздушный шарик, когда мы его надуваем. Горизонт событий выходит на поверхность звезды точно в тот момент, когда поверхность сжимается до критического предела (окружность E). Затем его расширение прекращается и, начиная с этого момента, он совпадает с внезапно возникшим видимым горизонтом событий.

Мысленные образы и диаграммы Хокинга свидетельствовали о том, что поверхность абсолютного горизонта (в отличие от видимого горизонта) будет увеличиваться не только при столкновении и слиянии черных дыр, но и при их рождении, при падении на них вещества или гравитационных волн, когда гравитация других объектов во Вселенной вызывает на них приливы и отливы и когда из завихрения пространства вне их горизонта событий извлекается вращательная энергия. Действительно, поверхность абсолютного горизонта событий будет почти *всегда возрастать* и никогда не будет уменьшаться. Физическая причина этого проста: все, что дыра встречает на своем пути, посылает энергию внутрь через ее абсолютный горизонт. Возвращение этой энергии назад невозможно. Поскольку все формы энергии рожают гравитацию, это означает, что сила гравитации черной дыры постоянно растет и, соответственно, площадь ее поверхности постоянно увеличивается.

Более точно вывод Хокинга можно сформулировать так: *Измерим в любой области пространства и в любой момент времени (в произвольной системе отсчета) площади всех абсолютных горизонтов событий всех черных дыр и сложим все эти площади, чтобы получить общую площадь. Затем подождем сколь угодно долго и снова измерим площади всех абсолютных горизонтов событий и сложим их. Если между измерениями черные дыры не ушли за границы нашей области пространства, то общая площадь горизонтов событий не может уменьшиться; она могла только возрасти, хотя бы на самую малость.*

Хокинг хорошо понимал, что предсказания относительно результатов экспериментов, производимых человеческими или иными существами, не зависят от выбора определения горизонта событий, абсолютного или видимого. Этот выбор не будет влиять на вывод о том, каково будет гравитационное излучение, рожденное при столкновении черных дыр (глава 10), или на интенсивность рентгеновского излу-

ния, возникшего при падении горячего газа внутрь черной дыры через ее горизонт событий (глава 8). Однако от выбора определения сильно зависит то, насколько легко смогут физики-теоретики прогнозировать свойства и поведение черных дыр на основе эйнштейновских уравнений общей теории относительности. Выбранное определение станет ключевым моментом в парадигме, с помощью которой теоретики проводят свои исследования; оно будет влиять на их умственные картины, диаграммы, слова, которыми они будут пользоваться при общении друг с другом, и на моменты их озарений. Хокинг верил, что новое определение абсолютного горизонта событий с плавно растущей площадью будет больше подходить для этих целей, чем старое определение видимого горизонта, размер которого скачкообразно меняется.

* * *

Стивен Хокинг был не первым физиком, который думал об абсолютных горизонтах событий и который обнаружил возрастание их площади. До бессонной ноябрьской ночи Хокинга об этом уже размышлял Роджер Пенроуз в Оксфорде. По сути дела, идея Хокинга была основана на разработках Пенроуза (глава 13) и на недавней беседе с ним. Пенроуз, однако, не придавал значения теореме возрастающей площади и поэтому не довел работу до конца. Почему он не оценил ее? Потому что у него не было столь ясного мысленного образа абсолютного горизонта событий. Мимо него прошло то, что Хокинг так ясно увидел в свою бессонную ночь: после столкновения черных дыр их слившийся абсолютный горизонт событий должен прийти в состояние покоя, в котором площадь его поверхности можно вычислить из стандартных уравнений для спокойных черных дыр.

Вернер Израэль из Университета Альберта в Канаде также вплотную приблизился к теореме возрастания площади еще до Хокинга. Но он так же не придавал ей значения и не опубликовал ее. Более того, в отличие от Хокинга и Пенроуза Израэль был загипнотизирован старой концепцией видимого горизонта, так же как все мы, теоретики-релятивисты. Видимый горизонт событий сыграл центральную роль в удивительном открытии Пенроуза, сделанном им в 1964 г.: согласно законам Эйнштейна, каждая черная дыра должна иметь в центре сингулярность (глава 13). Тогда понятие видимого горизонта событий оказалось очень важным. Находясь под его впечатлением, все релятивисты не могли даже и подумать о том, чтобы заменить видимый горизонт, как определение поверхности черной дыры, абсолютным горизонтом событий. Мы обращали мало внимания на абсолютный горизонт еще и потому, что

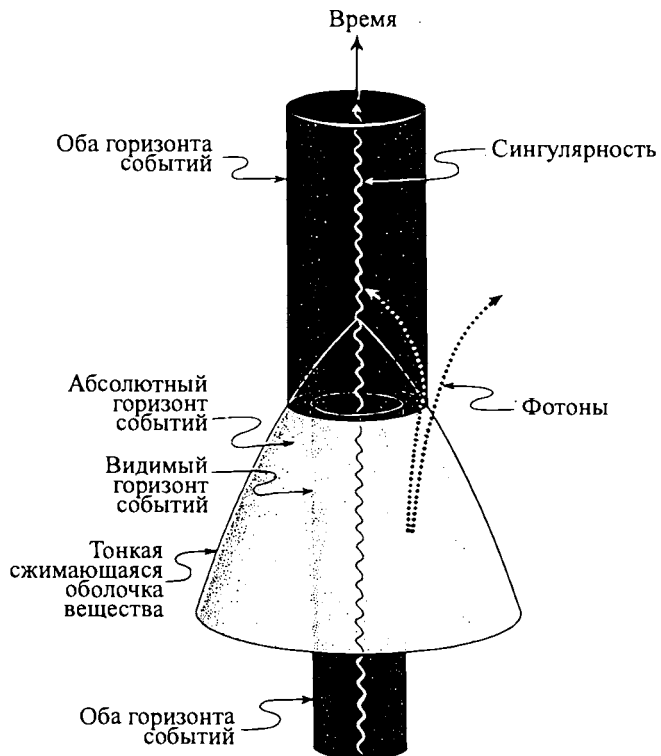
12. Испарение черных дыр

понятие о нем нарушает сложившиеся стереотипы о причинах и следствиях. Когда вещество падает внутрь черной дыры, абсолютный горизонт событий начинает расти («следствие») до того, как вещество ее достигает («причина»). Горизонт событий растет в ожидании того, что вещество будет вскоре захвачено и увеличит силу гравитационного притяжения черной дыры (Врезка 12.2). Этот кажущийся парадокс имеет простую причину. Само определение абсолютного горизонта событий зависит от того, что произойдет в будущем: смогут ли сигналы, в конце концов, уйти во внешнюю Вселенную. В философской терминологии это *телеологическое* определение (определение, опирающееся на «конечные причины»), что и делает эволюцию горизонта событий телеологической. Поскольку телеологическая точка зрения практически не используется в современной физике, рассмотрение абсолютного горизонта событий представлялось бессмысленным.

Врезка 12.2

Эволюция видимого и абсолютного горизонтов событий аккрецирующей черной дыры

Эта пространственно-временная диаграмма иллюстрирует скачкообразную эволюцию видимого горизонта и телеологическую эволюцию абсолютного горизонта событий. В некоторый начальный момент време-



ни (на горизонтальном участке внизу диаграммы) старая невращающаяся черная дыра окружена тонкой сферической оболочкой вещества. Оболочка подобна поверхности воздушного шара, а черная дыра — как пещера в центре шара. Силы гравитации черной дыры действуют на оболочку (поверхность шара) и заставляют ее сжиматься до полного поглощения черной дырой (пещерой). В тот момент, когда сжимающаяся оболочка достигает критической поверхности черной дыры, внезапно появляется *видимый горизонт событий* (самая дальняя граница, за которую не могут выйти световые лучи, показанные на рисунке пунктиром). *Абсолютный горизонт событий* (граница между событиями, которые могут, и событиями, которые не могут посылать световые лучи во внешнюю Вселенную) начинает расширяться *до того*, как черная дыра поглощает оболочку. Он расширяется *в ожидании* поглощения оболочки, сразу после этого приходит в состояние покоя и оказывается в том же месте, что и внезапно появившийся видимый горизонт событий.

Хокинг оказался смелым мыслителем. Более других физиков он был готов исследовать новые радикальные направления, если он «чувствовал», что они правильные. В случае с абсолютным горизонтом событий он почувствовал правильность выбранного направления и, несмотря на его радикальный характер, он поверил в него. И эта вера сполна отплатила ему. Хокинг и Джеймс Хартл за несколько месяцев смогли вывести из законов общей теории относительности Эйнштейна систему элегантных уравнений, описывающих гладкое и непрерывное расширение абсолютного горизонта событий и изменений его формы в предвкушении поглощения падающего космического мусора или гравитационных волн или в предвкушении действия сил гравитации со стороны других тел.

* * *

В ноябре 1970 г. Стивен Хокинг только начинал делать успехи в физике. Он уже сделал несколько важных открытий, но еще не был знаменит. Продвигаясь по этой главе, мы увидим, как росло его влияние.

Как Хокинг, несмотря на серьезные проблемы со здоровьем, смог обойти таких научных лидеров, как Роджер Пенроуз, Вернер Израэль и (как мы увидим позже) Якова Борисовича Зельдовича? Они могли пользоваться руками, они могли рисовать картинки и проводить длиннейшие вычисления на бумаге — вычисления, в которых приходится по ходу дела записывать много сложных промежуточных результатов, возвращаться назад, рассматривать их поочередно и объединять, чтобы получить окончательный результат. Трудно представить себе, чтобы

12. Испарение черных дыр



Стивен Хокинг со своей женой Джейн и сыном Тимоти в Кембридже (Англия, 1980 г.) [Фото Кипа Торна]

такие вычисления можно было проделать в голове. К началу 1970-х годов руки Хокинга были почти полностью парализованы, он не мог ни рисовать картинки, ни записывать уравнения. Ему приходилось рассчитывать только на свою голову. Так как Хокинг постепенно терял контроль над руками, у него было много времени, чтобы приспособиться. Он постепенно тренировал свой мозг и приучал его размышлять в несвойственной другим физикам манере. Он прибегает к интуитивным мысленным образам и уравнениям, которые заменили для него бумагу. Мысленные образы и уравнения оказались для Хокинга более мощным орудием при решении некоторых проблем, чем старые бумажные методы. Он постепенно научился концентрироваться на решении именно тех проблем, для которых его умственный метод оказался наиболее действенным. И в этом ему не было равных.

Инвалидность Хокинга давала ему возможность не отвлекаться на второстепенные дела. Как он часто говорил, она освободила его от необходимости читать лекции студентам. Поэтому он имел гораздо больше свободного времени для научных исследований, чем его более здоровые коллеги. Что более важно, его болезнь давала ему новый импульс к жизни.

АБС поразил Хокинга в 1963 г. вскоре после окончания средней школы при Кембриджском университете. АБС — общее название целого ряда заболеваний, поражающих моторные функции головного мозга, большинство из которых быстро приводят к смертельному

исходу. Думая о том, что у него осталось всего несколько лет, Хокинг вначале потерял весь свой энтузиазм и к жизни, и к физике. Однако к зиме 1964—1965 гг. выяснилось, что он болен редкой разновидностью АБС, разновидностью, которая, к счастью, дает возможность жить еще достаточно долго. Внезапно жизнь показалась ему прекрасной. Он вернулся к физике с энергией и энтузиазмом, которых, пожалуй, у него не было и в студенческую пору. И, со вновь возникшей жаждой жизни, он вступает в брак с Джейн Уайлд, которую он встретил в самом начале болезни и в которую тогда же влюбился. Брак Стивена и Джейн положил начало плодотворной работе ученого и счастливой совместной жизни в течение долгих десятилетий (1960—1980-е годы). Несмотря на все напасти, Джейн сумела организовать нормальный быт в доме.

Самую счастливую улыбку в своей жизни мне довелось увидеть на лице Стивена августовским вечером 1972 г. во французских Альпах, когда мы с Джейн и их двумя старшими детьми, Робертом и Люси, вернулись с многочасовой экскурсии в горах. По своей глупости мы пропустили последний подъемник и вынуждены были спускаться вниз пешком почти на тысячу метров. Когда на пороге столовой появились Джейн, Роберт и Люси, Стивен, которого настолько беспокоило наше опоздание, что он даже не мог есть, расцвел в широченной улыбке и слезы навернулись на его глаза.

Конечности и затем голос отказывали Хокингу постепенно. В июне 1965 г., когда мы с ним впервые встретились, он прогуливался с тросточкой, а его голос только слегка дрожал. К 1970 г. ему понадобилось специальное приспособление для ходьбы. К 1972 г. он был прикован к моторизованной инвалидной коляске и в основном потерял способность писать, но питался по-прежнему самостоятельно, и большинство англоязычных людей, хотя и с трудом, но понимали его речь. К 1975 г. он больше уже не мог есть самостоятельно, и понимать его могли только люди, привыкшие к его речи. К 1981 г. даже мне было очень трудно его понимать, если мы не находились в абсолютно тихой комнате. В 1985 г. он перенес операцию на легких, которая была совершенно необходима, но цена за операцию была слишком высока: он потерял возможность говорить. Для того чтобы компенсировать эту потерю, он приобрел компьютерный синтезатор голоса с американским акцентом, за который ему постоянно приходилось извиняться. Когда в меню на экране компьютера появляется нужное слово, он выделяет его, сжимая рукой контакты переключателя. Выделяя с помощью переключателя слово за словом, он составляет нужную фразу. Хоть и медленно, но эффективно. В минуту у него получается не

12. Испарение черных дыр

больше одного короткого предложения, и эти предложения четко произносятся синтезатором. И какие предложения!

По мере того как речь его ухудшалась, Хокинг научился ценить каждую фразу. Он находил способы излагать свои идеи во все более ясной и сжатой манере. Вынужденная краткость способствовала ясности мысли, которая производила все большее впечатление на коллег; более того, порой он стал производить впечатление пророка. Когда он излагает мысли по проблемным вопросам, мы, его коллеги, подчас не знаем, что и думать: то ли он строит всего лишь предположения, то ли твердо уверен в том, что говорит. Иногда нам кажется, что он, обладая уникальной способностью к озарениям, просто подтрунивает над нами. Он сохранил любовь к проказам, которая делала его таким популярным в студенческие годы в Оксфорде. Чувство юмора редко изменяет ему, даже в моменты тяжелых испытаний. (Незадолго до его операции на легких я начал плохо понимать его речь. Я помню, как однажды я просил его много раз подряд: «Стивен, я все-таки не понял, пожалуйста, повтори». Слегка разочарованно он повторял, пока я, наконец, понял: он рассказывал мне чрезвычайно забавную шутку. Когда, в конце концов, я уловил ее смысл, он довольно усмехнулся.)

Энтропия

Говоря о способностях Хокинга, которые позволяли ему опережать своих коллег, я должен признать, что это у него *не всегда* получалось. Одно из своих самых значительных поражений он потерпел от Джекоба Бекенштейна, одного из студентов Джона Уилера. Однако это поражение, как мы увидим, принесло Хокингу и большой триумф: он сделал открытие, что черные дыры могут испаряться. Из оставшейся части этой главы читатель узнает об извилистой дороге к этому открытию.

Термодинамика черных дыр — вот то поле, на котором Хокинг потерпел поражение. Термодинамика — это набор физических законов, которые управляют случайным статистическим поведением большого количества атомов, например, атомов, которые входят в состав комнатного воздуха или в состав всего Солнца. Статистическое поведение атомов включает, кроме всего прочего, их случайные тепловые движения; соответственно, законы термодинамики включают законы, которые управляют теплотой. Отсюда название *термодинамика*.

За год до того как Хокинг открыл свою теорему площади, Деметриос Кристодулу, 19-летний студент из группы Уилера в Принстоне, заметил, что уравнения, описывающие медленные изменения свойств

черных дыр (например, когда они медленно аккрецируют газ), напоминают некоторые уравнения термодинамики. Это сходство было поразительным, но не было никакого основания считать, что это нечто большее, нежели совпадение.

Сходство усиливалось теоремой площади Хокинга: эта теорема очень сильно напоминала *второй закон термодинамики*. По сути дела, теорема площади в том виде, как она цитировалась в этой главе, становится вторым законом термодинамики, если мы заменим фразу «площади горизонтов событий» словом «энтропия»: *измерим в некоторой области пространства и в некоторый момент времени (в произвольной системе отчета) всю имеющуюся энтропию. Затем через произвольно большое время снова измерим полную энтропию. Если между измерениями ничего не приходило и не уходило через «стенки» области пространства, то полная энтропия не могла уменьшиться, она могла стать только больше.*

Что это за штука, называемая «энтропией», которая только возрастает? Это величина «случайности» в выбранной области пространства, а увеличение энтропии означает, что эта величина все время возрастает.

Говоря более точно (см. Врезку 12.3), энтропия — это логарифм количества способов, которыми могут распределяться атомы и молекулы в нашей выбранной области без изменения макроскопических свойств этой области³. Когда существует много различных способов распределения атомов и молекул, то существует огромное количество микроскопических случайностей и энтропия велика.

Закон увеличения энтропии (второй закон термодинамики) имеет большое значение. В качестве примера представьте себе, что в нашей комнате, где, естественно, есть воздух, разбросано несколько скомканных газет. Воздух и бумага вместе имеют меньшую энтропию, чем они обладали бы в том случае, если бы мы подожгли эти газеты и они сгорели бы с выделением углекислого газа, водяных паров и небольшого количества пепла. Другими словами, в комнате, содержащей просто воздух и бумагу, меньше способов случайного распределения молекул, чем в комнате, содержащей воздух, углекислый газ, водяные пары и пепел. Бумага легко загорается от простой искры, но никакой процесс горения не обратит углекислый газ, воду, пепел и

³ Законы квантовой механики гарантируют, что количество способов распределения атомов и молекул всегда конечно. Определяя энтропию, физики часто умножают логарифм этого количества способов на константу, которая для нас не существенна: $\ln 10 \times k$, где $\ln 10$ — это «натуральный логарифм» 10, т.е. 2,30258, а k — постоянная Больцмана = $1,38062 \times 10^{-16}$ эрг на градус Цельсия. В этой книге я буду игнорировать эту константу.

12. Испарение черных дыр

воздух в бумагу. При горении энтропия возрастает, при обратном процессе она бы уменьшалась. Горение мы наблюдаем повседневно, с обратным процессом не приходилось сталкиваться никому.

Врезка 12.3

Энтропия в детской

Представьте себе квадратную детскую комнату, в которой лежат двадцать игрушек. Пол выложен большими плитками, всего их сто (10×10). Папа навел в комнате порядок и сложил все игрушки на самый северный ряд плиток. Папу совершенно не занимало, на какой плитке будет лежать та или иная игрушка, поэтому все они оказались случайно распределены. Мерой этой случайности является количество способов их распределения по плиткам (что совершенно не волновало папу), т. е. количество способов, которыми двадцать игрушек могут быть распределены по десяти плиткам северного ряда. Это число равно $10 \times 10 \times 10 \times \dots \times 10$, т. е. 10^{20} (20 — количество игрушек).

Это число, 10^{20} , описывает величину случайного распределения игрушек. Но это довольно громоздкое описание, поскольку 10^{20} очень большое число. Проще производить операции с логарифмом числа 10^{20} , т. е. с числом сомножителей (10), которые нужно перемножить, чтобы получить 10^{20} . Этот логарифм равен двадцати. *Этот логарифм числа способов распределения игрушек по плиткам и есть энтропия игрушек.*

Теперь представьте себе, что в комнату входит ребенок и начинает играть с игрушками, повсюду их разбрасывает, а потом уходит. Папа возвращается и видит беспорядок. Теперь игрушки гораздо более случайно распределены, чем прежде. Их энтропия выросла. Папе все равно, где находится каждая игрушка; его волнует то, что они теперь разбросаны по всей комнате. Сколько же есть способов разбросать игрушки по всей комнате? Очевидно, что это число составляет $100^{20} = 10^{40}$ способов. Логарифм этого числа равен 40, т. е. ребенок увеличил энтропию игрушек с 20 до 40.

«Ага, но затем папа снова может убрать комнату и понизить энтропию игрушек вновь до 20, — можете возразить вы, — разве это не нарушает второй закон термодинамики?» Вовсе нет. В результате папиной уборки энтропия игрушек может быть уменьшена, но энтропия папиного тела и комнатного воздуха возрастет: ему понадобится много энергии, дабы вновь убрать игрушки, энергии, которая выделилась в результате «сжигания» углеводов его организма. Сжигание превратило упорядоченные жировые молекулы в беспорядочные продукты отхода, например, в углекислый газ, который папа выдыхал в комнате. Увеличение суммарной энтропии папиного тела и комнаты (увеличения количества способов распределений их атомов и молекул) гораздо больше, чем уменьшение энтропии игрушек.

Еще в ноябре 1970 г. Стивен Хокинг заметил удивительное сходство своего закона возрастания площади со вторым законом термодинамики, но он считал это сходство простым совпадением. Надо быть сумасшедшим, или, по крайней мере недалеким, думал Хокинг, чтобы провозглашать, что площадь горизонта событий черной дыры и есть ее, в некотором смысле, энтропия. В конце концов, в черной дыре нет ничего случайного. Черная дыра — это противоположность случайности; это воплощенная простота. Как только черная дыра приходит в состояние покоя (излучив гравитационные волны; рис. 7.4), она становится «лысой»: все ее свойства в точности определяются всего лишь тремя параметрами — ее массой, угловым моментом и электрическим зарядом. Никакой случайности!

Джекоба Бекенштейна это не убедило. Он вполне допускал, что площадь черной дыры и есть ее энтропия или, точнее говоря, энтропия, умноженная на некоторую константу. Если это не так, утверждал Бекенштейн, если черные дыры имеют убывающую энтропию (вообще без случайностей), как говорил Хокинг, то черные дыры можно использовать для уменьшения энтропии Вселенной и таким образом нарушить второй закон термодинамики. Для этого нужно всего лишь собрать все молекулы воздуха из некоторой комнаты в маленький пакетик и забросить его в черную дыру. Молекулы воздуха и вся энтропия, которую они несут с собой, исчезнет из нашей Вселенной, когда пакетик войдет в черную дыру и, если энтропия черной дыры не увеличивается для компенсации этой потери, полная энтропия Вселенной уменьшится. Это нарушение второго закона термодинамики было бы чрезвычайно нежелательным, утверждал Бекенштейн. Чтобы сохранить второй закон, нужно предположить, что черная дыра должна обладать энтропией, которая увеличивается, когда пакет падает через ее горизонт событий. Бекенштейну показалось, что наиболее подходящим кандидатом на роль этой энтропии является площадь поверхности черной дыры.

Вовсе нет, отвечал Хокинг. Можно лишиться молекул воздуха, выбросив их в черную дыру, и можно также лишиться энтропии. В этом и состоит природа черных дыр. Мы всего лишь должны принять нарушение второго закона термодинамики, говорит Хокинг. Свойства черных дыр требуют этого, и, кроме всего прочего, никаких серьезных последствий не будет. Например, хотя при обычных обстоятельствах нарушение второго закона термодинамики означало бы возможность создания вечного двигателя, в случае с черной дырой никакой вечный двигатель невозможен. Это нарушение — всего лишь незначительная особенность физических законов, особенность, с которой они прекрасно уживаются.

12. Испарение черных дыр

Бекенштейна убедить не удалось. Все мировые эксперты по черным дырам оказались на стороне Хокинга — все, за исключением Джона Уилера, учителя Бекенштейна. «Ваша идея достаточно сумасшедшая и вполне может быть правильной», — сказал Уилер Бекенштейну. Воодушевленный наставлением учителя, Бекенштейн засучил рукава и принялся за работу. Он оценил, насколько должна вырасти энтропия черной дыры, когда в нее попадает пакетик с воздухом, для того чтобы спасти второй закон термодинамики. Он также оценил, насколько этот пакетик с воздухом увеличит площадь горизонта событий. Из этих приближенных оценок он вывел зависимость между энтропией и площадью, зависимость, которая *могла бы* спасти второй закон термодинамики. Бекенштейн пришел к выводу, что энтропия приблизительно равна площади горизонта событий, деленной на знаменитую *постоянную Планка—Уилера*⁴ ($2,61 \times 10^{-66}$ см²). Эта постоянная является составной частью до сих пор плохо понятых законов квантовой гравитации. (Мы узнаем о важности постоянной Планка—Уилера в следующих двух главах.) Для черной дыры с массой в десять масс Солнца эта энтропия была бы равна площади черной дыры, 11 тысяч кв. км, деленной на постоянную Планка—Уилера, $2,61 \times 10^{-66}$ см², т. е. примерно 10^{79} .

Это огромная энтропия. Она характеризует колоссальную случайность. Где же прячется эта случайность? Внутри черной дыры — заключил Бекенштейн. Внутренности черной дыры должны содержать громадное количество атомов или молекул, или чего-то в этом роде. Все они случайно распределены, и полное число возможных способов их распределений должно быть⁵.

Чепуха, отвечали ведущие специалисты по физике черных дыр, включая Хокинга и меня. Внутренности черной дыры содержат сингулярность, там нет ни атомов, ни молекул.

Тем не менее, сходство законов термодинамики со свойствами черных дыр поражало.

* * *

В августе 1972 г., когда Золотой век исследований черных дыр был в полном разгаре, ведущие мировые эксперты по черным дырам и

⁴ Постоянная Планка—Уилера определяется формулой $G\hbar/c^3$, $G = 6,670 \times 10^{-8}$ дин·см²/г² — постоянная всемирного тяготения, $\hbar = 1,055 \times 10^{-27}$ эрг·с — квантово-механическая постоянная Планка, $c = 2,998 \times 10^{10}$ см/с — скорость света. См. также сноску 2 в главе 13, сноску 6 в главе 14 и соответствующие разделы этих глав.

⁵ Логарифм числа $10^{10^{79}}$ равен 10^{79} (предполагаемая энтропия Бекенштейна). Заметим, что $10^{10^{79}}$ — это единица с 10^{79} нулями. Число этих нулей приблизительно соответствует числу атомов во Вселенной.

примерно пятьдесят студентов собрались во французских Альпах, дабы обсудить насущные проблемы физики черных дыр. Эта летняя школа проходила в том же самом местечке Лезуш, на том же самом зеленом холме напротив Монблана, где девять лет назад (в 1963 г.) я познавал тонкости общей теории относительности (глава 10). В 1963 г. я был студентом. Предполагалось, что теперь, в 1972 г., я являюсь экспертом. По утрам мы, «эксперты», читали лекции друг другу и студентам об открытиях, которые мы сделали за последние пять лет, и о нынешнем состоянии дел. Днем, как правило, продолжались наши обычные баталии: мы с Игорем Новиковым уединялись в деревянном коттедже и ломали головы над законами, которые управляют поведением газа при его аккреции на черные дыры, сопровождающейся рентгеновским излучением (глава 8). В это время на кушетках в холле летней школы мои студенты Билл Пресс и Саул Тьюкольски искали пути к пониманию того, является ли вращающаяся черная дыра устойчивой по отношению к малым возмущениям (глава 7). В пятидесяти метрах выше по склону холма Джеймс Бардин, Брендон Картер и Стивен Хокинг объединили усилия, дабы вывести из уравнений общей теории относительности Эйнштейна полный набор законов, управляющих эволюцией черных дыр. Это место было настоящим физическим раем!

К концу месяца Бардин, Картер и Хокинг определили круг *законов механики черных дыр*, которые были удивительно похожи на законы термодинамики. Каждый закон для черной дыры фактически оказался идентичным закону термодинамики, если всего лишь заменить фразу «площадь горизонта событий» на фразу «энтропия», а фразу «поверхностная гравитация горизонта» на «температуру». (Поверхностная гравитация, грубо говоря, это сила гравитационного притяжения, которую испытывает тело, находящееся в покое, прямо над уровнем горизонта.)

Когда Бекенштейн (который был одним из пятидесяти студентов этой школы) увидел превосходное соответствие между двумя группами законов, он более чем когда-либо убедился в том, что площадь горизонта событий — это и *есть* энтропия черной дыры. Напротив, мы с Бардином, Картером, Хокингом и другими экспертами видели в этом соответствии твердое доказательство того, что площадь горизонта событий *не может быть* замаскированной энтропией черной дыры. Если бы это было так, то поверхностная гравитация должна была бы быть замаскированной температурой черной дыры и эта температура не была бы нулевой. Однако из законов термодинамики следует, что любой и каждый объект с ненулевой температурой должен излучать, по крайней мере, слегка (подобно радиаторам центрального отопления

12. Испарение черных дыр

в наших домах). Но все знают, что черные дыры ничего не излучают. Излучение может падать внутрь черной дыры, но ни в коем случае не наружу.

Если бы Бекенштейн следовал своей интуиции до конца, он бы пришел к выводу, что так или иначе черная дыра *должна* иметь определенную температуру и *должна* излучать. Тогда сейчас мы бы считали Бекенштейна пророком. Однако он уступил, признав как очевидное, что черная дыра не излучает, продолжая упорно стоять на своей убежденности в энтропию черной дыры.

Излучение черной дыры

Первые догадки о возможном излучении черных дыр были сделаны Яковом Борисовичем Зельдовичем в июне 1971 г., за четырнадцать месяцев до летней школы в Лезуш. Однако тогда на это никто не обратил внимания, и теперь я испытываю чувство стыда, поскольку всегда был верным последователем и единомышленником Зельдовича. Зельдович пригласил меня в Москву для участия в работе его научно-исследовательской группы. Это была моя вторая поездка в Москву, продолжавшаяся несколько недель. В мой первый приезд, двумя годами ранее, Зельдович поселил меня в просторной квартире на Шаболовке, близ Октябрьской площади. Некоторые мои русские друзья жили в однокомнатных квартирах со своими семьями, в то время как я имел в своем распоряжении двухкомнатную квартиру со всеми удобствами. В свой второй приезд я жил более скромно, в однокомнатном номере гостиницы Академии наук недалеко от моей старой квартиры.

Однажды в половине седьмого утра меня разбудил телефонный звонок Зельдовича: «Приезжай ко мне, Кип! У меня появилась новая идея о вращающихся черных дырах!» Понимая, что кофе, чай и пирожки вполне могут подождать, я плеснул холодной водой в лицо, быстро оделся, схватил свой кейс, скатился вниз по лестнице, выбежал на улицу, влез в переполненный трамвай, пересел на троллейбус и вскоре очутился на Ленинских горах (Воробьевское шоссе, 2Б, в 10 километрах к югу от Кремля). В соседнем доме номер 4 жил Алексей Косыгин, премьер-министр СССР.⁶

Я прошел через открытые ворота в железном заборе футов 8-ми высотой и попал в заросший деревьями двор размером в четыре акра, двор, окружающий массивный, приземистый жилой дом 2Б и похожий на него дом 2А. Зельдович получил одну из восьми квартир в доме

⁶ Воробьевское шоссе — ныне ул. Косыгина. Дома перенумерованы. В конце 1980-х годов в доме номер 10 жил Михаил Горбачев.

2Б (в юго-западной части, на втором этаже) в качестве награды за участие в разработке ядерного оружия (глава 6). По московским стандартам квартира была огромная: 1500 квадратных футов. Зельдович жил там с женой, Варварой Павловой, дочерью и зятем.

Зельдович встретил меня на пороге квартиры с приветливой улыбкой. По звукам, доносившимся из комнат, было ясно, что семья его дома. Я снял обувь, одел тапочки, лежавшие рядом с дверью, и прошел за ним в гостиную, уставленную стульями и кушетками. На одной стене висела карта мира. Цветными булавками были указаны места на ней, куда приглашали Зельдовича (Лондон, Принстон, Пекин, Бомбей, Токио и т.д.) и куда он не смог выехать из-за секретного характера своей работы.

Зельдович, с пляшущим огоньком в глазах, усадил меня за длинный обеденный стол, стоявший в центре комнаты, и сказал: «Вращающаяся черная дыра должна излучать. Выходящее излучение будет падать обратно на черную дыру и постепенно замедлять ее вращение, до полной ее остановки. Когда черная дыра остановится, излучение прекратится, и дыра, приняв идеально сферическую форму, останется навсегда в состоянии покоя».

«Это самое сумасшедшее заявление, которое я когда-либо слышал», — вымолвил я. (Мне не свойственна открытая конфронтация, но Зельдович, очевидно, был заинтересован в таковой. Он хотел этого, ожидал этого и вызвал меня в Москву, в частности, для того, чтобы тренироваться на мне, как на оппоненте его идей.) «Как Вы можете делать подобное сумасшедшее утверждение? — спросил я. — Все знают, что излучение может поглощаться черной дырой, но ничего, в том числе и излучение, не может оттуда выйти».

Зельдович объяснил: «Вращающаяся металлическая сфера излучает электромагнитные волны. Подобно этому вращающаяся черная дыра должна испускать гравитационные волны».

Типичное доказательство Зельдовича — подумал я. Голая физическая интуиция, основанная всего лишь на аналогии. Зельдович не очень-то хорошо разбирается в общей теории относительности, чтобы вычислить, что должна делать черная дыра; вместо этого он рассчитывает поведение вращающейся металлической сферы. Затем он утверждает, что черная дыра должна вести себя аналогичным образом, и будит меня в полседьмого утра, чтобы проверить свое утверждение.

Однако я уже был свидетелем того, как Зельдович делает свои открытия на основании гораздо меньших предпосылок. Например, в 1965 г. он заявил, что при взрыве огромной звезды образуется совершенно сферическая черная дыра (глава 7). Это его утверждение ока-

12. Испарение черных дыр

залось правильным и явилось предпосылкой для вывода о том, что черные дыры не имеют «волос». Поэтому я осторожно продолжал: «Я никогда не думал, что вращающаяся металлическая сфера вызывает электромагнитное излучение. Каким образом?»

«Излучение настолько слабое, — объяснил Зельдович, — что никто и никогда его не наблюдал и даже не предсказал. Однако оно должно быть. Металлическая сфера будет излучать, поскольку на нее действуют электромагнитные *флуктуации вакуума*. Аналогично, черная дыра излучает, поскольку гравитационные флуктуации вакуума соприкасаются с ее горизонтом событий».

В 1971 г. я был слишком глуп, чтобы осознать все значение этого замечания, но спустя несколько лет оно стало для меня ясным. Все предыдущие теоретические исследования черных дыр были основаны на законах общей теории относительности Эйнштейна, и эти исследования недвусмысленно показывали: черная дыра не может излучать. Однако мы, теоретики, знали, что общая теория относительности является только приближением истинных законов гравитации — приближением, которое может превосходно подходить к черным дырам, но все-таки это приближение.⁷ Мы были уверены, что истинные законы должны быть квантово-механическими, поэтому мы называли их законами квантовой гравитации. Хотя эти законы квантовой гравитации представлялись нам весьма смутно, Джон Уилер в 1950-х годах пришел к выводу, что следствием из этих законов являются *гравитационные флуктуации вакуума*, мельчайшие, непредсказуемые флуктуации кривизны пространства-времени, флуктуации, которые существуют, даже если в пространстве-времени нет никакой материи и если из него удалить все гравитационные волны, т. е. если это будет идеальный вакуум (Врезка 12.4). Зельдович, опираясь на свою электромагнитную аналогию, предсказывал, что эти гравитационные флуктуации вакуума заставляют вращающиеся черные дыры излучать. «Но каким образом?» — спросил я, весьма озадаченный.

Врезка 12.4

Флуктуации вакуума

Флуктуации вакуума для электромагнитных и гравитационных волн — это то же, что «клаустрофобное» вырождение движения для электронов.

⁷ См. последний раздел главы 1: «Характер физических законов».

Вспомним (глава 4), что если электрон ограничить в небольшой ячейке пространства, то как бы мы ни пытались его остановить, законы квантовой механики вынуждают электрон двигаться все время случайным и непредсказуемым путем. Именно это «клаустрофобное» вырождение движения является источником давления, с помощью которого белые карлики сопротивляются сжатию под действием собственных сил гравитации.

Подобно этому, нам никогда не удастся удалить из некоторой области пространства все электромагнитные и гравитационные колебания. Законы квантовой механики говорят о том, что всегда остаются некоторые случайные, непредсказуемые колебания, т. е. случайные и непредсказуемые электромагнитные и гравитационные волны. Это и есть флуктуации вакуума, которые, по Зельдовичу, будут «щекотать» вращающуюся металлическую сферу или черную дыру и заставлять их излучать.

Эти флуктуации вакуума нельзя остановить, удалив их энергию, потому что в среднем они не обладают никакой энергией. Кое-где и кое-когда они приобретают положительную энергию, «одолженную» ими в других местах, а эти другие места приобретают вследствие этого отрицательную энергию. Совсем как в банках, которые не разрешают своим вкладчикам долго иметь негативный баланс, законы физики вынуждают области с отрицательной энергией быстро пополнять свои запасы за счет положительной энергии своих соседей, восстанавливая, таким образом, свою энергию до нулевого или даже до положительного значения. Этот непрерывный обмен энергией, имеющий случайный характер, и вызывает флуктуации вакуума.

Точно так же, как вырожденные движения электрона становятся все более сильными, если ограничивать электрон в ячейке все меньшего и меньшего размера (глава 4), вакуумные флуктуации электромагнитных и гравитационных волн в ограниченных областях усиливаются, т. е. они больше для более коротких волн. Как мы увидим в главе 13, это будет иметь глубокие последствия для природы сингулярности в центрах черных дыр.

Электромагнитные вакуумные флуктуации хорошо изучены и часто применяются в современной физике. Например, они играют ключевую роль в работе люминесцентной лампы. Электрический разряд возбуждает атомы ртути в трубке, и затем случайные электромагнитные вакуумные флуктуации «щекоют» каждый возбужденный атом, вынуждая его время от времени излучать часть своей энергии возбуждения в виде электромагнитной волны (фотона)*. Это излучение называется *спонтанным*, потому что когда физики открыли этот эффект, они не поняли, что он вызван вакуумными флуктуациями. Еще один пример. Внутри лазера случайные электромагнитные вакуумные флуктуации интерferируют с когерентным светом (интерференция в

* Этот «первичный» фотон поглощается фосфоресцирующим покрытием на стенках трубки, которое, в свою очередь, излучает «вторичные» фотоны; их мы и воспринимаем как свет лампы.

12. Испарение черных дыр

смысле Врезки 10.3) и модулируют свет лазера непредсказуемым образом. Это приводит к тому, что фотоны покидают лазер в случайные и непредсказуемые моменты времени. Это явление называется *фотонный дробовой шум*.

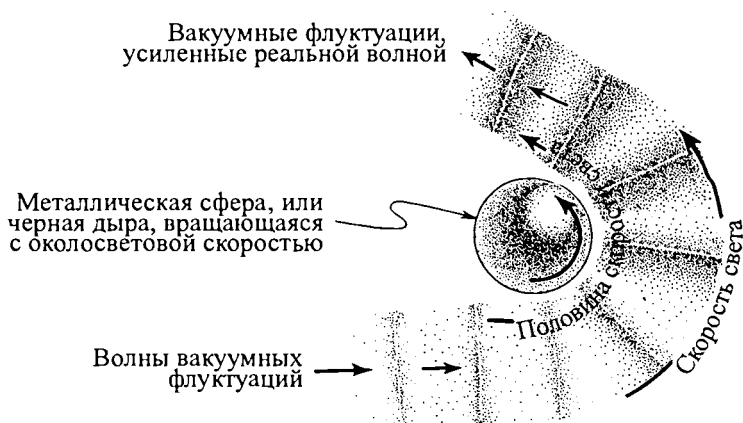
В отличие от электромагнитных вакуумных флуктуаций гравитационные флуктуации вакуума никогда не наблюдали экспериментально. Современная технология, хотя и с большим трудом, могла бы обнаружить гравитационные волны от мощных столкновений черных дыр (глава 10), но не волны от гораздо более слабых вакуумных флуктуаций.

Зельдович вскочил на ноги, подбежал к доске на стене напротив карты, одновременно начал рисовать на ней и объяснять. Его рисунок (рис.12.1) изображал волну, летящую к вращающемуся объекту, скользящую вдоль его поверхности и улетающую прочь. Волна может быть электромагнитной, а вращающееся тело — металлической сферой, объяснял Зельдович, или же гравитационной волной, а тело — черной дырой.

Зельдович объяснил, что исходная волна — это не «реальная» волна, а, скорее, флуктуация вакуума. Когда эта флуктуационная волна обегает вокруг вращающегося тела, она ведет себя подобно конькобежцам на повороте: внешние бегуны должны пробежать поворот на большой скорости, а внутренние движутся гораздо медленнее. Подобно этому, внешние части волны движутся с очень большой скоростью, скоростью света, а внутренние — движутся гораздо медленнее света, по сути дела, гораздо медленнее скорости вращения поверхности самого тела.⁸ Зельдович сделал вывод, что в такой ситуации быстро вращающееся тело будет захватывать флуктуационную волну и ускорять ее, подобно тому как мальчишка все быстрее и быстрее крутит вокруг себя за резинку свою рогатку. Ускорение передает часть вращательной энергии тела волне, усиливая ее. Эта новая усиленная порция волны является «реальной волной» с положительной общей энергией, в то время как исходная, не усиленная порция остается флуктуацией вакуума с нулевой общей энергией (Врезка 12.4). Таким образом, вращающееся тело использовало флуктуацию вакуума как катализатор для создания реальной волны и как модель ее формы. Все это похоже на то, сказал Зельдович, как флуктуации вакуума вынуждают «спонтанно» излучать колеблющуюся молекулу (Врезка 12.4).

По словам Зельдовича, он доказал, что вращающаяся металлическая сфера излучает именно таким образом. Его доказательство было

⁸ На техническом языке это означает, что внешние части находятся в «зоне излучения», а внутренние части — в «ближней зоне».



12.1. Механизм Зельдовича, согласно которому флуктуации вакуума заставляют излучать вращающееся тело

основано на законах *квантовой электродинамики*, которые появились в результате слияния квантовой механики с законами электромагнетизма Максвелла. Хотя у него не было аналогичного доказательства излучения вращающейся черной дыры, по аналогии он был совершенно уверен, что она будет излучать. В частности, он утверждал, что вращающаяся дыра будет порождать не только гравитационные волны, но и электромагнитные волны (фотоны⁹), нейтрино и всевозможные другие формы излучения, которые только могут существовать в природе.

Я был совершенно уверен, что Зельдович ошибается. Через несколько часов, когда мы так и не пришли к соглашению, Зельдович предложил мне пари. В новеллах Э.Хемингуэя Зельдович прочел о «Белой лошади», элегантно-изысканном сорте виски «White Horse». Если детальные расчеты на основе физических законов покажут, что вращающаяся черная дыра излучает, я должен буду привезти ему из Америки бутылку «Белой лошади». Если же расчеты покажут отсутствие излучения, Зельдович должен будет поставить мне бутылку марочного грузинского коньяка.

Я принял пари. Но я понимал, что скоро разрешить его не удастся. Для этого требовалось гораздо более полное понимание соединения общей теории относительности и квантовой механики. В 1971 г. такого понимания не было.

⁹ Напомню, что фотоны и электромагнитные волны — это две стороны одного явления; см. обсуждение двойственности волна-частица во Врезке 4.1.

12. Испарение черных дыр

Приняв это пари, я вскоре забыл о нем. У меня плохая память, а в то время мои исследования были сосредоточены совершенно на другом. Зельдович, однако, не забыл. Спустя несколько недель после спора со мной он написал статью и послал ее в журнал. Возможно, рецензент отклонил бы рукопись, если бы она пришла от другого человека; аргументация была слишком эвристичной, чтобы ее легко принять. Но имени Зельдовича оказалось достаточно, и статья была опубликована. Мало кто обратил на нее внимание. Излучение черных дыр казалось просто невероятным.

Спустя год на летней школе в Лезуш мы, «эксперты», все еще игнорировали идею Зельдовича. Я не помню, чтобы ее вообще упоминали.¹⁰

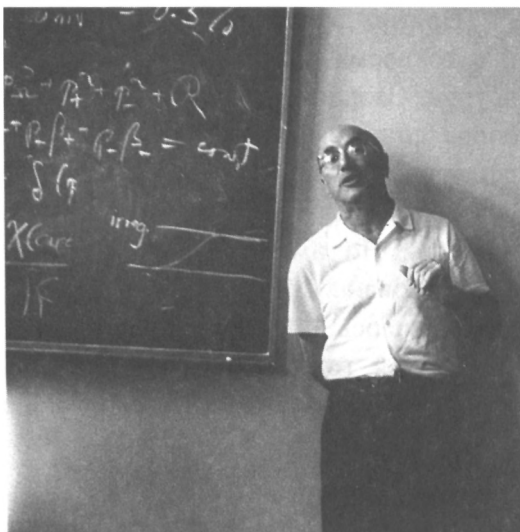
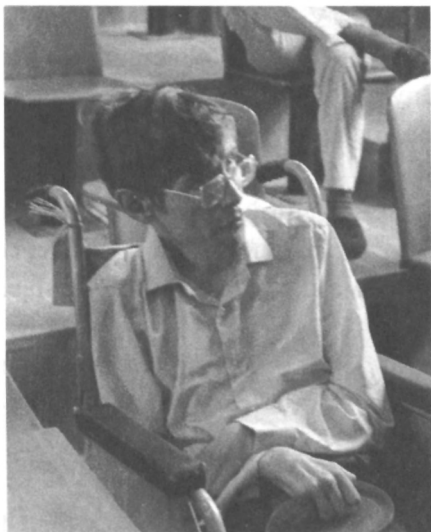
* * *

В сентябре 1973 г. я снова приехал в Москву, на этот раз сопровождая Стивена Хокинга и его жену Джейн. Это была первая поездка Стивена в Москву со времени его студенчества. Все мы вместе с Зельдовичем (нашим «хозяином» с советской стороны) решили, что именно мне, как знатоку Москвы, следует взять на себя роль гида-переводчика.

Мы остановились в гостинице «Россия», рядом с Красной площадью и Кремлем. Почти каждый день Хокинг читал лекции в том или ином институте, или мы все вместе посещали музеи и театры. Однако наши встречи с советскими физиками проходили большей частью в гостиничном номере Хокинга с видом на собор Василия Блаженного. Многие ведущие советские физики-теоретики побывали в этом номере, дабы побеседовать с Хокингом.

Среди тех физиков, которые неоднократно приезжали к нам в «Россию», были Зельдович и его студент Алексей Старобинский. Хокингу очень понравились Зельдович со Старобинским, и он им понравился тоже. Однажды Старобинский рассказал о гипотезе Зельдовича, согласно которой вращающаяся черная дыра должна излучать, и об успехах в области объединения квантовой механики с общей теорией относительности, достигнутых ими (на основании более ранних работ Брюса де Витта, Леонарда Паркера и др.). Затем он изложил доказательство, основанное на этом объединении, доказательство того, что черная

¹⁰ Это отсутствие интереса было тем более знаменательно, потому что незадолго до этого Чарльз Мизнер в Америке показал, что реальные волны могут быть усилены вращающейся черной дырой, так, как это показано на рис. 12.1. Это усиление, названное Мизнером «суперсиянием», возбудило у всех живейший интерес.



Слева: Стивен Хокинг на лекции летней школы в Лезуш (лето, 1972 г.). *Справа:* Яков Борисович Зельдович у доски в своей московской квартире (лето, 1971 г.) [Фото Кипа Торна]

дыра действительно излучает. Казалось, Зельдович был на пути к тому, чтобы выиграть пари, которое мы с ним заключили.

Из всего услышанного Хокингом в Москве это заинтересовало его больше всего. Однако он скептически отнесся к тому, как Зельдович и Старобинский объединяли законы общей теории относительности с законами квантовой механики. Поэтому после возвращения в Кембридж он предпринял самостоятельные попытки такого объединения и использовал их для проверки утверждения Зельдовича о том, что вращающиеся дыры должны излучать.

В то же время некоторые другие физики в Америке занимались тем же самым, и среди них Уильям Унру, недавний ученик Уилера, и Дон Пейдж, мой студент. К началу 1974 г. Унру и Пейдж, каждый на свой манер, нащупали доказательства предсказания Зельдовича: вращающаяся черная дыра, пока вращается, должна излучать. Я должен был признать свое поражение.

Черная дыра сжимается и взрывается

Затем разорвалась бомба. Стивен Хокинг в начале на конференции в Англии, а затем в краткой статье в журнале *Nature* объявил об ошеломляющем предсказании, противоречащем гипотезе Зельдовича, Старобинского, Пейджа и Унру. Расчеты Хокинга подтверждали, что

12. Испарение черных дыр

вращающаяся черная дыра должна излучать и замедлять свое вращение. Однако они также предсказывали, что когда черная дыра останавливается, ее излучение *не прекращается*. Даже после остановки она продолжает испускать все возможные виды излучения (гравитационное, электромагнитное, нейтрино) и при излучении продолжает терять энергию. Если раньше дыра черпала вращательную энергию из пространственной воронки вне горизонта событий, то теперь она вынуждена черпать ее из самой себя!

Не менее удивительным оказался еще один результат расчетов Хокинга: спектр излучения (т. е. количество энергии, излучаемой на данной длине волны) был в точности подобен спектру теплового излучения горячего тела. Другими словами, черная дыра ведет себя точно так же, как если бы ее горизонт событий имел конечную температуру, пропорциональную силе поверхностной гравитации черной дыры. Это (если бы Хокинг оказался прав) неопровержимо доказывало бы, что законы механики черных дыр Бардина—Картера—Хокинга по сути дела *являются* замаскированными законами термодинамики, т. е., как заявлял Бекенштейн двумя годами ранее, черная дыра имеет энтропию, пропорциональную площади ее поверхности.

Расчеты Хокинга пошли еще дальше. После того как вращение черной дыры замедлится, ее энтропия и площадь горизонта событий станут пропорциональны ее массе в квадрате, а температура и поверхностная гравитация — массе, деленной на площадь. Следовательно, поскольку черная дыра продолжает излучать, преобразуя массу в исходящую энергию, ее масса уменьшается, так же как энтропия и площадь, а температура и поверхностная гравитация возрастают. Черная дыра сжимается и становится горячее. По сути дела, она испаряется.

Черная дыра, которая недавно образовалась в результате взрыва звезды (и поэтому имеет массу больше двух масс Солнца), имеет очень низкую температуру: менее 3×10^{-8} градуса выше абсолютного нуля (0,03 микрокельвина). Таким образом, испарение в начале очень медленное, такое медленное, что черной дыре потребуется больше 10^{67} лет (т. е. в 10^{57} раз больше возраста современной Вселенной), чтобы заметно сжаться. Однако по мере того как черная дыра сжимается и нагревается, она будет излучать все сильнее и ее испарение будет ускоряться. В конце концов, когда масса черной дыры уменьшится до некоторого значения (1000—100 000 000 тонн), а горизонт событий сожмется и станет в несколько раз меньше атомного ядра, звезда станет настолько горячей (1 триллион—100 000 триллионов градусов), что она взорвется за доли секунды.

Многие специалисты в общей теории относительности и квантовой теории мирового уровня были совершенно уверены, что Хокинг ошибся. Его вывод нарушал все, что они знали о черных дырах. Возможно, он неправильно выстроил свою концепцию о частичном объединении общей теории относительности с квантовой механикой; или же он сделал это правильно, но ошибся в расчетах.

Следующие несколько лет ученые тщательно исследовали концепцию Хокинга и сопоставляли ее со своими, а также они проверяли расчеты Хокинга излучения от черных дыр. Постепенно, один за другим, они соглашались с Хокингом и принимали его концепцию. Новые законы, возникавшие из этой концепции, получили название *законов квантовых полей в искривленном пространстве-времени*. Эти законы рассматривали черную дыру как объект общей теории относительности в искривленном пространстве-времени, не обладающий квантовомеханическими свойствами. А гравитационные волны, электромагнитные волны и другие типы излучений рассматривались как *квантовые поля*, другими словами, как волны, подверженные законам квантовой механики, и которые поэтому ведут себя и как волны, и как частицы (см. Врезку 4.1). [Полное слияние общей теории относительности и квантовой теории, т. е. корректные законы квантовой гравитации, трактовали бы любой объект, включая искривленное пространство-время вокруг черной дыры, как квантовомеханический, т. е. подверженный принципу неопределенностей (Врезка 10.2), корпускулярно-волновому дуализму (Врезка 4.1) и вакуумным флуктуациям (Врезка 12.4). Мы поговорим об этом полном слиянии и некоторых следствиях из него в следующей главе.]

Как же можно было достигнуть согласия в вопросе о фундаментальных законах квантовых полей в искривленном пространстве-времени, когда не было никаких экспериментов, которые могли бы помочь определиться? Как ученые могли признать правоту Хокинга, не имея никакого экспериментального подтверждения? Их уверенность происходила из требования согласованности. (Если бы соединение законов квантовых полей и законов искривленного пространства-времени было не вполне согласованным, тогда разные толкования законов могли бы привести к различным следствиям: иногда получалось бы, что черные дыры не могут излучать, а иногда, что они должны всегда излучать. Бедные физики, не зная во что верить, могли бы просто лишиться работы.)

Новые объединенные законы должны были согласовываться с законами искривленного пространства-времени ОТО в отсутствие квантовых

12. Испарение черных дыр

полей и с законами квантовых полей в отсутствие искривления пространства-времени. Такое объединение и требование идеального согласования подобно полностью разгаданному кроссворду и позволяет определить форму новых законов практически¹¹ полностью. Если существует последовательное объединение законов (а оно должно быть, если стремление физиков познать Вселенную вообще имеет смысл), то они могут быть объединены только описанным способом и при общем согласии.

Требование согласования законов физики часто используется как инструмент при поиске новых законов. Однако это требование ранее не играло такой большой роли. Например, когда Эйнштейн создавал свои законы ОТО (глава 2), необходимость согласования не подсказала ему исходную предпосылку, а именно, что гравитация есть следствие искривления пространства-времени; этой предпосылке Эйнштейн обязан своей интуиции. Когда он осознал необходимость этой предпосылки, оказалось, что законы ОТО прекрасно согласуются с законами гравитации Ньютона, когда гравитация слаба, и с законами СТО, когда гравитация отсутствует вообще, т. е. форма новых законов определилась почти однозначно и стала ключом в открытии Эйнштейном уравнения поля.

* * *

В сентябре 1975 г. я приехал в Москву в пятый раз и привез бутылку «Белой лошади» для Зельдовича. К моему удивлению, я обнаружил, что несмотря на то, что все западные ученые уже согласились с Хокингом и поняли, что черные дыры могут испаряться, никто в Москве не верил расчетам и выводам Хокинга. Хотя результаты Хокинга были подтверждены новыми, совершенно различными методами и информация об этом была опубликована в 1974–75 гг., в СССР об этом мало кто знал. Почему? Потому что в это не верили Зельдович и Старобинский. Они продолжали утверждать, что в процессе излучения черная дыра должна замедлять свое вращение и, в конце концов, перестать излучать совсем. Поэтому она не может испариться полностью. Я пытался спорить с Зельдовичем и Старобинским, но бесполезно: они знали гораздо больше меня о квантовых полях в искривленном

¹¹ Слово «практически» связано с рядом неопределенностей в операции, называемой «перенормировкой», с помощью которой вычисляется суммарная энергия, переносимая вакуумными флуктуациями. Эти неопределенности были описаны Робертом Уолдом (бывшим студентом Уилера); они не влияют на испарение черной дыры. По-видимому, полностью от них нельзя избавиться до создания полной квантовой теории гравитации.

пространстве-времени и хотя (как обычно) я был совершенно уверен, что правда на моей стороне, я не мог опровергнуть их доводов.

Я должен был вернуться в Америку во вторник 23 сентября. Вечером в понедельник, когда я упаковывал сумки, в моей комнате в гостинице «Университетская» зазвонил телефон. Это был Зельдович: «Приезжай ко мне, Кип! Я хочу поговорить об испарении черных дыр!» Времени у меня было в обрез, и на частной машине по незнакомому мне маршруту я поспешил к Зельдовичу. У меня возникло чувство, что мы заблудились, но когда мы повернули на Воробьевское шоссе, я успокоился. Сказав шоферу «спасибо», я вышел из машины напротив дома 2Б, быстрым шагом миновал калитку и, пройдя густо заросший деревьями двор, поднялся по ступенькам на второй этаж дома в квартиру Зельдовича.

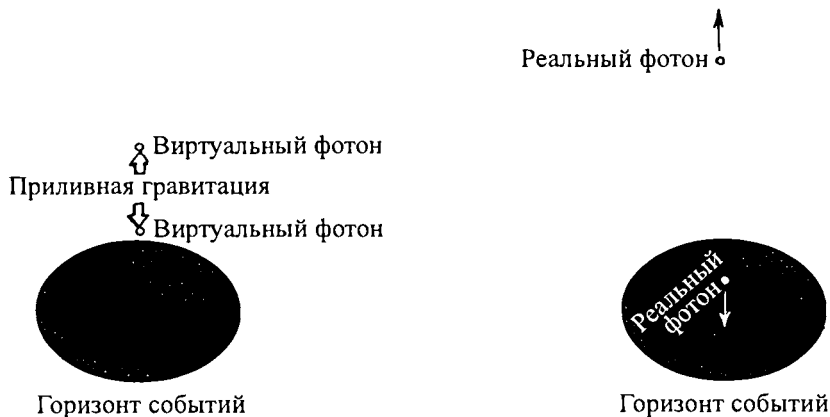
Зельдович и Старобинский встретили меня на пороге с поднятыми вверх руками, но с ухмылками на лицах. «Мы сдаемся, Хокинг прав, а мы ошибались!» В течение часа они объясняли мне свою версию законов квантовых полей в искривленном пространстве-времени вокруг черной дыры. Вначале казалось, что их версия полностью отличается от версии Хокинга. На самом деле они были совершенно эквивалентны. Но в расчеты Зельдовича и Старобинского вкралась ошибка, и они сделали вывод, что черные дыры не могут испаряться. Исправив ошибку, они согласились с Хокингом.

* * *

В зависимости от того, каким способом будут сформулированы законы квантовых полей в искривленном пространстве-времени вокруг черной дыры, можно по-разному описать ее испарение. Однако во всех случаях источником излучения являются флуктуации вакуума. Проще всего описать излучение черной дыры следующим образом, пользуясь корпускулярной, а не волновой картиной.

Подобно «настоящим» волнам с положительной энергией флуктуации вакуума имеют корпускулярно-волновую природу, т. е. являются одновременно волнами и частицами (Врезка 4.1). Их волновую природу мы уже отмечали (Врезка 12.4): флуктуации происходят случайным и непредсказуемым образом, при этом положительная и отрицательная энергии моментально возникают то тут, то там, а средняя энергия равна нулю. Корпускулярную природу можно описать в рамках понятия виртуальных частиц, которые возникают парами и живут очень короткое время за счет энергии, заимствованной у соседних областей пространства, после чего аннигилируют и исчезают, отдавая вновь свою энергию смежным областям. В случае электромагнитных флуктуаций вакуума виртуальными ча-

12. Испарение черных дыр



12.2. Механизм испарения черных дыр с точки зрения наблюдателя, падающего внутрь. *Слева:* приливная гравитация черной дыры растаскивает пару виртуальных фотонов друг от друга, снабжая их энергией. *Справа:* виртуальные фотоны, получив достаточное количество энергии, материализуются в реальные фотоны, один из которых улетает прочь от черной дыры, а другой падает в ее центр

стищами являются *виртуальные фотоны*; в случае гравитационных флуктуаций вакуума — *виртуальные гравитоны*¹².

На рис. 12.2 показано, каким образом флуктуации вакуума заставляют испаряться черные дыры. В системе отсчета наблюдателя, падающего внутрь черной дыры, возле горизонта событий черной дыры появляется пара виртуальных фотонов (слева). Виртуальные фотоны могут легко отделиться друг от друга, пока они оба остаются в области с положительной энергией электромагнитного поля. Эта область может быть и крошечной, и очень большой, поскольку флуктуации вакуума возникают во всех диапазонах. Однако размеры области всегда будут соответствовать длине флуктуирующей электромагнитной волны, так что виртуальные фотоны могут удалиться друг от друга только на одну длину волны. Если длина волны примерно равна окружности черной дыры, то виртуальные фотоны могут легко отдалиться друг от друга на четверть этой длины окружности, как показано на рисунке. Приливные силы гравитации возле горизонта событий очень сильны; они очень

¹² Читатель, вероятно, уже знаком с понятиями материи и антиматерии, в частности, с парой электрон–позитрон (частица–античастица). Точно так же, как электромагнитное поле отражает полевую природу фотона, существует «электронное поле», которое отражает полевую природу электрона и позитрона. В тех местах, где из-за вакуумных флуктуаций электронное поле моментально возрастает, может возникнуть пара виртуальный электрон–виртуальный позитрон; там, где из-за флуктуаций поле уменьшается, электрон и позитрон аннигилируют и исчезают. Античастицей фотона является сам фотон, поэтому виртуальные фотоны возникают и исчезают парами, как и гравитоны.

активно расталкивают виртуальные фотоны друг от друга, сообщая им большую энергию, как это представляется падающему на черную дыру наблюдателю, который находится на полпути между ними. Увеличения энергии фотонов к тому времени, как они будут находиться на расстоянии, равном четверти окружности горизонта событий, хватит для превращения фотонов в настоящие, долгоживущие фотоны (правая часть рис. 12.2). И у них еще остается достаточно энергии, чтобы отдать ее обратно смежным областям пространства с отрицательной энергией. Фотоны, ставшие теперь реальными, отделяются друг от друга. Один попадает внутрь горизонта событий и навсегда потерян для внешней Вселенной. Другой ускользает от черной дыры, унося с собой энергию (следовательно, и массу¹³), полученную за счет приливных сил гравитации. Черная дыра, у которой уменьшилась масса, немного сжимается.

Этот механизм излучения частиц совершенно не зависит от того, что частицы — фотоны и им соответствуют электромагнитные волны. Механизм одинаково хорошо будет работать для всех других видов частиц-волн (т. е. для всех других типов излучения: гравитационного, нейтрино и т. д.); иными словами, черная дыра испускает *все* виды излучения.

Перед тем как виртуальные частицы материализуются в реальные, они должны находиться на расстоянии меньшем, чем примерно длина соответствующей волны. Но для того чтобы получить от приливных сил гравитации черной дыры энергию, достаточную для материализации, они должны удалиться друг от друга примерно на четверть длины окружности черной дыры. Это означает, что длины волн частиц, излучаемых черной дырой, должны быть не менее четверти длины окружности черной дыры.

Черная дыра с массой в два раза больше массы Солнца имеет длину окружности 35 км, и излучаемые ею частицы, соответственно, имеют длину волны 9 км и больше. По сравнению со световыми или обычными радиоволнами это гигантские длины волн, но они не сильно отличаются от длин гравитационных волн, которые излучала бы черная дыра при столкновении с другой черной дырой.

* * *

В начале своей научной карьеры Хокинг старался быть предельно скрупулезным в своих исследованиях. Он никогда ничего не утверждал

¹³ Вспомним, что масса и энергия полностью конвертируемы друг в друга, т. е. это просто два разных имени для одного понятия.

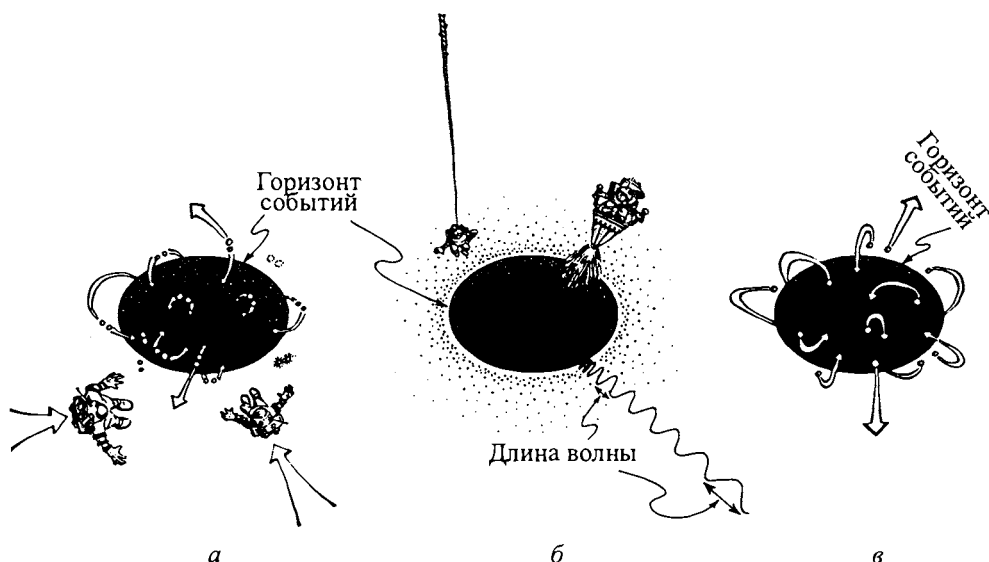
12. Испарение черных дыр

до тех пор, пока не получал неоспоримых доказательств. Однако к 1974 г. он изменил свою позицию. «Я бы предпочел быть правым, а не скрупулезным», — твердо заявил он мне. Большая скрупулезность требует больше времени. К 1974 г. Хокинг поставил перед собой цель добиться полного слияния ОТО и квантовой механики, а также понять происхождение Вселенной — цель, для достижения которой требовалось огромное количество времени и сосредоточенности. Возможно, он ощущал недостаток отведенного ему времени острее, чем другие люди. Причиной, естественно, была его болезнь. Поэтому Хокинг считал уже возможным пренебрегать излишней тщательностью, не уделяя слишком много внимания детальному объяснению всех аспектов своих открытий. Он должен был двигаться вперед с огромной скоростью.

Так случилось, что Хокинг, получив в 1974 г. твердое доказательство того, что черная дыра излучает так, как если бы она имела температуру, пропорциональную ее поверхностной гравитации, сразу перешел к утверждению, без соответствующего доказательства, что *все* остальные подобия между законами механики черных дыр и законами термодинамики — более чем простое совпадение. По его мнению, законы черных дыр — это *то же самое*, что и законы термодинамики, но в замаскированном виде. Из этого утверждения и твердо доказанного соотношения между температурой и поверхностной гравитацией Хокинг вывел точную зависимость между энтропией черной дыры и площадью ее поверхности: энтропия в 0,10857... раза больше площади поверхности, деленной на постоянную Планка—Уилера¹⁴. Другими словами, невращающаяся черная дыра с массой десять солнечных масс имеет энтропию $4,6 \times 10^{78}$. Это примерно то же самое, что говорил Бекенштейн.

Бекенштейн, конечно, был уверен в правоте Хокинга и очень радовался его выводам. К концу 1975 г. Зельдович, Старобинский, я и другие коллеги Хокинга склонны были согласиться с ним. Однако это согласие было не полным, пока мы не осознали всю глубину случайности, таящейся в черной дыре. Для описания «внутренностей» черной дыры существуют различные способы и при этом без изменений ее внешнего вида (массы, углового момента и заряда). Но что собой представляют эти «внутренности»? И как с физической точки зрения можно понять тепловое поведение черной дыры — тот факт, что дыра ведет себя совершенно так же, как обычное тело, имеющее некую температуру? И когда Хокинг начал заниматься исследованиями кван-

¹⁴ Странный множитель 0,10857 фактически равен $1/(4 \ln 10)$, где $\ln 10 = 2,30258$, что следует из моей «нормировки» энтропии; см. сноску 3 на с. 426.



12.3. (а) Наблюдатели, падающие в черную дыру (два маленьких человечка в скафандрах), видят, что вакуумные флуктуации вблизи горизонта событий черной дыры состоят из пар виртуальных частиц. (б) С точки зрения наблюдателей над горизонтом событий, находящихся в покое по отношению к нему (маленький человечек, висящий на веревке, и второй, которого поддерживает реактивный двигатель), вакуумные флуктуации состоят из горячей атмосферы реальных частиц; это «ускоренная» точка зрения. (в) Кажется, что частицы этой атмосферы, с «ускоренной» точки зрения, излучаются горячим, похожим на мембрану горизонтом. Они отлетают на короткие расстояния и большинство из них притягивается назад к горизонту событий. Однако некоторое количество частиц ухитряются ускользнуть от притяжения черной дыры и испариться во внешнее пространство

товой гравитации и происхождения Вселенной, Поль Дэвис, Билл Унру, Роберт Уолд, Джеймс Йорк, я и многие другие коллеги Хокинга нацелились на решение этих вопросов. В течение следующих десяти лет мы постепенно пришли к новому пониманию, которое показано на рис. 12.3.

Рис. 12.3а изображает флуктуации атома у черной дыры так, как их видят наблюдатели, падающие внутрь через горизонт событий. Эти флуктуации состоят из пар виртуальных частиц. Время от времени благодаря приливным силам гравитации одна из таких пар частиц получает энергию, достаточную для превращения виртуальных частиц в реальные и для того, чтобы одна из этих частиц ускользнула от черной дыры. Эта точка зрения на вакуумные флуктуации и на испарение черных дыр рассматривалась на рис. 12.2.

Рис. 12.3б изображает другую точку зрения на вакуумные флуктуации черной дыры, со стороны наблюдателей, которые всегда находятся в покое над горизонтом событий. Для того чтобы их не поглотила

12. Испарение черных дыр

черная дыра, эти наблюдатели должны иметь достаточно большое ускорение по отношению к падающим наблюдателям, используя ракетные двигатели или просто повиснув на веревке. По этой причине точка зрения этих наблюдателей называется «ускоренной». Это также точка зрения «мембранного подхода» (глава 11).

Удивительно то, что с «ускоренной» точки зрения флуктуации вакуума состоят не из виртуальных частиц, всплывающих из небытия и уходящих в него же, но из реальных частиц, которые имеют положительную энергию и долгую жизнь (см. Врезку 12.5). Реальные частицы образуют горячую атмосферу вокруг черной дыры, очень похожую на атмосферу Солнца. С этими реальными частицами связаны реальные волны. На частицу в атмосфере, движущуюся вверх, действуют гравитационные силы и уменьшают энергию ее движения; соответственно, удаляющаяся волна подвергается гравитационному покраснению, и ее длина волны увеличивается (рис. 12.3б).

На рис. 12.3в изображено движение частиц в атмосфере черной дыры с «ускоренной» точки зрения. Кажется, что частицы излучаются горизонтом событий; большинство из них поднимаются на короткое расстояние над горизонтом событий и затем падают обратно под влиянием сильного притяжения черной дыры, но некоторым удается «ускользнуть из объятий» черной дыры. Эти ускользящие частицы и видят падающие наблюдатели как те, что появляются из виртуальных пар (рис. 12.3а). Это испаряющиеся частицы Хокинга.

С «ускоренной» точки зрения, горизонт ведет себя как мембраноподобная поверхность с высокой температурой; описание «мембранной парадигмы» см. в главе 11. Подобно тому как горячая поверхность Солнца излучает частицы (в частности, фотоны, которые освещают нашу Землю), их излучает и горячая мембрана горизонта событий черной дыры. Излучаемые мембраной частицы формируют атмосферу черной дыры, а некоторые из них испаряются. Гравитационное красное смещение уменьшает энергию частиц по мере их удаления от мембраны. Поэтому хотя сама мембрана чрезвычайно горячая, испаряющееся излучение гораздо холоднее.

Врезка 12.5

Излучение ускорения

В 1975 г. недавний студент Уилера, Уильям Унру, и независимо от него Пол Дэвис из Королевского колледжа в Лондоне сделали следующее открытие (используя законы квантовых полей в искривленном пространстве-времени): наблюдатели, движущиеся с ускорением возле горизонта событий черной дыры, будут видеть флуктуации ва-

куума не в виде виртуальных пар частиц, а в виде атмосферы реальных частиц, атмосферы, которую Унру назвал “излучением ускорения”.

Это удивительное открытие показало, что *понятие реальной частицы является относительным*, а не абсолютным; т. е. оно зависит от системы координат. Наблюдатели в свободно падающих системах отсчета, которые ныряют под горизонт событий черной дыры, не видят вне горизонта реальных частиц; они видят только виртуальные частицы. Наблюдатели в ускоренных системах отсчета, которые благодаря своему ускорению всегда остаются выше горизонта событий, видят множество реальных частиц.

Как это возможно? Как может один наблюдатель утверждать, что горизонт событий окружен атмосферой из реальных частиц, а другой — что ее нет? Ответ заключается в том, что флуктуационные волны в вакууме из виртуальных частиц не ограничены областью вне горизонта событий; частично флуктуационная волна находится под горизонтом, а частично вне его.

- Свободно падающие наблюдатели, проходящие через горизонт, могут увидеть обе части волны вакуумных флуктуаций, как ту часть, которая находится над горизонтом, так и над ним, поэтому такие наблюдатели хорошо осведомлены (проводя измерения), что такие волны являются просто вакуумными флуктуациями и, соответственно, что ее части являются не реальными, а виртуальными частицами.
- Ускоренные наблюдатели, которые все время находятся над горизонтом, могут видеть только внешнюю часть вакуумной флуктуационной волны и не могут видеть ее внутреннюю часть и, соответственно, с помощью своих измерений не могут узнать, что такая волна является только флуктуационной с виртуальными частицами. Видя только часть флуктуационной волны, они принимают ее за «реальную» — реальную волну и реальные частицы и в результате своих измерений обнаруживают вокруг горизонта атмосферу из реальных частиц.

То что реальные частицы атмосферы ускоренного наблюдателя постоянно испаряются и улетают во внешнюю Вселенную (рис. 12.3в), является отражением того факта, что эта точка зрения так же верна, как и точка зрения свободно падающего наблюдателя. То, что свободно падающий наблюдатель видит как превращение виртуальной пары в реальную с помощью приливных сил с последующим испарением одной из реальных частиц, ускоренный наблюдатель видит просто испарение одной из частиц, которая всегда была реальной и всегда находилась в атмосфере черной дыры. Обе точки зрения правильны, они отражают одну и ту же физическую реальность, рассматриваемую в разных системах отсчета.

С «ускоренной» точки зрения становится понятно не только то, почему черная дыра такая горячая, но и то, почему черные дыры так трудно обнаружить. Рассмотрим следующий мысленный эксперимент, предложенный мной и моим постдоком Войчехом Зуреком.

12. Испарение черных дыр

Бросим в атмосферу черной дыры небольшое количество вещества. Это вещество обладает некоторой энергией (и эквивалентной ей массой), угловым моментом вращения и электрическим зарядом. Из атмосферы это вещество попадет, пролетев через горизонт событий, внутрь черной дыры. Как только вещество попадет внутрь дыры, оно становится недоступным для наблюдения извне. Природу такого вещества исследовать невозможно; нельзя сказать, состоит ли оно из материи или антиматерии, из фотонов или тяжелых атомов, из электронов или позитронов. Невозможно также выяснить, где именно попало вещество в дыру. Поскольку у черной дыры нет «волос», единственное, что можно узнать, исследуя ее извне, это массу частицы, угловой момент и заряд, с которыми она вошла в атмосферу.

Спросим себя, сколько существует различных способов введения в горячую атмосферу дыры этого вещества с определенным количеством массы, углового момента и заряда. Подобный вопрос мы уже задавали в главе 12, когда рассматривали распределение детских игрушек по плиткам детской комнаты (см. Врезку 12.3). Логарифм числа способов «внедрения» частицы должен быть равен увеличению энтропии в атмосфере, в соответствии со стандартными законами термодинамики. В результате достаточно простого расчета мы с Зуреком показали, что увеличение энтропии в точности равно $\frac{1}{4}$ прироста площади поверхности горизонта событий, деленного на постоянную Планка—Уилера; это фактически и есть сам прирост площади поверхности горизонта событий, о чем говорил Хокинг еще в 1974 г. на основании математического подобия законов механики черных дыр и законов термодинамики.

В краткой форме вывод из этого мысленного эксперимента следующий: *энтропия черной дыры равна числу способов ее возникновения*. Это означает, что сформировать черную дыру с массой 10 масс Солнца и энтропией $4,6 \times 10^{78}$ можно $10^{4,6 \times 10^{78}}$ способами. Такая концепция энтропии была впервые предложена Бекенштейном в 1972 г., а в 1977 г. Хокингом и его бывшим студентом Гэри Гиббонсом дано ее весьма абстрактное доказательство.

Этот мысленный эксперимент показывает второй закон термодинамики в действии. Энергия, угловой момент и заряд, которые попали в атмосферу черной дыры, могут принимать любую форму. Это может быть воздух из комнаты (пример с которым мы рассматривали ранее в этой главе), упакованный в пакет и брошенный туда. Если пакет забросить в атмосферу черной дыры, энтропия внешней Вселенной уменьшится на величину энтропии в пакете. Однако энтропия атмосферы черной дыры, а поэтому и самой дыры, увеличится больше, чем

на величину энтропии в пакете, так что полная энтропия черной дыры и внешней Вселенной не убывает. Второй закон термодинамики будет соблюден.

Аналогичным образом, когда черная дыра испаряет частицы, ее площадь поверхности и энтропия должны понижаться; но частицы случайным образом распределяются во внешней Вселенной, увеличивая ее энтропию больше, чем на величину потери энтропии черной дырой. Второй закон термодинамики будет соблюден и в этом случае.

* * *

Сколько времени уйдет на полное испарение и исчезновение черной дыры? Ответ зависит от ее массы. Чем больше черная дыра, тем ниже ее температура и тем слабее она излучает частицы и медленнее испаряется. В 1975 г. Дон Пейдж (он был тогда одновременно моим студентом и студентом Хокинга) рассчитал, что полное время жизни черной дыры равно $1,2 \times 10^{67}$ лет, если ее масса в два раза больше массы Солнца. Время жизни пропорционально кубу массы черной дыры, поэтому дыра с массой 20 солнечных масс живет $1,2 \times 10^{70}$ лет. Эти времена настолько велики по сравнению с современным возрастом Вселенной (1×10^{10} лет), что испарение черных дыр в астрофизике не имеет большого значения. Но для понимания путей объединения ОТО и квантовой механики идея испарения черных дыр очень важна, благодаря ей появились законы квантовых полей в искривленном пространстве-времени.

Черные дыры с массой гораздо меньше двух масс Солнца (если бы они могли существовать) испарялись бы гораздо быстрее, чем за 10^{67} лет. Такие маленькие черные дыры не могут возникнуть сегодня во Вселенной, поскольку давление вырождения и ядерные силы препятствуют схлопыванию объектов столь малых масс, даже если сжимать их со всей силой, на которую способна современная Вселенная (главы 4 и 5). Но такие дыры могли образоваться во время Большого взрыва, когда плотность вещества была чудовищно высока и на него действовали давления и силы гравитационного сжатия, намного превосходящие те, что можно обнаружить в любой современной звезде.

Детальные расчеты, проведенные Хокингом, Зельдовичем, Новиковым и др., показали, что во время Большого взрыва могли возникнуть крошечные черные дыры из вещества, имеющего мягкое уравнение состояния (при котором сжатие приводит к незначительному увеличению давления). Мощные силы сжатия со стороны фрагментов окружающего вещества в очень ранней Вселенной могут приводить к

12. Испарение черных дыр

образованию крошечных черных дыр, так же как при сжатии углерода между двумя пятнами наковальни может образовываться алмаз.

Довольно заманчивым представляется способ поиска таких крошечных *первичных черных дыр* с помощью частиц, которые они испаряют. Черные дыры с массой менее 500 млрд килограммов (5×10^{14} г — это вес скромной по размерам горы) к настоящему моменту уже должны были полностью испариться, а черные дыры, которые в несколько раз тяжелее, должны сейчас интенсивно испаряться. Такие черные дыры имеют горизонты событий с размером порядка атомного ядра.

Большая часть энергии, излучаемой при испарении таких дыр, должна в настоящее время находиться в виде гамма-излучения (фотонов высоких энергий), путешествующего во Вселенной во всех направлениях. Гамма-излучение действительно существует, но его интенсивность и свойства легко можно объяснить другими механизмами. Отсутствие избыточного гамма-излучения, как показали расчеты Хокинга и Пейджа, свидетельствует о том, что в настоящее время в кубическом световом годе пространства должно быть не более 300 крошечных сильно испаряющихся черных дыр. А из этого, в свою очередь, следует, что во время Большого взрыва уравнение состояния вещества не могло быть слишком мягким.

Скептики могут сказать, что отсутствие избыточного гамма-излучения может объясняться по-другому: возможно, во время Большого взрыва образовалось много маленьких черных дыр; но физики переоценивают свое знание законов поведения квантовых полей в искривленном пространстве-времени, и черные дыры вовсе не испаряются. Мы с коллегами не придерживаемся такого скептицизма, потому что стандартные законы искривленного пространства-времени очень красиво объединяются с законами квантовых полей и дают *уникальную* систему законов, которые можно применять для квантовых полей в искривленном пространстве-времени. Несмотря на это, мы чувствовали бы себя гораздо уютнее, если бы астрономы нашли наблюдательные доказательства испарения черных дыр.

ВНУТРИ ЧЕРНЫХ ДЫР

глава, в которой физики борются с уравнением Эйнштейна и пытаются понять, что скрыто внутри черных дыр: путь в другую Вселенную? Сингулярность с бесконечными приливными гравитационными силами? Конец пространства и времени и рождение квантовой пены?

Сингулярности и другие вселенные

Что находится внутри черной дыры?

Как узнать об этом, и почему нас это вообще волнует? Никакой сигнал никогда не выйдет за пределы черной дыры, чтобы сообщить нам ответ. Ни один отважный исследователь, попавший внутрь черной дыры в поисках ответов на эти вопросы, никогда не сможет вернуться обратно или просто послать нам оттуда сообщение. Что бы ни содержалось в сердце черной дыры, никогда ничего не выйдет наружу и никак не сможет повлиять на нашу Вселенную.

Но человеческое любопытство вряд ли удовлетворит такой ответ. Особенно, если у нас есть инструменты, способные прояснить ситуацию: законы физики.

Джон Арчибальд Уилер учил нас тому, насколько важно изучение внутренностей черной дыры. В 1950-х годах он объявил, что исследование «конечной стадии» объекта, с которым произошло гравитационное «схлопывание», является своего рода поиском «священной чаши Грааля» в теоретической физике и что оно может помочь выяснить детали «пламенного альянса» между общей теорией относительности и квантовой механикой. Когда Дж. Роберт Оппенгеймер стал настаивать на том, что конечное состояние спрятано от нас горизонтом событий, Уилер не соглашался с ним (глава 6). Я подозреваю, еще и потому, что он никак не хотел согласиться с тем, что возможность взглянуть

13. Внутри черных дыр

на «пламенный союз» общей теории относительности и квантовой механики из-за горизонта событий навсегда утеряна.

Но и после того как Уилер принял идею горизонта событий, он продолжал считать, что исследование сердцевины черной дыры является «священным Граалем», за которым стоит поохотиться. Пытаясь понять, как испаряются черные дыры, мы нащупали пути слияния квантовой механики с общей теорией относительности (глава 12); точно так же, пытаясь исследовать ядро черной дыры, мы сможем подойти к полному их слиянию, т. е. открыть законы квантовой гравитации. Возможно, в природе этого ядра таятся ключи к разгадке других тайн Вселенной: уж очень похож «Большой хруст», в котором наша Вселенная может схлопнуться в точку в конце времен, на схлопывание звезды в ядро черной дыры. Поняв один процесс, мы, вероятно, сможем понять и другой.

Тридцать пять лет физики гонялись за «священным Граалем» Уилера, но результаты были весьма скромны. Мы до сих пор не знаем точно, что скрывается в сердце черной дыры, и попытки наши пока не привели к открытию законов квантовой гравитации. Но мы многое узнали — что бы ни содержала внутри себя черная дыра, это *что-то* действительно самым тесным образом связано с законами квантовой гравитации.

В этой главе описаны дальнейшие перипетии гонки за «священным Граалем» Уилера и показано, куда завела эта гонка.

* * *

Первую попытку ответить на вопрос «Что находится внутри черной дыры?» сделали Дж. Роберт Оппенгеймер и Хартланд Снайдер в 1939 г. в своем классическом расчете коллапса сферической звезды (глава 6). Хотя ответ по существу содержался в уравнениях, которые Оппенгеймер и Снайдер получили и опубликовали в своей работе, они предпочли не обсуждать полученные результаты. Может быть, они боялись, что это только усугубит полемику, разыгравшуюся в связи с их предсказанием о том, что сжимающаяся звезда «сама себя отрежет от остальной Вселенной» (сформирует черную дыру). Может быть, причиной был свойственный Оппенгеймеру научный консерватизм, его нежелание делать излишние предположения. Так или иначе, они промолчали. За них сказали их уравнения.

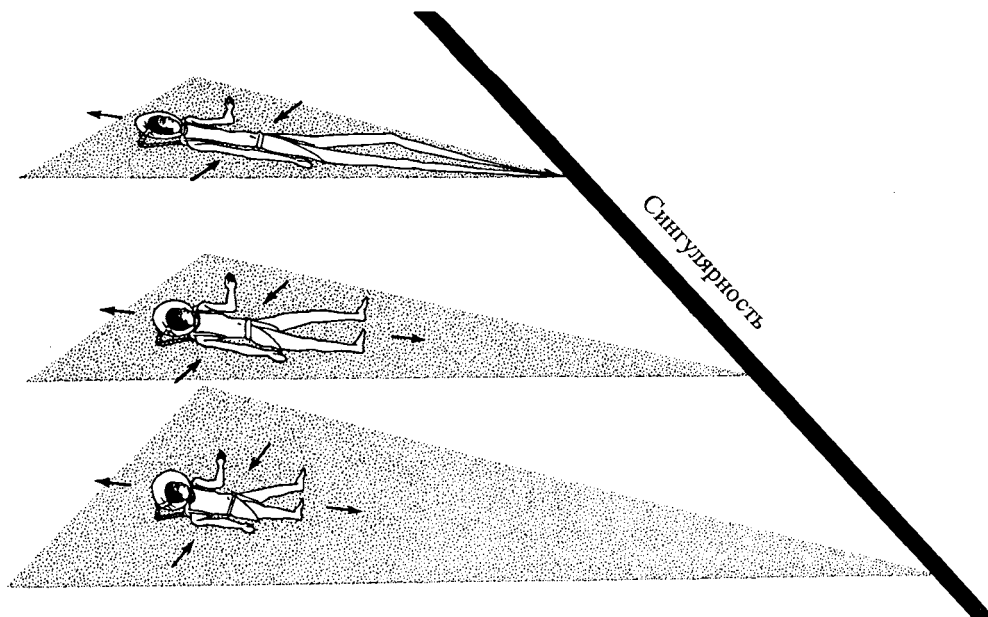
Из уравнений следовало, что после возникновения горизонта событий вокруг черной дыры сферическая звезда продолжает неуклонно сжиматься, стремясь к бесконечной плотности и нулевому объему — к *пространственно-временной сингулярности*.

Сингулярность — это область, в которой (в соответствии с законами общей теории относительности) кривизна пространства-времени становится бесконечно большой, и само пространство-время перестает существовать. Поскольку кривизна пространства-времени характеризуется приливными силами гравитации (глава 2), сингулярность представляет собой также область бесконечно больших приливных сил гравитации, т. е. область, где гравитация бесконечно вытягивает все объекты вдоль некоторого направления и бесконечно сжимает их вдоль другого.

Можно вообразить, что существует много разных типов сингулярностей пространства-времени, каждая со своими особенностями приливного расширения и сжатия. С несколькими из них мы познакомимся в этой главе.

Сингулярность, предсказанная в расчетах Оппенгеймера—Снайдера, относится к достаточно простым. Ее силы приливной гравитации подобны земным, лунным или солнечным, т. е. это те же самые силы, которые вызывают приливы и отливы земных океанов (Врезка 2.5): сингулярность растягивает все объекты в радиальном направлении (по направлению к ней и от нее) и сжимает их в поперечном направлении.

Представьте астронавта, падающего ногами вниз в черную дыру, которая описывается уравнениями Оппенгеймера и Снайдера. Чем больше черная дыра, тем дольше он сможет выжить; поэтому, чтобы он жил как можно дольше, представим себе, что дыра относится к самым большим ядрам квазаров (глава 9): 10 миллиардов солнечных масс. В некоторый момент падающий астронавт пересекает горизонт событий и влетает в черную дыру; в этот момент до его смерти остается 20 часов, но он все еще слишком далек от сингулярности и не чувствует ее приливной гравитации. Астронавт падает все быстрее и быстрее, все ближе и ближе он подходит к сингулярности; при этом приливные силы гравитации становятся все сильнее и сильнее, и за одну секунду до сингулярности он начинает чувствовать, как вытягиваются его ноги и голова и сжимается туловище по бокам (нижняя картинка на рис. 13.1). Вначале это растяжение и сжатие несильно беспокоят его, но, продолжая нарастать, за несколько сотых долей секунды до сингулярности (средняя часть рисунка) становятся такими сильными, что кости и мягкие ткани человека не выдерживают. Его тело разрывается, и он погибает. В последнюю сотую долю секунды растяжение и сжатие еще более растут и, когда астронавт достигает сингулярности, они становятся бесконечно большими; вначале его ноги, затем туловище, а потом голова бесконечно растягиваются, и в соответствии с законами общей теории относительности астронавт сливается с сингулярностью и становится ее частью.



13.1. Эта пространственно-временная диаграмма показывает, как в соответствии с расчетами Оппенгеймера—Снайдера происходит падение астронавта в сингулярность в центре черной дыры. Астронавт падает ногами вперед. Как и на всех предыдущих диаграммах (например, рис. 6.7), одно пространственное измерение отсутствует; из-за этого астронавт выглядит двумерным, а не трехмерным, как на самом деле. Сингулярность здесь имеет вид наклонной прямой (в отличие от вертикального положения на рис. 6.7 и во Врезке 12.1); ось времени направлена вверх, а ось пространства — по горизонтали. Пространство и время на этом рисунке — это собственные пространство и время астронавта; на рис. 6.7 и во Врезке 12.1 речь шла о пространстве и времени Финкельштейна

Астронавт не может пройти через сингулярность и выйти на другой ее стороне; согласно общей теории относительности, у сингулярности нет «другой стороны». Пространство и время по отдельности, а также пространственно-временные категории прекращают свое существование в сингулярности. Сингулярность — это острый край, похожий на край листа бумаги. Бумага кончается на краю; пространство-время кончается в сингулярности. Но и сингулярность кончается. Муравей может доползти по бумаге до края и вернуться обратно, но ничего не может вернуться из сингулярности; астронавты, частицы, волны — все, что попадает в нее, согласно законам общей теории относительности Эйнштейна, моментально уничтожается.

Из рис. 13.1 механизм разрушения не становится полностью понятным, поскольку рисунок игнорирует кривизну пространства. На самом деле, когда тело астронавта достигает сингулярности, оно растягива-

ется до бесконечности и сплющивается до нулевого размера в поперечном направлении. Чрезвычайно большая кривизна пространства возле сингулярности приводит к тому, что тело астронавта становится бесконечно длинным, но при этом его голова не высовывается за горизонт событий. Голова и ноги втягиваются в сингулярность, но между ними — бесконечность.

Не только астронавт испытывает бесконечное растяжение и сжатие вблизи сингулярности; в соответствии с уравнениями Оппенгеймера—Снайдера бесконечно растягиваются и сжимаются все формы материи, даже отдельные атомы, а также электроны, протоны и нейтроны, которые их составляют, даже кварки, которые входят в состав протонов и нейтронов.

Существует ли для астронавта какая-то возможность избежать этого бесконечного растяжения и сжатия? Нет, после того как он пересекает горизонт событий, шансов у него не остается. В любом месте под горизонтом событий, согласно уравнениям Оппенгеймера—Снайдера, силы гравитации настолько сильны (пространство-время так сильно деформировано), что само время (время для всех) втекает в сингулярность.¹ Поскольку астронавт, как и все остальное, неуклонно движется вперед во времени, он втягивается вместе с потоком времени в сингулярность. Неважно, что он делает, неважно, какую мощность развивают его ракетные двигатели, — он не может избежать бесконечного растяжения и сжатия, которые поджидают его у сингулярности.

* * *

Всякий раз, когда физики сталкиваются с тем, что их уравнения приводят к бесконечности, они начинают в них сомневаться. Мы полагаем, что в реальной Вселенной едва ли возможна настоящая бесконечность. Следовательно, почти всегда бесконечность есть признак ошибки.

Бесконечное растяжение и сжатие в сингулярности не были исключением. Те немногие физики, которые были знакомы с работами Оппенгеймера и Снайдера, опубликованными в 1950-х годах и в начале 1960-х годов, единодушно решили, что с уравнениями что-то не так. Но вскоре единодушие кончилось.

Одна группа ученых под руководством Джона Уилера пришла к тому мнению, что бесконечные растяжение и сжатие недвусмысленно

¹ На научном языке это звучит так: сингулярность становится «пространственно-подобной».

13. Внутри черных дыр



13.2. (То же, что на рис. 6.3.) Слева: Физические явления, происходящие с реальной звездой во время схлопывания. Справа: Идеализированная модель Оппенгеймера и Снайдера схлопывания звезды. Подробности см. в главе 6

свидетельствуют о том, что законы общей теории относительности не действуют внутри черных дыр — в конечной точке эволюции звезд после их схлопывания. Уилер настаивал на том, что законы квантовой механики должны препятствовать появлению бесконечных сил приливной гравитации; но каким именно образом? Чтобы ответить на этот вопрос, считал Уилер, необходимо объединить законы квантовой механики с законами приливной гравитации, т. е. с эйнштейновскими общерелятивистскими законами в искривленном пространстве-времени. Детище этого слияния — законы квантовой гравитации и будут управлять сингулярностью, провозгласил Уилер. Эти новые законы сотворят новые физические явления внутри черной дыры, явления, с которыми мы никогда не сталкивались прежде.

Вторая группа ученых под руководством Исаака Марковича Халатникова и Евгения Михайловича Лифшица (сотрудники московской научно-исследовательской группы Льва Ландау) увидела в бесконечном растяжении и сжатии предупреждение, что идеализированной модели схлопывающейся звезды Оппенгеймера и Снайдера нельзя доверять. Вспомним, что Оппенгеймер и Снайдер положили основным условием в своих расчетах, что звезда должна быть идеально сферической и невращающейся; что она имеет однородную плотность и нулевое давление; что у нее нет ударных волн, она не выбрасывает материю и не испускает никакого излучения (рис. 13.2). Халатников и Лифшиц предположили, что сингулярность возникает вследствие сделанной идеализации. Реальная звезда отличается незначительными,

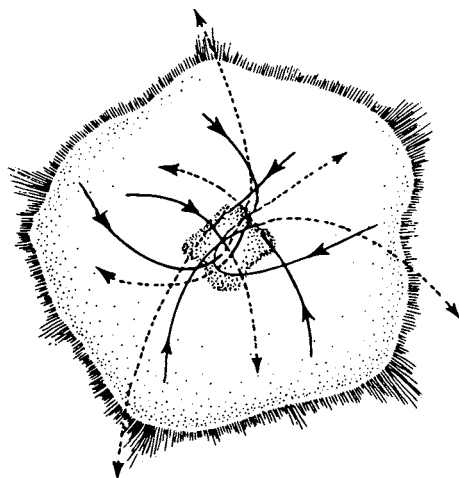
случайными деформациями (неоднородностями формы, скорости, плотности и давления), которые при ее коллапсе *увеличиваются и останавливают коллапс до образования сингулярности*. Халатников с Лифшицем также утверждали, что случайные деформации не дадут развиваться схлопыванию в Большом хрусте и таким образом спасут от сингулярности всю нашу Вселенную.

Халатников и Лифшиц пришли к этим выводам в 1961 г., когда начали исследовать с точки зрения законов Эйнштейна проблему *устойчивости сингулярности относительно малых возмущений*. Другими словами, они поставили по отношению к сингулярностям тот же вопрос, что мы поставили в главе 7 по отношению к черным дырам: если, решая уравнение поля Эйнштейна, слегка изменить (случайным образом) форму схлопывающейся звезды или Вселенной, а также ее скорость, плотность и давление составляющего ее вещества и при этом наделить вещество малым случайным гравитационным излучением, то как эти изменения (*возмущения*) повлияют на конечный результат коллапса?

На горизонт событий черной дыры, как мы видели в главе 7, возмущения не повлияют. Возмущенная, коллапсирующая звезда также формирует горизонт событий, и хотя вначале он деформирован, все его деформации быстро исчезнут, и останется черная дыра «без волос». Другими словами, горизонт событий *устойчив* по отношению к малым возмущениям.

Что касается сингулярности в центре черной дыры или в момент Большого хруста Вселенной, то из расчетов Халатникова и Лифшица следовало, что при схлопывании малые случайные возмущения должны расти, по сути дела, они становятся настолько большими, что сингулярность вообще не сможет образоваться. Предположительно (с уверенностью этого утверждать нельзя), возмущения остановят схлопывание (взрыв, направленный внутрь) и превратят его во взрыв, направленный вовне.

Как возмущения могут изменить направление взрыва? Расчеты Халатникова—Лифшица не касаются физического механизма происходящего процесса. Однако некоторые предположения о нем можно сделать, исходя из законов гравитации Ньютона, с которыми проще работать, чем с законами Эйнштейна. Например (см. рис. 13.3), если силы гравитации в коллапсирующей звезде достаточно слабы, так что можно воспользоваться законами Ньютона, и если можно пренебречь давлением звезды, тогда вследствие малых возмущений атомы со всех сторон будут смещаться по направлению к центру звезды. Большая часть атомов не попадет точно в центр, и они начнут удаляться от



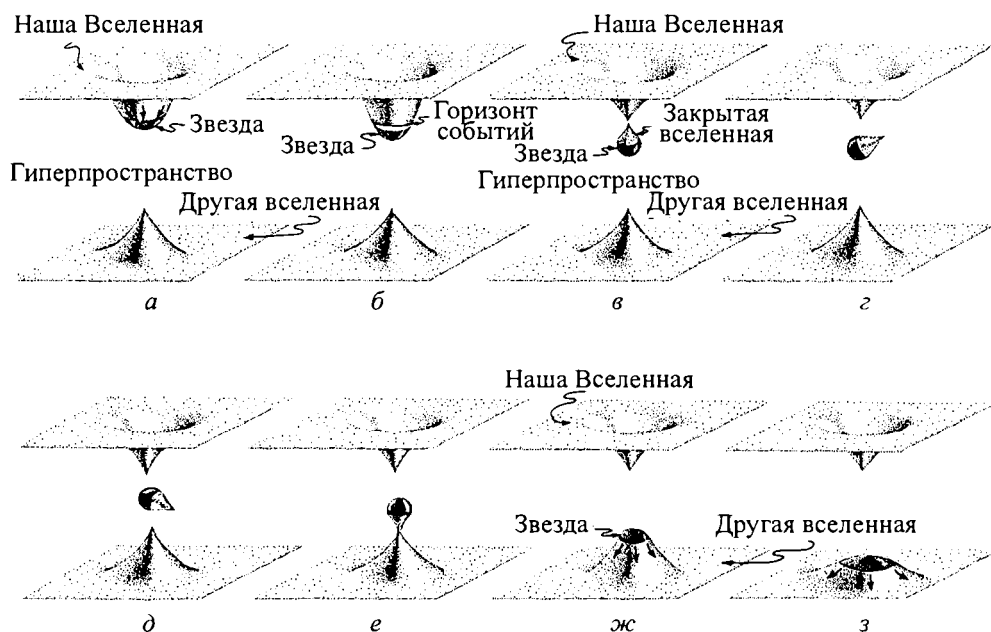
13.3. Один из механизмов, в результате которого схлопывание звезды может смениться ее взрывом. Силы гравитации достаточно слабы, что дает возможность применения ньютоновских законов, и внутреннее давление мало, т.е. им можно пренебречь. При небольшой деформации («возмущении») схлопывающейся звезды атомы в ней смещаются к центру, пролетают мимо него и начинают удаляться от центра

центра, в результате чего коллапс сменится взрывом. Хотя внутри черной дыры ньютоновские законы гравитации применять нельзя, представлялось возможным, что в результате действия некоторых механизмов, аналогичных рассмотренному выше, схлопывание может превратиться во взрыв.

* * *

Я начал работать в составе научно-исследовательской группы Джона Уилера в 1962 г., на выпускном курсе. Незадолго до этого Халатников и Лифшиц опубликовали свои расчеты, а Лифшиц вместе с Ландау издали знаменитую книгу «Теория поля», которая содержала вывод об отсутствии сингулярности. Я помню, как Уилер поставил перед нами задачу проверить эти расчеты. Он утверждал, что если они верны, выводы трудно будет переоценить. Однако расчеты были очень сложными и длинными, а опубликованных данных явно не хватало, чтобы мы могли полностью их проверить; к тому же Халатников и Лифшиц находились в Советском Союзе, за железным занавесом, и мы не могли сесть с ними рядом и обсудить все детали.

Тем не менее, мы постепенно начали считать, что коллапсирующая Вселенная по достижении некоторого очень малого размера *может*, как упругая пружина, «разжаться» и начать очередное расшире-



13.4. Возможная эволюция звезды, коллапсирующей с образованием черной дыры (далее в этой главе будет показано, что этот сценарий весьма маловероятен). Восемь диаграмм, от (а) до (з), представляют собой последовательные этапы эволюции звезды и соответствующую геометрию пространства. Звезда начинает коллапсировать в нашей Вселенной (а) и превращается в черную дыру, вокруг которой формируется горизонт событий (б). Затем глубоко внутри черной дыры от нашей Вселенной отпочковывается область пространства, содержащая звезду, и формирует маленькую закрытую вселенную, которая ни с чем больше не связана (в). Эта закрытая вселенная движется через гиперпространство (г, д), доходит до другой большой вселенной и прикрепляется к ней (е). После этого звезда взрывается, и этот взрыв происходит уже в другой вселенной (ж, з)

ние в новом «Большом взрыве». Так же и коллапсирующая звезда, после провала под горизонт событий *может* начать «разжиматься» и взорваться.

Чем может закончиться такой взрыв? Очевидно, звезда не может вновь появиться из-под горизонта событий. Законы гравитации Эйнштейна запрещают чему бы то ни было (за исключением виртуальных частиц) вылететь из-под горизонта. Однако оставалась еще одна возможность: *звезда может взорваться в другой области нашей Вселенной или даже в другой вселенной.*

На рис. 13.4 показан коллапс звезды и пришедший ему на смену взрыв. Каждая диаграмма на этом рисунке изображает искривленное пространство в нашей Вселенной, а также в другой вселенной, в виде двумерных поверхностей, находящихся в *гиперпространстве* более

13. Внутри черных дыр

высокой размерности. [Отметим, что гиперпространство — это плод воображения физиков: мы, люди, обречены жить всегда в нашей собственной Вселенной (или в другой вселенной, если сможем туда выбраться); мы никогда не сможем выбраться в окружающее гиперпространство или получить оттуда какие-либо сигналы. Гиперпространство нужно нам только как вспомогательное средство для визуализации кривизны пространства вокруг звезды, коллапсирующей в черную дыру, и для визуализации процесса коллапса звезды в нашей Вселенной и последующего ее взрыва в другой вселенной.]

Две вселенные на рис. 13.4 подобны двум островам в океане, а гиперпространство — омывающий их океан. Острова не соединяются между собой сушей; точно так же вселенные не соединены друг с другом пространством.

На диаграммах рис. 13.4 изображена последовательная эволюция звезды. Звезда начинает коллапсировать в нашей Вселенной (*а*). Она превращается в черную дыру, вокруг черной дыры образуется горизонт событий, и коллапс продолжается (*б*). Вещество в звезде сжимается настолько, что пространство вокруг нее искривляется и замыкается, образуя маленькую закрытую вселенную, напоминающую воздушный шар (*в*, *г*); эта новая маленькая вселенная отпочковывается от нашей Вселенной и начинает передвигаться самостоятельно в гиперпространстве. (Нечто похожее может произойти и на острове в океане, если туземцы построят лодку и захотят отправиться в плавание по океану.) Отпочковавшаяся вселенная со звездой внутри движется от нашей большой Вселенной к другой большой вселенной (*г*, *д*) (как лодка плывет от одного острова к другому). Маленькая вселенная достигает другой большой вселенной (*е*) (как лодка, которая пристает к берегу другого острова), расширяется и извергает из себя звезду. Наконец, звезда взрывается в другой вселенной (*ж*, *з*).

Я понимаю, что все это звучит как чистая научная фантастика. В свое время черные дыры явились прямым следствием решения Шварцшильда, полученного для уравнения поля Эйнштейна (глава 3); точно так же предложенный сценарий эволюции — непосредственный вывод из другого решения уравнения Эйнштейна, решения, найденного Гансом Райсснером и Гуннаром Нордстремом в 1916–1918 гг., но не понятого ими до конца. В 1960 г. ученики Уилера, Дитер Брилл и Джон Грейвс, раскрыли физический смысл решения Райсснера–Нордстрема. Вскоре стало ясно, что это решение с небольшими изменениями можно применить для описания коллапсирующей и взрывающейся звезды (рис. 13.4). Такая звезда отличается от звезды Оппенгеймера–Снайдера только одним существенным моментом: она электрически

заряжена, и при ее сжатии формируется сильное электрическое поле, которое некоторым образом причастно к взрыву, происходящему со звездой в другой вселенной.

* * *

Подведем итог. В 1964 г. конечные стадии эволюции звезды, которая в результате схлопывания превращается в черную дыру, выглядели следующим образом (во многом благодаря стараниям Уилера, который считал эти исследования основным делом своей жизни):

1. Известно решение уравнения Эйнштейна, предложенное Оппенгеймером и Снайдером для звезды идеальной формы (в том числе для идеальной сферы). Из этого решения следует, что в центре черной дыры возникает сингулярность с бесконечно большими приливными силами гравитации. Эта сингулярность захватывает, разрушает и проглатывает абсолютно все, что попадает в черную дыру.
2. Известно также другое решение уравнения Эйнштейна (частный случай решения Райсснера–Нордстрема) для звезды, имеющей не вполне идеальную форму или сферическую форму, но при этом еще электрический заряд. Глубоко внутри черной дыры такая звезда отпочковывается от нашей Вселенной, прикрепляется к другой вселенной (или к отдаленной области нашей собственной Вселенной) и там взрывается.
3. Было далеко не ясно, какое из этих двух решений (а возможно, ни то и ни другое) «устойчиво по отношению к малым, случайным возмущениям» и, следовательно, может иметь место в реальной Вселенной.
4. В то же время Халатников и Лифшиц утверждали, что сингулярности *всегда* неустойчивы по отношению к малым возмущениям и поэтому они никогда не возникают. Следовательно, сингулярность Оппенгеймера–Снайдера никогда не может возникнуть в нашей реальной Вселенной.
5. По поводу этого утверждения Халатникова и Лифшица среди физиков существовал некий скептицизм, по крайней мере, в Принстоне. Возможно, он был отчасти вызван желанием Уилера, чтобы эти сингулярности существовали в природе, ибо они могли стать вожеленным местом для слияния общей теории относительности и квантовой механики.

1964-й год стал переломным моментом. В этом году Роджер Пенроуз революционизировал математические инструменты, которыми мы с

13. Внутри черных дыр

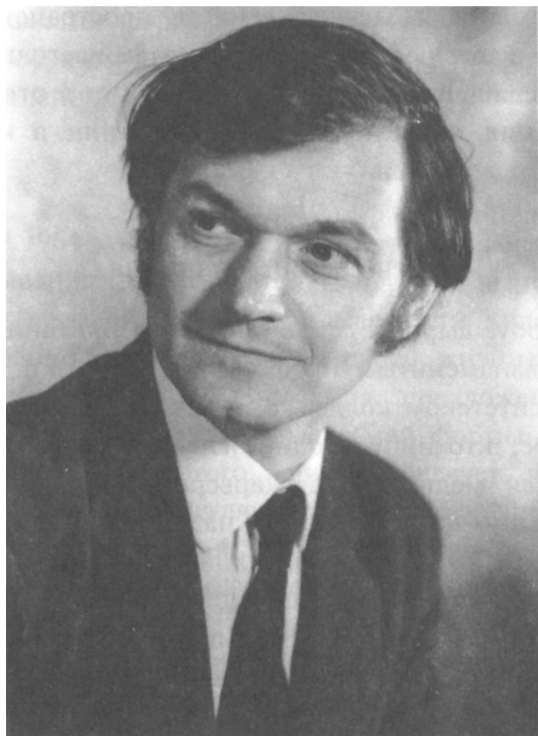
тех пор пользуемся для анализа свойств пространства-времени. Его революция была настолько важной и оказала настолько сильное влияние на поиск «священного Грааля» Уилера, что я отвлекусь от основного повествования и уделю несколько страниц в книге рассказу о Пенроузе и его революции.

Революция Пенроуза

Роджер Пенроуз вырос в семье медиков в Британии. Его мать была врачом, отец — знаменитым профессором генетики человека в Лондонском университетском колледже. Родители Роджера хотели, чтобы, по крайней мере, кто-нибудь один из четверых детей пошел по их следам и занялся медицинской карьерой. Старший брат Роджера, Оливер, совершенно не оправдал их надежд, с самого раннего возраста он намеревался заниматься физикой (и на самом деле стал одним из ведущих специалистов в мире по статистической физике, в области изучения статистических свойств большого числа взаимодействующих атомов). Младший брат Роджера, Джонатан, тоже не собирался становиться врачом; единственное, чем он хотел заниматься, — игрой в шахматы (позже он стал чемпионом Британии по шахматам и оставался им семь лет подряд). Младшая сестра, Ширли, была еще слишком молода, когда Роджер выбирал себе карьеру, и не показывала склонности ни к какому конкретному занятию. (Впоследствии именно она стала врачом и порадовала своих родителей.) Становится понятно, почему именно на Роджера родители возлагали основные надежды.

Когда Роджеру было шестнадцать лет, он вместе с другими учениками класса прошел собеседование у директора школы. Нужно было решать, какие предметы выбрать в качестве основных на последние два года, перед тем как поступать в колледж. «Я люблю математику, химию и биологию», — сказал он директору. «Невозможно. Нельзя соединить биологию с математикой. Либо то, либо другое», — заявил директор. Роджеру была более дорога математика. «Хорошо, я займусь математикой, химией и физикой», — сказал он. Когда Роджер пришел в тот вечер домой, его родители были в ярости. Они обвинили сына в том, что он связался с плохой компанией. Биология совершенно необходима для медицины; как он мог от нее отказаться?

Через два года Роджер решил, чем он будет заниматься в колледже. Роджер вспоминает, как он сказал, что хочет поехать в Лондон, поступить в университетский колледж и получить степень по математике. «Мой отец был против. Математика, утверждал он, хороша для тех, кто больше ничего не умеет делать, но карьеры из нее не сле-



Роджер Пенроуз (1964). [Фото сделано Годфри Арджентом для Британской Национальной портретной Галереи и Лондонского Королевского общества. Предоставлено Годфри Арджентом]

лаешь». Роджер настаивал на своем, и отец добился, чтобы его протестировал один из преподавателей математики, работавший в колледже. Математик пригласил юношу на собеседование и предупредил его, что, скорее всего, он решит лишь одну или две из предложенных задач. Собеседование должно было продолжаться целый день. Когда же Роджер за несколько часов правильно решил все двенадцать задач, отец сдался. Так Роджер занялся математикой.

Вначале он не собирался применять математический аппарат к физике. Его интересовала чистая математика. Но потом все изменилось.

Соблазн начался в 1952 г., когда Роджер, тогда студент четвертого курса Лондонского университетского колледжа, прослушал курс радиолекций по космологии, которые читал Фред Хойл. Лекции пленили его и побудили обратить внимание на физику, но вместе с тем немного смутили. Кое-что из того, о чем говорил Хойл, просто не могло иметь смысла! Старший брат Роджера, Оливер, изучал физику. Роджер решил навестить своего брата, к которому надо было ехать в Кембридж на поезде. В конце того же дня за обедом в Кингсвудском ресторане Роджер обнаружил, что один из коллег Оливера, Деннис

13. Внутри черных дыр

Сиама, занимается теорией стационарной Вселенной Бонди—Голда—Хойла. Замечательно! Возможно, Сиама поможет Роджеру разрешить его сомнения. «Хойл говорит, что, в согласии со стационарной теорией, удаленные галактики не будут видны в расширяющейся Вселенной; они выйдут за пределы наблюдаемой части нашей Вселенной. Я не понимаю, как это может произойти». Роджер вынул ручку и стал рисовать на салфетке пространственно-временную диаграмму. «Из этой диаграммы следует, что удаляющаяся галактика будет тускнеть и краснеть, но все-таки не исчезнет совершенно. Что в моих рассуждениях неправильно?»

Сиама был поражен. Он никогда прежде не пользовался пространственно-временными диаграммами в такого рода рассуждениях. Пенроуз оказался прав, а Хойл, очевидно, ошибался. И, что более важно, младший брат Оливера был феноменально способен!

После этого случая Деннис Сиама начал заниматься с Роджером Пенроузом по специальной программе, которую он впоследствии использует в занятиях со своими студентами в 1960-х годах (Стивеном Хокингом, Джорджем Эллисом, Брэндоном Картером, Мартином Рисом и др.; см. главу 7). Он вовлекал Пенроуза в длительные дискуссии, проводил с ним многочасовые занятия по животрепещущим проблемам физики. Сиама знал все обо всем, что происходило в физике; он заразил Пенроуза своим энтузиазмом и возбудил в нем интерес к этой науке. Вскоре Роджер был полностью увлечен. Впоследствии он защитит докторскую диссертацию по математике, но отныне именно стремление понять Вселенную будет руководить его исследованиями. Следующие несколько десятков лет он проведет, отдавая дань увлечения математике и физике одновременно.

* * *

Новые идеи часто посещают нас в самые неподходящие моменты, когда мы их меньше всего ожидаем. Мне кажется, они возникают в нашем подсознании, а подсознательная работа эффективнее всего совершается, когда сознание не очень активно. Примером тому может служить открытие, сделанное Хокингом в 1970 г. в процессе его подготовки ко сну, когда он понял, что площадь поверхности горизонта событий черной дыры всегда возрастает (глава 12). Другой пример — открытие, сделанное Роджером Пенроузом и изменившее наше понимание процессов, происходящих внутри черной дыры.

Однажды поздней осенью 1964 г. Пенроуз, в то время бывший профессором Биркбекского колледжа в Лондоне, направлялся со своим другом Ивором Робинсоном на работу. За год до этого были откры-

ты квазары, и астрономы пытались доказать, что источником их энергии является схлопывание звезд (глава 9). Весь этот год Пенроуз решал проблему, может ли коллапс реальных, случайно деформированных звезд привести к возникновению сингулярностей. Пенроуз шел и разговаривал с Робинсоном, а его подсознание работало над объединением разрозненных элементов мозаики, элементов, с которыми его сознательный разум безуспешно боролся на протяжении долгих часов.

Пенроуз вспоминает: «Мы прервали наш разговор, когда переходили дорогу, и возобновили его, ступив на противоположный тротуар. За эти несколько мгновений мне в голову пришла идея, но вновь начатая беседа стерла ее из моей памяти. Робинсон ушел, я вернулся к себе в кабинет. Странное чувство ликования охватило меня, но я не мог докопаться до его причины. Я начал перебирать в уме события дня в попытке восстановить, что явилось причиной радостного возбуждения. Среди прочих мыслей я, наконец, наткнулся на ту, что посетила меня во время перехода улицы».

Идея действительно была великолепна. Она была оригинальным дополнением к теории относительности. В последующие несколько недель Пенроуз тщательно обдумывал ее, крутил и так и сяк, прорабатывал детали, стараясь сделать ее как можно более конкретной и математически точной. Отточив идею, он написал краткую статью в журнал *Physical Review Letters*, в которой рассмотрел возникновение сингулярностей в результате звездного коллапса и доказал математическую теорему.

Приблизительно теорема Пенроуза звучит следующим образом. Предположим, что какая-то звезда — она может быть любого вида — коллапсирует так, что силы гравитации становятся очень большими, и вокруг нее формируется *видимый горизонт событий*. Это значит, что все испускаемые звездой световые лучи будут затягиваться обратно ее сильным полем гравитации (Врезка 12.1). После этого уже ничто не сможет препятствовать росту гравитации и образованию сингулярности. Следовательно (поскольку любая черная дыра обязательно имеет видимый горизонт событий), *каждая черная дыра должна содержать внутри себя сингулярность*.

Наиболее удивительной особенностью *теоремы сингулярности* был ее всеохватывающий характер. Она имела отношение не только к коллапсу идеализированных звезд со специфическими, идеальными свойствами (в частности, совершенно сферических по форме звезд или звезд, вовсе не имеющих давления); ее также можно было применять не только к звездам с малыми первоначальными случайными флуктуациями. Теорема оказалась применимой к любой звезде в стадии схло-

13. Внутри черных дыр

пывания, т. е. ко всем реальным коллапсирующим звездам в нашей реальной Вселенной.

Сила теоремы сингулярности Пенроуза заключалась в новом математическом аппарате, который он применил для ее доказательства. Никогда прежде физики не использовали в своих расчетах по общей теории относительности такой математический аппарат, как *топологию* искривленного пространства-времени.

Топология — область математики, качественно описывающая, как различные объекты соединяются друг с другом или сами с собой. Например, кофейная чашка и пончик с дыркой «имеют одинаковую топологию»: если допустить, что оба эти предмета сделаны из одинакового «теста», то мы можем гладким и непрерывным образом трансформировать один в другой, не разрывая, т. е. не нарушая никаких связей (рис. 13.5а). Наоборот, топология сферы отличается от топологии пончика: чтобы превратить сферу в пончик, мы должны проделать в ней дырку и изменить внутреннюю связность ее частей (рис. 13.5б).

Топология имеет дело *только* со связями, она *не* касается формы, размера или кривизны. Например, пончик и кофейная чашка имеют различную форму и кривизну, но у них одинаковая топология.

До появления теоремы сингулярности Пенроуза физики игнорировали топологию: считалось, что наиболее важную роль в общей теории относительности играет *кривизна* пространства-времени, а топология не связана с кривизной. (На самом деле, теорема Пенроуза касалась только топологии, в ней ничего не говорилось о кривизне сингулярности, т. е. не затрагивалась детальная структура приливных сил гравитации. В теореме говорилось о том, что где-то внутри черной дыры пространство-время кончается и все, что достигает этого конца, разрушается. Кривизна отвечает за то, *как* происходит это разрушение, а топология отвечает за то, что это разрушение, в принципе, происходит и что пространству-времени, в принципе, приходит конец.)

До теоремы Пенроуза мы, физики, рассматривали проблему сингулярности только с точки зрения кривизны. Мы не задавались вопросами типа: «Существует ли конец пространства-времени (существует ли край, за которым пространства-времени уже нет)?» (рис. 13.5в). Или: «Какие области пространства-времени могут посылать сигналы друг другу, а какие нет?» (рис. 13.5г). Однако общая теория относительности самым непосредственным образом связана с вопросами топологии. Первый из этих топологических вопросов очень важен для понимания сингулярностей, второй имеет непосредственное отношение к возникновению и существованию черных дыр, а также к *космологии* (к широкомасштабной структуре и эволюции Вселенной).

Эти топологические вопросы оказались такими важными, а математический аппарат топологии настолько мощным, что, фактически, Пенроуз совершил революцию в наших исследованиях, познакомив нас с топологией.

Отталкиваясь от этих весьма продуктивных идей, Пенроуз, Хокинг, Роберт Герох, Джордж Эллис и другие физики создали в середине и в конце 1960-х годов мощный математический аппарат общей теории относительности, основанный на топологических и геометрических методах. Это так называемые *глобальные методы*. Хокинг и Пенроуз в 1970 г. доказали на основе этих методов, не пользуясь никакими идеализациями, что в начале Большого взрыва и всеобщего расширения наша Вселенная должна была иметь пространственно-временную сингулярность, и если она когда-нибудь будет коллапсировать, то в Большом хрусте тоже должна появиться сингулярность. Кроме того, Хокинг в 1970 г. на основе этих глобальных методов ввел понятие абсолютного горизонта событий черной дыры и доказал, что поверхностная площадь абсолютного горизонта всегда возрастает (глава 12).

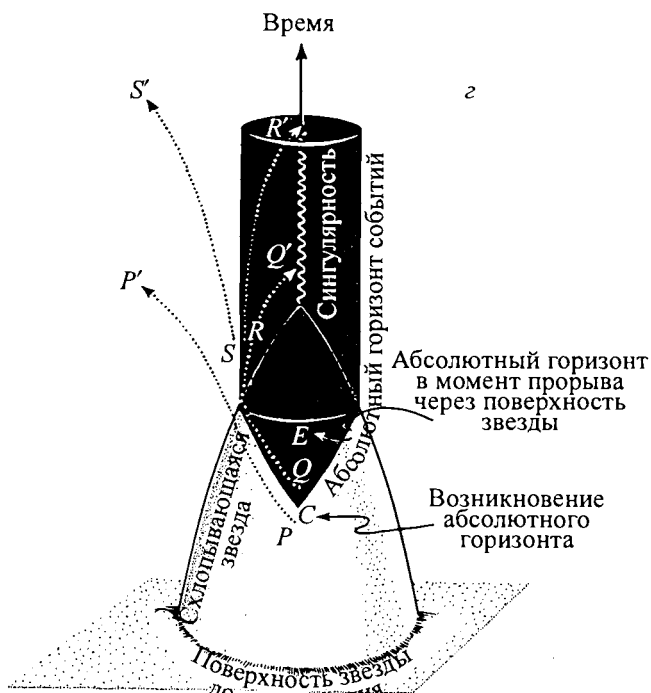
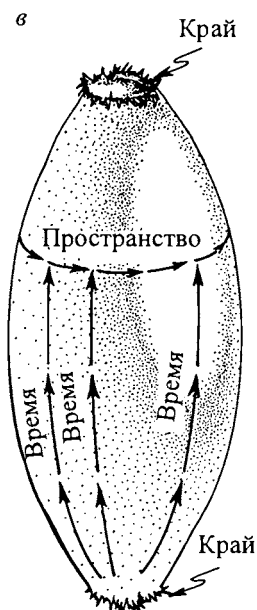
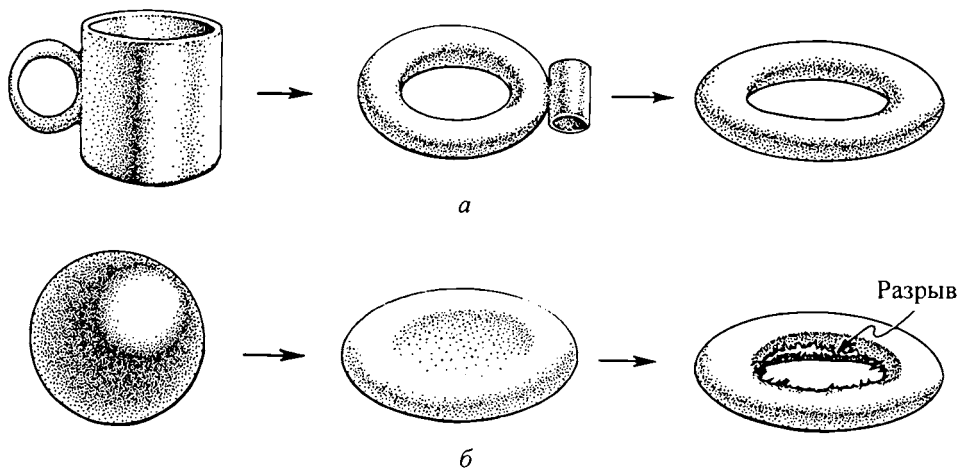
Давайте теперь вернемся в 1965-й год. Назревала дискуссия. Исаак Халатников и Евгений Лифшиц в Москве доказали (так они думали), что при коллапсе реальной звезды со случайными внутренними деформациями сингулярность в центре черной дыры *не может* возникнуть. В то же время Роджер Пенроуз в Англии доказал, что каждая черная дыра *должна* иметь сингулярность в центре.

* * *

Конференц-зал на двести пятьдесят мест был переполнен. Исаак Халатников приготовился к выступлению. Был теплый летний день, ведущие специалисты в мире по теории относительности собрались на

-
- 13.5. Все приводимые на рисунке утверждения касаются природы связей между точками; таким образом, это топологические утверждения. (а) Кофейную чашку (слева) можно гладко и непрерывно превратить в пончик (справа), не разрывая, другими словами, не меняя качественную природу связей между точками. Они имеют одинаковую топологию. (б) Чтобы превратить сферу (слева) в пончик (справа), в сфере необходимо проделать дырку. (в) Показанное на этом рисунке пространство-время имеет два резких края [аналогичных разрыву на рисунке (б)]: один край, на котором время начинается (подобно началу нашей Вселенной в Большом взрыве), а другой, — на котором оно кончается (подобно Большому хрусту). Можно, в принципе, вообразить вселенную, существующую вечно; в такой вселенной пространство-время не будет иметь краев. (г) Зачерненная область пространства-времени — внутренность черной дыры; белая область — внешняя по отношению к черной дыре область (см. Врезку 12.1). Внутренние точки не могут посылать никаких сигналов к внешним точкам

13. Внутри черных дыр



Третью международную конференцию по общей теории относительности и гравитации, проходившую в Лондоне в 1965 г. В первый раз Халатников и Лифшиц получили возможность выступить перед таким широким сообществом ученых и рассказать о своей работе, в которой они пришли к выводу об отсутствии сингулярности в черной дыре.

На протяжении нескольких десятков лет между смертью Сталина и эрой Горбачева советские ученые время от времени получали разрешение на выезд за пределы железного занавеса. В конце 1950-х годов Лифшиц практически не был стеснен в своих передвижениях, хотя и был евреем, но в то время, о котором идет речь, он находился в черном списке, и это продолжалось до 1976 г. Что касается Халатникова, то против него было два довода: он был еврей и он никогда не выезжал прежде из страны. (Получить разрешение на первый выезд было особенно тяжело.) Однако телефонный звонок вице-президента Академии наук Николая Николаевича Семенова в ЦК КПСС помог Халатникову получить разрешение на поездку в Лондон.

Халатников выступал с микрофоном в переполненном лондонском конференц-зале. Он исписал уравнениями доску на всем протяжении зала, шириной пятьдесят футов. Доказательство Халатникова не было основано на топологических методах, это были стандартные, добротные уравнения анализа кривизны пространства-времени, которыми физики пользовались вот уже несколько десятков лет. Ученый математически показал, что при схлопывании звезды случайные возмущения должны нарастать. Он сделал вывод, что если при схлопывании звезды образуется сингулярность, то она будет характеризоваться совершенно случайными деформациями кривизны пространства-времени. Далее Халатников рассказал, как они с Лифшицем искали среди всех типов сингулярностей, разрешенных законами общей теории относительности, сингулярность, характеризующуюся совершенно случайными деформациями кривизны. Он рассматривал сингулярности одну за другой, проводил их классификацию и подробно описывал их свойства. Среди этих сингулярностей ни одна не имела совершенно случайных деформаций. Поэтому Халатников сделал вывод в конце своего сорокаминутного доклада, что при коллапсе звезды со случайными возмущениями не может возникнуть сингулярность. Возмущения спасают звезду от разрушения.

Когда стихли аплодисменты, Чарльз Мизнер, один из наиболее способных учеников Уилера, вскочил и начал активно возражать. Взволнованно и энергично, говоря по-английски очень быстро, Мизнер изложил теорему, доказанную Пенроузом несколькими месяцами ранее. Если теорема Пенроуза верна, Халатников с Лифшицем *ошибаются*.



Обед дома у Исаака Халатникова (июнь 1971 г.). Слева по часовой стрелке: Кип Торн, Джон Уилер, Евгений Лифшиц, Исаак Халатников, его жена Валентина Николаевна, Владимир Белинский, дочь Халатникова Элеанора. [Предоставлено Чарльзом Мизнером]

Представители советской делегации были сконфужены и даже рассержены. Они не могли понять слишком быструю речь Мизнера. К тому же теорема Пенроуза была построена на топологических аргументах, незнакомых специалистам по общей теории относительности, поэтому советские ученые отнеслись к ней с подозрением. С другой стороны, анализ Халатникова—Лифшица был основан на испытанных методах, что позволяло им утверждать, что Пенроуз, возможно, ошибается.

* * *

В течение последующих нескольких лет специалисты по общей теории относительности как на Западе, так и на Востоке тщательно проверяли рассуждения Пенроуза, с одной стороны, и Халатникова—Лифшица, с другой. На первый взгляд, и те и другие расчеты выглядели довольно подозрительно, и в тех и в других были опасные, потенциальные изъяны. Но по мере того как специалисты все более подробно знакомились с топологическими методами Пенроуза, они все более и более убеждались в том, что прав именно он.

В сентябре 1969 г., когда я по приглашению Зельдовича работал в Москве, ко мне пришел Евгений Лифшиц и принес рукопись ста-

ты, только что написанной им в соавторстве с Халатниковым. «Пожалуйста, Кип, отвези эту статью в Америку и пошли в редакцию *Physical Review Letters*», — попросил он. Далее он объяснил, что любая статья, написанная в СССР, независимо от ее содержания, считается секретной, пока ее не рассекретят, а рассекречивание занимает не меньше трех месяцев. Законы советской системы разрешали мне, как и любому другому иностранному ученому, ознакомиться с рукописью во время нашего пребывания в Москве, но рукопись не могла покинуть пределы страны до ее просмотра цензорами. Статья, однако, была слишком ценной и срочной, и задержка ее была крайне нежелательна. Лифшиц объяснил мне, что в ней содержалась их капитуляция, признание их ошибки: Пенроуз был прав, а они ошибались. В 1961 г. они не смогли найти среди решений уравнения поля Эйнштейна то, которое содержало сингулярность с совершенно случайными деформациями, но теперь, после появления теоремы Пенроуза, Халатников, Лифшиц и бывший тогда дипломником Белинский смогли обнаружить такое решение. Эта новая сингулярность, предположили ученые, завершает коллапс случайно деформированных звезд. Ею может так же однажды закончиться разрушение нашей Вселенной в конце Большого хруста. [Сейчас, в 1993 г., я думаю, что они действительно могут быть правы. К этой точке зрения и к природе сингулярности БХЛ (Белинского—Халатникова—Лифшица) я вернусь в конце этой главы.]

Физику-теоретика очень не просто признать, что в опубликованной им статье содержится крупная ошибка. Это удар по самолюбию. Кому-кому, а мне это известно. В 1966 г. я неверно рассчитал пульсации белых карликов, и спустя два года из-за моего неправильного вывода астрономы стали считать, что вновь открытые пульсары могут быть пульсирующими белыми карликами. Когда моя ошибка была найдена, сообщение о ней появилось даже в британском журнале *Nature* от имени редакции. Это была горькая пилюля.

Подобные ошибки неприятны для всех; для советских физиков они были неприятны вдвойне. Положение ученого в Советском Союзе было таково, что из-за малейшей оплошности ему могли запретить поездки за рубеж, не говоря уже о выборах в Академию наук. А лишиться возможности увеличить свою зарплату почти в два раза и получить личную машину с шофером никому не хотелось. Поэтому для советских ученых соблазн спрятать или сгладить свои ошибки был сильнее, чем для западных. Вот почему призыв о помощи со стороны Лифшица произвел на меня сильное впечатление. Он хотел, чтобы истина восторжествовала как можно скорее. В статье прямо признавалась ошибка, а также было сказано, что в будущие издания «Теории поля» (учебник

13. Внутри черных дыр

Ландау и Лифшица по теории относительности) будут внесены изменения и будет исключена фраза о том, что при коллапсе звезды не образуется сингулярность.

Я привез рукопись в Америку, спрятав ее среди своих личных бумаг. Статью опубликовали. Это событие прошло незамеченным для советских властей.

* * *

Почему именно британский физик Пенроуз (не американский, не французский и не советский) начал применять топологические методы в исследованиях по общей теории относительности? И почему в 1960-х годах эти методы начали интенсивно и успешно внедряться другими британскими специалистами по теории относительности, в то время как американские, французские, советские и ученые из других стран не спешили их использовать?

Я полагаю, причина кроется в стиле обучения британских студентов, будущих физиков-теоретиков. Они слушают специальные курсы по математике во время учебы, затем учатся в аспирантуре на отделениях прикладной математики или прикладной математики и теоретической физики. С другой стороны, в Америке будущие физики-теоретики во время учебы в университете слушают специальные курсы по физике, а во время аспирантуры обучаются на отделениях физики. Поэтому молодые британские физики-теоретики обычно хорошо подкованы в специальных математических дисциплинах, которые редко применяются в физике, но могут не понимать физических тонкостей поведения молекул, атомов и атомных ядер. Наоборот, молодые американские физики-теоретики не стремятся узнать математику глубже, чем это нужно для освоения ими курса физики, но имеют профессиональные знания о молекулах, атомах и ядрах.

В основном мы обязаны такому положению дел тем, что американцы со времени второй мировой войны доминировали в области теоретической физики и навязали мировому сообществу физиков наш скандально низкий профессионализм в области математики. Большинство из нас оперирует математическим аппаратом пятидесятилетней давности и не способно общаться с современными математиками на их уровне. Из-за нашего слабого владения математикой мы, американцы, не смогли по достоинству оценить и начать использовать топологические методы, введенные Пенроузом.

Математическое образование, которое получают французские физики-теоретики, еще лучше, чем в Британии. Но в 1960-х и 1970-х

годах французские специалисты по теории относительности были чересчур увлечены математической стороной вопроса. Совершенствование математического аппарата подавляло их физическую интуицию, и они не смогли внести большого вклада в теорию коллапса звезд и теорию черных дыр. Хотя французские математики хорошо знали топологию, но стремление к совершенству тормозило их исследования и они не могли соревноваться с британскими учеными. Они даже и не пытались; их внимание было отвлечено другими вещами.

Уровень советской теоретической физики в 1930-х–1960-х годах определялся в основном работами Льва Давидовича Ландау, который также оказывал сопротивление внедрению топологических методов. Ландау начинал свою деятельность как физик-теоретик в Западной Европе (глава 5). Вернувшись в СССР в 1930-х годах, он ввел для студентов, изучающих теоретическую физику, ряд экзаменов по основным разделам математики и теоретической физики, так называемый «Теоретический минимум». Теоретический минимум обязаны были сдавать все молодые ученые, которые хотели попасть в его научно-исследовательскую группу. В принципе, любой человек, независимо от его образования, мог прийти с улицы и попытаться сдать эти экзамены, но сдавали их немногие. За двадцать девять лет существования практики сдачи Теоретического минимума (1933–1962 гг.) его сдали только сорок три человека; большинство из этих сорока трех стали знамениты, сделав значительные открытия в физике.

Теоретический минимум Ландау включал задачи из всех областей математики, знание которых, по мнению Ландау, было необходимо для успешных занятий теоретической физикой. Топологии среди них не было. Интегральное исчисление, теория комплексных переменных, качественная теория дифференциальных уравнений, теория групп и дифференциальная геометрия — эти разделы математики почитались важными и могли пригодиться физике в его работе. Топология важной не считалась. Ландау ничего не имел против топологии, он попросту ее игнорировал и считал, что она не имеет никакого отношения к физике. С легкой руки Ландау такое отношение к топологии распространилось среди большинства советских физиков-теоретиков и стало нормой в 1940-х–1960-х годах.

Эту точку зрения стали разделять и физики-теоретики во всем мире, особенно те, кто был знаком с серией учебников Ландау и Лифшица «Курс теоретической физики». Эти книги стали самыми знаменитыми учебниками по физике в XX столетии, но, как и в Теоретическом минимуме Ландау, топология в них игнорировалась.



Евгений Михайлович Лифшиц (слева) и Лев Давидович Ландау (справа) в квартире Ландау (на территории Института физических проблем в Москве, Воробьевское шоссе, дом 2). Снимок сделан в 1954 г. [Предоставлено женой Лифшица, Зинаидой Ивановной Лифшиц]

Интересно, что задолго до того, как Пенроуз сформулировал свою теорему, два советских математика из Ленинграда, Александр Данилович Александров и Револьт Иванович Пименов, пытались воспользоваться топологическими методами в своих исследованиях по общей теории относительности. В 1950–1959 гг. Александров пользовался топологией при изучении причинно-следственных связей в пространстве-времени, а именно, при исследовании связей между областями пространства-времени и выяснении условий, при которых эти связи могут быть установлены. Подобный топологический анализ мог оказаться очень важным в теории черных дыр. Александров создал в топологии довольно мощный и красивый математический аппарат, разработку которого впоследствии продолжил его молодой коллега, Пименов.

К сожалению, их метод не был применен в исследованиях по общей теории относительности. Александров и Пименов практически не имели связей среди физиков, которые специализировались в теории

гравитации и могли бы оценить важность их расчетов. Никто не посоветовал Александрову и Пименову исследовать сингулярность Большого взрыва или гравитационный коллапс звезд с помощью топологических методов: физики, которые могли бы это сделать, работали в 600 км к юго-востоку от Ленинграда, в Москве, и понятия не имели о топологии и топологах. Расчеты Александрова—Пименова оказались невостребованными.

Возможно, отчасти это было связано с тем, что сама судьба не благоприятствовала им в научных исследованиях. Александров стал ректором Ленинградского университета и у него просто не было времени заниматься наукой. Пименов в 1957 г. был арестован за участие в «антисоветской группе» и заключен в тюрьму на шесть лет. Через семь лет после освобождения его снова арестовали и сослали на пять лет в республику Коми, в лагерь, находящийся в 1200 км к востоку от Ленинграда.

Я никогда не встречался ни с Пименовым, ни с Александровым, но судьба Пименова продолжала будоражить ленинградских ученых спустя год после его второго ареста, в 1971 г., когда мне довелось побывать в Ленинграде. Пименов считал советское правительство коррумпированным и подобно многим молодым людям в Америке во время войны во Вьетнаме избрал путь гражданского неповиновения. В Америке это означало отказ от призыва на воинскую службу. Пименов участвовал в распространении самиздата — запрещенной литературы. Пименов получал от друзей запрещенную рукопись, делал несколько копий под копирку и затем раздавал эти копии дальше; получившие их люди повторяли процесс. Пименов был арестован, осужден и приговорен к пяти годам ссылки в республике Коми, где работал дровосеком и электриком на лесопилке. Впоследствии он стал заведующим кафедрой математики в той же республике Коми, в филиале АН СССР.

Получив возможность заниматься математикой, Пименов продолжил исследования пространства-времени топологическими методами. К тому времени топология стала основным инструментом гравитационных исследований физиков, но Пименов оставался изолированным от ведущих физиков своей страны. Его работы не получили должного признания.

В отличие от Александрова и Пименова, Роджер Пенроуз одной ногой стоял среди математиков, а другой — среди физиков. Это и послужило основой его успеха.

Наилучшие предположения

Может создаться впечатление, что благодаря теореме сингулярности Пенроуза раз и навсегда выяснилось, что находится внутри черной дыры. На самом деле это не так. Возник целый ряд новых вопросов, которые физики пытаются решить с переменным успехом, начиная с середины 1960-х годов. Сейчас, в 1993 г., мы можем сформулировать эти вопросы и ответить на них так (назовем это нашими предположениями):

1. Обязательно ли сингулярность поглощает все, что попадает в черную дыру? Видимо да, однако окончательной уверенности нет.
2. Существует ли проход через черную дыру в другую Вселенную или в другую часть нашей Вселенной? Скорее всего нет, но абсолютной уверенности в этом нет.
3. Какова судьба всего того, что попадает в сингулярность? Мы думаем, что падающие внутрь молодой черной дыры предметы разрываются на части силами приливной гравитации еще до того, как начнут действовать законы квантовой гравитации. Но падающие внутрь старой черной дыры предметы могут остаться невредимыми и испытать на себе действие законов квантовой гравитации.

Давайте остановимся на этих проблемах более подробно.

* * *

Вспомним, что Оппенгеймер и Снайдер в свое время дали ясные и недвусмысленные ответы на эти три вопроса. Если черная дыра возникает в результате коллапса идеализированной, сферической звезды, то: (1) все, что падает в дыру, поглощается сингулярностью; (2) ничего не проникает в другую вселенную или в другую часть нашей Вселенной; (3) при приближении к сингулярности все предметы бесконечно растягиваются в радиальном направлении, сжимаются в поперечном направлении (рис.13.1, вверху) и, наконец, разрушаются.

Такие ответы оказались полезными с педагогической точки зрения. Они явились стимулом для проведения более точных расчетов, помогающих глубже понять природу коллапса. В частности, Халатников и Лифшиц показали, что ответ Оппенгеймера–Снайдера неприменим к реальной Вселенной, в которой мы живем, так как случайные деформации, происходящие во всех реальных звездах, полностью изменяют внутренности черной дыры. Решение Оппенгеймера–Снайдера, описывающее черную дыру внутри, *неустойчиво по отношению к малым возмущениям*.

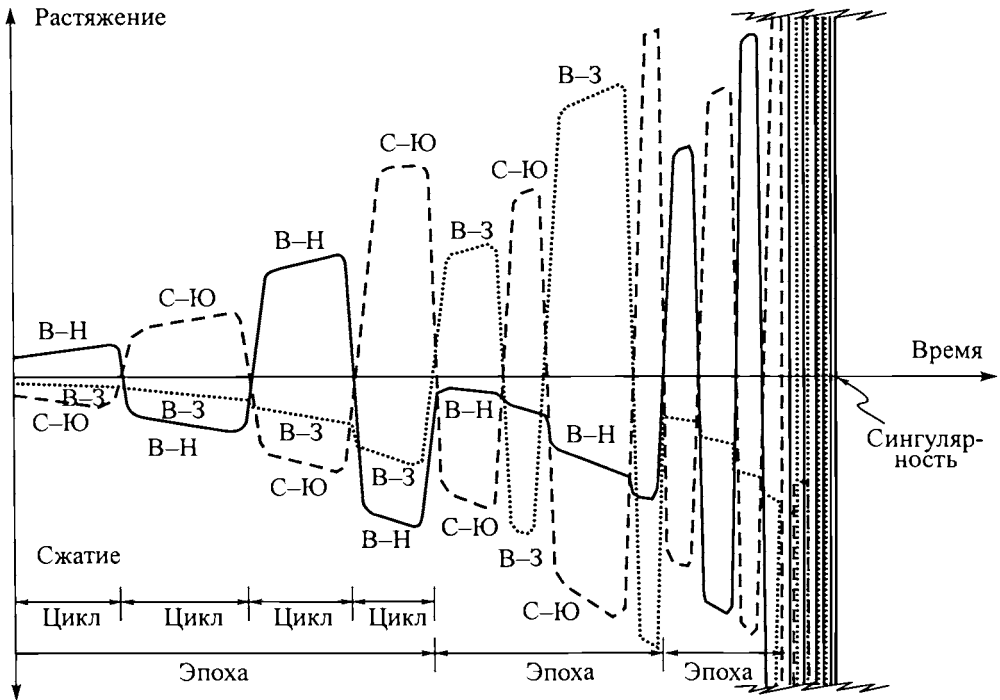
Райсснер и Нордстрем дали другое решение уравнения поля Эйнштейна, из которого также ясно и недвусмысленно следовало, что если черная дыра возникла в результате коллапса сферической, электрически заряженной звезды, такая схлопывающаяся звезда (и все, что попадает в дыру) может, образовав «маленькую замкнутую вселенную», проникнуть в другую большую вселенную (рис.13.4).

Этот ответ также оказался небесполезным. Он стимулировал не только воображение ученых, но и фантазию писателей-фантастов. Но, как и решение Оппенгеймера—Снайдера, решение Райсснера—Нордстрема ничего не имеет общего с реальной Вселенной, в которой мы живем, так как оно также неустойчиво к малым возмущениям. Дело в том, что в нашей реальной Вселенной черную дыру постоянно бомбардируют мельчайшие электромагнитные флуктуации вакуума и всплески излучения. Когда эти флуктуации и излучение попадают в черную дыру, они ускоряются силами гравитации до огромных энергий и разрушают маленькую замкнутую вселенную еще до того, как она начинает свое путешествие. Такая гипотеза была предложена Пенроузом в 1968 г. С тех пор ее много раз проверяли самые разные физики в многочисленных расчетах.

Белинский, Халатников и Лифшиц дали другой ответ на наши вопросы. Этот другой ответ оказался совершенно устойчивым по отношению к малым возмущениям и, скорее всего, является «верным». Он описывает реальные черные дыры, которые населяют нашу Вселенную, и звучит следующим образом: *звезда, превратившаяся в черную дыру, и все, что падает в нее, пока она молодая, разрывается на части силами приливной гравитации в БХЛ-сингулярности*. (БХЛ — сокращенное название для сингулярности, найденной Белинским, Халатниковым и Лифшицем в результате решения уравнения Эйнштейна после того, как Пенроуз убедил их в существовании сингулярности внутри черной дыры.)

Силы приливной гравитации в БХЛ-сингулярности радикально отличаются от аналогичных сил в сингулярности Оппенгеймера—Снайдера. Сингулярность Оппенгеймера—Снайдера вытягивает и сжимает падающего астронавта (или другое падающее тело), причем растяжение и сжатие постоянно и гладко нарастают (рис.13.1). Растяжение происходит в радиальном направлении, сжатие — всегда в поперечном. БХЛ-сингулярность же похожа на машину по вытягиванию тянучек, которые иногда можно увидеть в кондитерских магазинах или на ярмарках. Машина растягивает и сжимает сладкое клейкое вещество то в одном направлении, то в другом, то в третьем. Растяжение и сжатие испытывают случайные и хаотические осцилляции во времени (по

13. Внутри черных дыр



13.6. Пример осцилляций приливных сил в зависимости от времени в БХЛ-сингулярности. Приливные силы проявляют себя по-разному в трех различных, перпендикулярных направлениях. Для определенности эти направления обозначены здесь В-Н («верх/низ»), С-Ю («север/юг») и В-З («восток/запад»). Каждая из трех кривых описывает поведение приливной силы вдоль одного из этих направлений. Время отложено в горизонтальном направлении. Когда кривая В-Н *выше* горизонтальной оси времени, приливная сила *растягивается* вдоль направления В-Н; когда кривая В-Н *ниже* этой оси, соответствующая приливная сила *сжимается*. Чем выше кривая, тем сильнее растяжение; чем она ниже, тем сильнее сжатие. Следует обратить внимание на следующие детали: (1) в любой момент времени вдоль двух направлений происходит сжатие, а вдоль одного — вытягивание; (2) между растяжением и сжатием приливные силы осциллируют; каждая такая осцилляция называется «циклом»; (3) циклы объединяются в «эпохи». В каждую эпоху одно из трех направлений подвергается довольно постоянному сжатию, а два других осциллируют между растяжением и сжатием. (4) При смене эпохи постоянному сжатию начинает подвергаться другое направление; (5) при приближении к сингулярности осцилляции становятся бесконечно быстрыми, а приливные силы — бесконечно большими. Способ объединения циклов в эпохи и характер изменения картины осцилляций в начале каждой эпохи задается так называемой «хаотической картой»

крайней мере, так будет казаться падающему наблюдателю). По мере того как астронавт будет приближаться к сингулярности, растяжение и сжатие в среднем будут становиться все сильнее, а их осцилляции — быстрее. Чарльз Мизнер (который открыл хаотические осцилляции сингулярности независимо от Белинского, Халатникова и Лифшица) назвал их *миксерными осцилляциями*, так как они «взбивают» части тела астронавта подобно тому, как миксер или венчик для яиц взбивают желтки и белки. На рис.13.6 показан пример возможной осцилляции приливных сил. Последовательность осцилляций является при этом хаотичной и непредсказуемой.

Осцилляции в «миксерной» сингулярности Мизнера в тот или иной момент времени являются одними и теми же повсюду в пространстве (с точки зрения, например, астронавта). Но для БХЛ-сингулярности это не так. Ее осцилляции являются хаотическими в пространстве и во времени. Этим они напоминают турбулентное движение пены в океанской волне. Например, в то время, как голова астронавта поочередно растягивается и сжимается (так как ее «тузят» осцилляции) в направлении с севера на юг, его правую ногу будет тузить в направлении с севера на восток, а его левую ногу — в направлении с юго-юго-востока на северо-северо-запад. Частоты этих осцилляций, действующих на разные части тела астронавта, могут быть совершенно разными.

Из уравнения Эйнштейна следует, что при приближении астронавта к сингулярности приливные силы становятся бесконечно большими, а их хаотические осцилляции — бесконечно быстрыми. Астронавт погибает. Атомы, из которых состоит его тело, бесконечно и хаотически искажаются и смешиваются. В тот момент, когда все обращается в бесконечность (приливное воздействие, частоты осцилляций, смещения и перемешивание), пространство-время перестает существовать.

* * *

Но законы квантовой механики не согласны с таким развитием событий. Они запрещают существование всякого рода бесконечностей. Очень близко к сингулярности (по крайней мере, как мы понимаем это сейчас, в 1993 г.) законы квантовой механики сливаются с законами общей теории относительности Эйнштейна и полностью изменяют «правила игры». Новые правила называются *квантовой гравитацией*.

Астронавт уже мертв, части его тела тщательно перемешаны, а атомы, из которых он состоял, искажены до неузнаваемости. Именно тогда квантовая гравитация вступает в силу. Но ничего еще не бесконечно. «Игра» продолжается.

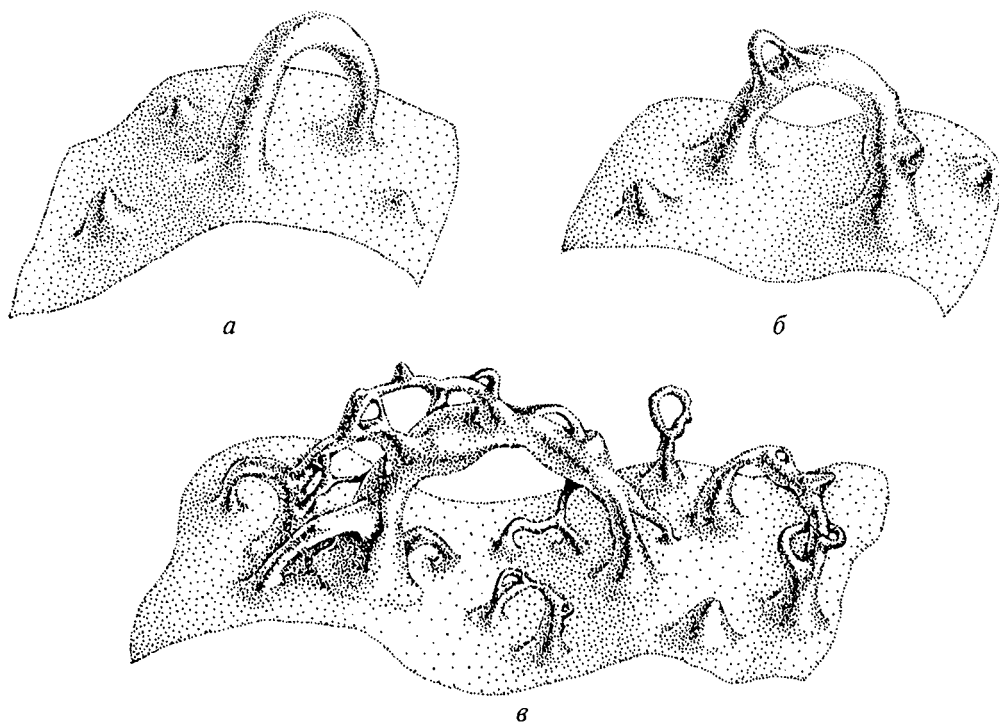
13. Внутри черных дыр

Когда же именно квантовая гравитация вступает в силу и как она это делает? Как мы это понимаем в 1993 г. (а наше понимание достаточно одностороннее), законы квантовой гравитации начинают действовать, когда осциллирующие приливные силы гравитации (пространственно-временная кривизна) становятся такими большими, что они полностью деформируют все объекты за 10^{-43} с или еще быстрее.² Затем квантовая гравитация радикально меняет характер пространства-времени. Она разрывает связь пространства и времени. Она отрывает пространство и время друг от друга, затем разрушает время как понятие и разрушает определенность пространства. Время перестает существовать. Мы больше не можем сказать: «Это произошло до того», потому что без времени нет и понятия «до» и «после». Пространство, вернее то, что когда-то было объединенным пространством-временем, превращается в случайную вероятностную пену.

До разрыва (т. е. вне сингулярности) пространство-время напоминает кусок дерева, насыщенный водой. В этой аналогии дерево представляет собой пространство, а вода — время. И обе категории (дерево и вода; пространство и время) тесно переплетены и объединены. Сингулярность и законы квантовой гравитации, которые ею управляют, подобны огню, в который брошен такой влажный кусок дерева. Огонь выпаривает из дерева воду, и оно становится одиноким и незащищенным. В сингулярности законы квантовой гравитации разрушают время, и пространство остается одиноким и незащищенным. Огонь затем превращает дерево в пену из хлопьев и пепла; законы квантовой гравитации превращают пространство в случайную, вероятностную пену.

Именно из такой случайной, вероятностной пены и состоит сингулярность, а пеной управляют законы квантовой гравитации. В этой пене пространство не обладает никакой определенной формой (т. е. никакой определенной кривизной или даже топологией). Просто существует та или иная вероятность для той или иной кривизны или топологии. Например, внутри сингулярности может существовать вероятность 0,1% того, что кривизна и топология пространства имеют форму, показанную на рис. 13.7а; вероятность 0,4% — форму, показанную на рис. 13.7б; вероятность 0,02% — форму, показанную на рис. 13.7в; и т.д. Это *не* означает, что пространство проводит 0,1%

² 10^{-43} с — это *время Планка–Уилера*. Оно примерно задается формулой $\sqrt{G\hbar/c^5}$, где $G = 6,670 \times 10^{-8}$ дин · см²/г² — постоянная всемирного тяготения, $\hbar = 1,055 \times 10^{-27}$ эрг · с — квантово-механическая постоянная Планка, $c = 2,998 \times 10^{10}$ см/с — скорость света. Заметим, что время Планка–Уилера равно квадратному корню из площади Планка–Уилера (глава 12), деленной на скорость света.



13.7. Квантовая пена в сингулярности внутри черной дыры. Геометрия и топология пространства имеют не определенный, а вероятностный характер. Пространство может иметь форму: (а) с вероятностью 0,1%; (б) с вероятностью 0,4%; (в) с вероятностью 0,02%; и т. д.

своего *времени* в форме (а), 0,4% — в форме (б) и 0,02% — в форме (в), потому что *внутри сингулярности нет такого понятия, как время*. Более того, так как там нет времени, совершенно бессмысленно спрашивать, принимает ли пространство форму (б) «до» или «после» того, как оно принимает форму (в). Единственный вопрос, который имеет смысл по поводу сингулярности: «какова вероятность того, что пространство, из которого вы состоите, имеет форму (а), (б) или (в)?» Ответы будут, соответственно, 0,1%, 0,4% и 0,02%.

Поскольку сингулярность разрешает существование всех мыслимых, даже самых диких, кривизн и топологий внутри себя, говорят, что сингулярность состоит из вероятностной пены. Джон Уилер первым ввел понятие *квантовой пены* как состояния пространства, когда им управляют законы квантовой гравитации.

Итак, резюмируем. В центре черной дыры, в той области пространства-времени, где осциллирующие приливные силы Белинского–Халатникова–Лифшица достигают своего пика, остается сингулярность, та область, в которой время больше не существует, а пространство превратилось в квантовую пену.

13. Внутри черных дыр

С одной стороны, законы квантовой гравитации должны управлять вероятностями возникновения той или иной кривизны и топологии внутри сингулярности черной дыры. С другой стороны, они, предположительно, определяют вероятности того, что из сингулярности возникнут «новые вселенные», т. е. возникнут новые, классические (не квантовые) области пространства-времени; в том же самом смысле, как из сингулярности Большого взрыва возникла наша Вселенная примерно пятнадцать миллиардов лет назад.

Насколько вероятно то, что сингулярность черной дыры даст начало «новым вселенным»? Мы не знаем. Это может никогда не произойти или это может быть обычным явлением; или же мы находимся на неверном пути, когда полагаем, что сингулярности состоят из квантовой пены.

Ясный ответ мы можем получить в течение двух ближайших десятилетий. Сейчас над этой проблемой усиленно работают Стивен Хокинг, Джеймс Хартл и другие ученые. Эта работа происходит на основе «фундамента», заложенного Джоном Уилером и Брюсом де Виттом.³

* * *

Почти все во Вселенной меняется со временем. Звезды потребляют свое горючее и умирают; Земля постепенно теряет свою атмосферу, испаряя ее в космическое пространство, и, в конце концов, превратится в безвоздушную мертвую планету; а мы, люди, покрываемся морщинами и мудреем.

Приливные силы глубоко внутри черной дыры, возле ее сингулярности, не являются исключением. Они тоже должны меняться со временем, как следует из расчетов, сделанных в 1991 г. Вернером Израэлем и Эриком Пуассоном из Университета Альберты, а также Амосом Ори, «постдоком» из моей группы в Калифорнийском технологическом институте (на основе работы Андрея Дорошкевича и Игоря Новикова). Внутренние приливные силы только что родившейся черной дыры испытывают сильные и хаотические осцилляции БХЛ-типа (рис. 13.6). С возрастом черной дыры хаотические осцилляции становятся более «ручными» и мягкими и постепенно исчезают.

Например, если в сердцевине квазара только что родилась черная дыра с массой 10 миллиардов солнечных масс, и в нее начал падать астронавт всего через несколько часов после ее рождения, он будет

³ Данное описание основано на формулировке законов квантовой гравитации, данной Уилером—де Виттом и Хокингом—Хартлом. Хотя это только один из многих подходов, разрабатываемых в настоящее время, я бы отдал ему предпочтение.

разорван на части бешено осциллирующими приливными БХЛ-силами. Однако второй астронавт, который подождет день-другой и только затем нырнет внутрь, встретится с гораздо более мягко осциллирующими приливными силами. Приливное растяжение и сжатие все еще будут достаточно большими и убьют второго астронавта. Но поскольку они более мягкие, чем накануне, второй астронавт проживет дольше и успеет до своей смерти ближе подойти к сингулярности. Третий астронавт, который благоразумно подождет со своим путешествием несколько лет, встретит еще более «благодушный» прием. В соответствии с расчетами Израэля, Пуассона и Ори, приливные силы, окружающие сингулярность, станут к этому времени такими «ручными», что астронавт вряд ли вообще почувствует их. Он выживет почти неповрежденным и доберется до самого края вероятностной квантово-гравитационной сингулярности. Только на краю этой сингулярности, когда он столкнется лицом к лицу с законами квантовой гравитации, он погибнет. И мы даже до конца не узнаем, погибнет ли он, поскольку мы все еще не понимаем законы квантовой гравитации и их следствия.

Это старение внутренних приливных сил черной дыры не является неумолимым. При падении вещества и излучения (или астронавтов) в черную дыру они будут подпитывать приливные силы, как брошенный льву лакомый кусочек мяса подпитывает хищника. Осциллирующие возле сингулярности растяжение и сжатие при подпитке станут на некоторое время сильнее, а затем вновь успокоятся.

* * *

В конце 1950-х и даже еще в начале 1960-х годов Джон Уилер мечтал о том, что люди однажды смогут проникнуть в сингулярность и увидеть воочию, как работают законы квантовой гравитации; проникнуть туда не только с помощью математики и моделирования на компьютере, но и с помощью реальных физических наблюдений и экспериментов. Оппенгеймер и Снайдер разбили вдребезги эту надежду (глава 6). Они обнаружили, что вокруг коллапсирующей звезды образуется горизонт событий, который скрывает сингулярность от внешнего наблюдателя. Если мы всегда остаемся снаружи горизонта, то почувствовать сингулярность нет никакой возможности. А если мы нырнем под горизонт событий громадной старой черной дыры и проживем достаточно долго для того, чтобы встретиться лицом к лицу с квантово-гравитационной сингулярностью, то не будет существовать способа сообщить об этой встрече на Землю. Наше сообщение не выйдет за пределы черной дыры. Горизонт событий его не выпустит.

13. Внутри черных дыр

Хотя Уилер уже давно отказался от своей мечты и теперь, наоборот, яростно пропагандирует точку зрения, что сингулярности «пощупать» невозможно, ниоткуда не следует, что он прав. Можно себе представить, что в результате весьма несферического звездного коллапса образуется *голая сингулярность*, т. е. сингулярность, не окруженная горизонтом событий, которую, следовательно, можно наблюдать и осязать из внешней Вселенной, даже с Земли.

В конце 1960-х годов Роджер Пенроуз интенсивно искал математическим путем пример коллапса, в результате которого рождается голая сингулярность. Его поиски оказались напрасными. Как только в его уравнениях возникала сингулярность в результате коллапса, вокруг нее тут же появлялся горизонт событий. Пенроуза это не удивляло. В конце концов, если должна была образоваться голая сингулярность, разумно было ожидать, что непосредственно перед ее образованием из ее окрестностей может излучаться свет; а если свет может покидать ее пределы, то это может делать и вещество, схлопывающееся в сингулярность. Если же вещество может покидать окрестности сингулярности, то его огромное внутреннее давление обязательно заставит его это сделать, в результате чего направление взрыва изменится на противоположное, в принципе препятствуя образованию сингулярности. Так получалось. Но математические преобразования Пенроуза, и не только его, не могли с уверенностью доказать эту точку зрения.

В 1969 г. Пенроуз, убежденный в том, что голые сингулярности появиться не могут, но не способный доказать это, предложил следующую догадку — *гипотезу космической цензуры*. *Никакой коллапсирующий объект никогда не может создать голую сингулярность; если сингулярность образуется, она должна быть окружена горизонтом событий, так что мы во внешней Вселенной не сможем ее увидеть.*

Члены физического «истеблишмента» — физики уровня Джона Уилера, чьи точки зрения являются наиболее влиятельными, — приняли понятие космической цензуры, как почти наверняка правильное. Тем не менее, почти четверть столетия спустя, космическая цензура остается недоказанной. Последние компьютерные расчеты коллапса сильно несферических звезд предполагают, что эта концепция даже *может* быть неправильной. В соответствии с этими расчетами, проведенными Стюартом Шапиро и Саулом Тьюкольски из Корнельского университета, в результате некоторых коллапсов могут возникнуть голые сингулярности. Могут. Не возникнут, а только могут.

Представителем физической элиты ныне является Стивен Хокинг, а мы с Джоном Прескиллом (моим коллегой из Калифорнийского технологического института) любим немного пощипать эту элиту. В

Принимая во внимание твердую уверенность Стивена В. Хокинга в том, что голые сингулярности анафема суть и должны быть запрещены законами классической физики;

Поскольку Джон Прескилл и Кип Торн рассматривают голые сингулярности как квантово-гравитационные объекты, которые могут существовать, незакрытые горизонтами событий и видимые всей нашей Вселенной;

Посему Хокинг предлагает, а Прескилл и Торн принимают пари с суммой установленной ставки в 100 фунтов стерлингов против 50 фунтов стерлингов о том, что любая форма классического вещества или поля, неспособная стать сингулярной в плоском пространстве-времени, присовокупляется к общей теории относительности через классические уравнения Эйнштейна; и результатом никогда не может стать голая сингулярность.

Проигравший обязан прикрыть наготу выигравшего; покровы должны быть украшены словесным подтверждением своего поражения.

Подписи:



John D. Preskill Kip S. Thorne

Стивен В. Хокинг, Джон П. Прескилл,
Кип С. Торн

Пасадена, Калифорния,
24 сентября 1991 г.

13.8. Пари, заключенное между Стивеном Хокингом, Джоном Прескиллом и мной, по поводу справедливости гипотезы Пенроуза о космической цензуре

1991 г. мы с Прескиллом заключили с Хокингом пари (рис. 13.8). Мы держали пари на само существование космической цензуры и утверждали, что голые сингулярности *могут* образовываться в нашей Вселенной. Хокинг держался противоположного мнения и утверждал, что голых сингулярностей быть не может.

Всего через четыре месяца после заключения этого пари Стивен Хокинг сам нашел математическое свидетельство (но *не твердое доказательство*), что после завершения испарения черной дыры (глава 12)

13. Внутри черных дыр

она не может полностью исчезнуть, как он ранее предполагал. Вместо этого от черной дыры может остаться крошечная голая сингулярность. Хокинг объявил об этом результате Прескиллу и мне частным образом, через несколько дней после своего открытия, на обеде у Прескилла. Однако когда мы с Прескиллом заявили ему о его проигрыше, он отказался признать свое поражение, прикрываясь словесным крючкотворством. Он настаивал на том, что пари было ограничено только голыми сингулярностями, образование которых управляется законами классической (т. е. не квантовой) физики, включая законы общей теории относительности. Однако испарение черных дыр — это квантово-механическое явление и управляется не законами классической общей теории относительности, а законами квантовых полей в искривленном пространстве-времени. Поэтому любая голая сингулярность, которая может явиться результатом испарения черной дыры, находится за пределами нашего пари. Что тут можно сказать? Правильно! Тем не менее, голая сингулярность, как бы она не возникала, стала бы костью в горле нашего физического истеблишмента!

Хотя мы любим заключать пари, но предметы спора чрезвычайно серьезны. Если голые сингулярности могут существовать, то только плохо понимаемые нами законы квантовой гравитации могут нам поведать, как они себя ведут, что они могут натворить в пространстве-времени в ближайшей окрестности и может ли их воздействие иметь большое влияние на Вселенную, в которой мы живем. Так как голые сингулярности, если они могут существовать, способны оказывать сильное влияние на нашу Вселенную, мы очень хотим понять, осуществляется ли космическая цензура и что предсказывают законы квантовой гравитации по поводу поведения этих сингулярностей. Борьба, которая нам предстоит, не будет ни быстрой, ни легкой.

ЧЕРВОТОЧИНЫ И МАШИНЫ ВРЕМЕНИ¹

глава, в которой автор пытается проникнуть в суть физических законов и задается вопросом: могут ли высокоразвитые цивилизации построить в гиперпространстве тоннели для быстрого межзвездного сообщения и машины для путешествий во времени?

Червоточины и экзотическое вещество

Закончился 1984/85 академический год. Я провел свой последний семинар и отдыхал в кресле, чувствуя, как постепенно снижается содержание адреналина в крови. Зазвонил телефон. Это был Карл Саган, астрофизик из Корнельского университета и мой друг. «Извини, что беспокою тебя, Кип, — сказал он. — Я сейчас кончаю писать книгу о первом контакте человеческой расы с внеземной цивилизацией и немного беспокоюсь. Я хочу, чтобы научные данные выглядели как можно достовернее, и боюсь, что мог кое-что напутать в физике по поводу гравитации. Не можешь ли ты взглянуть на роман и дать мне совет?» Конечно, я согласился. Это обещало быть интересным, потому что Карл — умный человек. Возможно, это даже будет забавно. Кроме всего прочего, как мог я отклонить просьбу друга?

Спустя две недели я получил книгу. Это была рукопись в три с половиной дюйма толщиной, напечатанная с двойным интервалом. Я сунул эту рукопись в сумку и бросил ее на заднее сиденье машины

¹ Эта глава отражает мою собственную точку зрения. Поэтому она менее объективна по сравнению с другими главами, в ней в основном рассказывается о моих работах и меньше внимания уделяется исследованиям других авторов. [В русскоязычной литературе вместо слова «червоточины», точно соответствующего английскому названию «wormholes», часто также употребляется выражение «кратовые норы». При переводе предпочтение отдано первому варианту. — Прим. ред.]

14. Червоточины и машины времени

Линды. Линда — моя бывшая жена. Она подвозила меня из Пасадены в Санта-Круз. Мы с ней и с нашим сыном Бретом ехали навестить нашу дочь Карес, которая как раз кончала колледж.

Линда и Брет попеременно вели машину, а я читал и предавался своим размышлениям. Мои близкие уже привыкли к такому моему поведению; они прожили со мной много лет. Книга была интересной, но у Карла, по моему разумению, были трудности. Его героиня Элеанора Эрроувэй нырнула в черную дыру около Земли, пропутешествовала через гиперпространство подобно тому, как это изображено на рис. 13.4, и через час вынырнула возле Веги, в 26 световых годах от Земли. Карл, который не очень силен был в теории относительности, не был знаком с расчетами²: *путешествие через гиперпространство из ядра черной дыры в другую часть нашей Вселенной невозможно*. Любую черную дыру непрерывно бомбардируют слабые электромагнитные флуктуации вакуума вкупе с малыми дозами излучения. Когда эти флуктуации и излучения попадают в черную дыру, они ускоряются ее гравитацией до огромных энергий и затем проливаются «взрывным» дождем на любую встречную «маленькую закрытую вселенную» или «туннель», или другое средство сообщения, с помощью которого кто-то мог бы попытаться перепрыгнуть через гиперпространство. Расчеты недвусмысленно показывали: любое приспособление для путешествия через гиперпространство разрушается «взрывным» дождем до начала этого путешествия. Сюжет книги Карлу надо было менять.

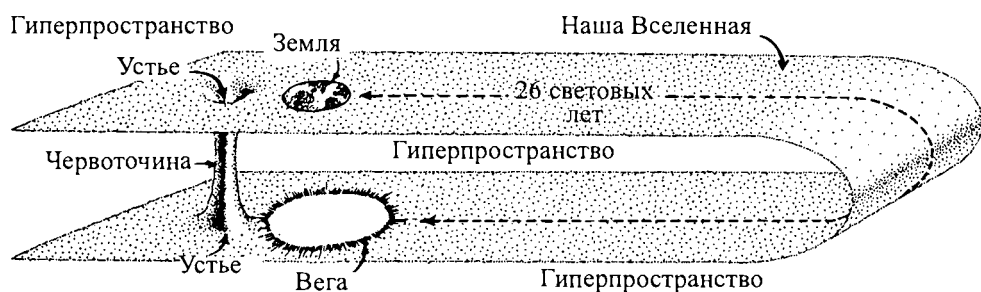
На обратном пути из Санта-Круз к западу от Фресно на 5-й автостраде у меня мелькнула идея. Может, Карлу будет достаточно заменить свою черную дыру *червоточиной* в гиперпространстве?

* * *

Червоточина — это гипотетический кратчайший путь между удаленными точками во Вселенной. У нее есть два входа, которые называются «устьями»: один, например, возле Земли, а другой на орбите возле Веги в двадцати шести световых годах. Устья соединены друг с другом туннелем через гиперпространство (червоточиной), который может быть длиной всего лишь один километр. Если мы войдем в околоземное устье, мы окажемся в туннеле. Пропутешествовав всего лишь один километр по туннелю, мы достигнем другого «устья» и вынырнем возле Веги в двадцати шести световых годах от Земли. (Таково измеренное расстояние между Землей и Вегой во внешней Вселенной.)

² См. раздел «Наилучшие предположения» главы 13.

ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ И СКЛАДКИ ВРЕМЕНИ



14.1. Червоточина длиной в 1 км через гиперпространство, соединяющая Землю с окрестностью Веги, расстояние до которой составляет 26 световых лет (масштабы на рисунке не соблюдены)

На рис. 14.1 изображена такая червоточина. Здесь наша трехмерная Вселенная представлена в виде двумерного листа (см. рис. 3.2 и 3.3). Подобно муравью, ползущему по листу бумаги, который не ощущает кривизны листа, так же и мы в нашей Вселенной не чувствуем ее кривизны в гиперпространстве. Однако даже незначительная кривизна важна; она позволяет Земле и Веге быть рядом друг с другом в гиперпространстве, так что их связывает короткая червоточина. И тогда мы подобно муравью или червяку, ползущему по двумерному листу, имеем два возможных пути с Земли на Вегу: длинный, через внешнюю Вселенную длиной двадцать шесть световых лет, и короткий, через червоточину длиной один километр.

Что представляло бы собой устье червоточины, если бы оно находилось на Земле, прямо перед нами? На двумерном изображении Вселенной оно представлено в виде круга; следовательно, в нашей трехмерной Вселенной оно было бы трехмерным аналогом круга, т. е. сферой. По сути дела, такое устье напоминало бы сферический горизонт событий невращающейся черной дыры, но с одним важным исключением: горизонт — это путь с односторонним движением; все что угодно может попасть внутрь, но ничего не может выйти наружу. Напротив, устье червоточины — дорога с двусторонним движением; мы можем ехать по ней в обе стороны: внутрь норы и наружу во внешнюю Вселенную. Заглянув в это сферическое отверстие, мы увидим свет от Веги, который прошел через туннель как через световую трубку или через оптическое волокно и вышел рядом с Землей.

Червоточины — это не просто плод воображения писателей-фантастов. Они были открыты математически Людвигом Фламмом в 1916 г. как решение уравнения поля Эйнштейна всего лишь через несколько месяцев после того, как Эйнштейн сформулировал это уравнение. В 1930-х годах их исследованием занимались Эйнштейн и Натан Роузен,

14. Червоточины и машины времени

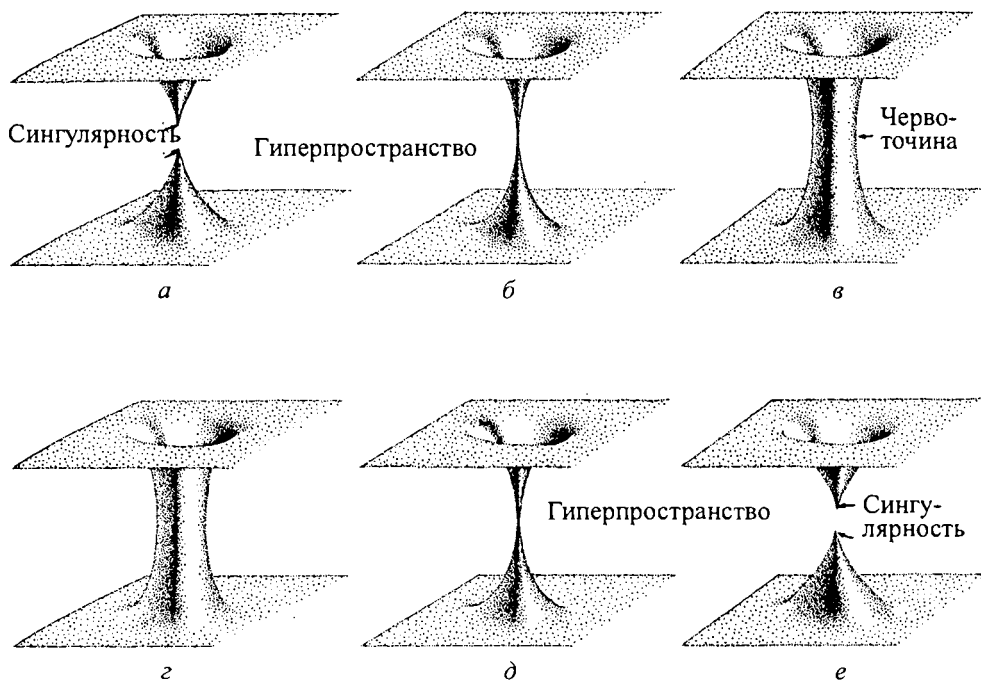
а в 1950-х — Джон Уилер со своей группой, которые проделали много математических расчетов. Но ни одна из таких червоточин, найденных в результате решения уравнения Эйнштейна, не годилась для книжки Карла Сагана, потому что не была безопасна для путешествия. И так было до моей поездки в 1985 г. по 5-й автостраде. До этого момента считалось, что червоточины ведут себя весьма своеобразным образом: они появляются на короткое время, а затем схлопываются и исчезают. Их полное время жизни от момента возникновения до исчезновения настолько мало, что никто и ничто (ни человек, ни излучение, ни какой бы то ни было сигнал) не в состоянии преодолеть туннель от одного устья до другого. Любая попытка пройти через туннель закончится ничем: все будет разрушено в момент его исчезновения. Простой пример этому дан на рис. 14.2.

Как и большинство моих коллег-физиков, я долгое время был скептически настроен по отношению к червоточинам. И не только потому, что из уравнения поля Эйнштейна следует, что червоточина, предоставленная сама себе, имеет короткий срок жизни; случайно попадающее в них излучение еще более укорачивает этот срок. В соответствии с расчетами Дуга Эрдли и Яна Редмаунта, излучение ускоряется до сверхвысоких энергий силами гравитации червоточины; это излучение бомбардирует ее устье, заставляя его сжиматься и стягиваться еще быстрее. Таким образом, червоточина имеет вообще очень мало шансов на существование.

Была еще одна причина для скептицизма. В то время как *черные дыры* представляют собой неизбежное следствие звездной эволюции (они возникают в результате коллапса массивных, медленно вращающихся звезд, которые в изобилии содержатся в нашей галактике), аналогичного механизма образования *червоточин* естественным путем не существует. По сути дела, нет никакого основания предполагать, что в нашей Вселенной сегодня есть *какие-либо* сингулярности, которые могут привести к образованию червоточин (рис. 14.2); если бы такие сингулярности существовали, трудно понять, как две из них могли бы найти друг друга в бескрайнем гиперпространстве, чтобы образовать червоточину на манер той, какая изображена на рис. 14.2.

* * *

Когда одному из друзей нужна помощь, мы готовы перевернуть мир. Червоточины — несмотря на мой скептицизм по их поводу — только они одни могли помочь Карлу. Возможно, пришло мне в голову на 5-й автостраде к западу от Фресно, некая очень высокоразвитая



14.2. Эволюция совершенно сферической червоточины, внутри которой нет вещества. (Эта эволюция — результат решения уравнения поля Эйнштейна, полученного в середине 1950-х годов Мартином Крускалом, молодым сотрудником Уилера в Принстонском университете.) (а) Вначале червоточины нет. Вместо этого существует одна сингулярность возле Земли и другая — возле Вегы. Затем, в некоторый момент времени (б), обе сингулярности дотягиваются друг до друга через гиперпространство, находят друг друга и аннигилируют друг в друге. В результате этой аннигиляции возникает червоточина. Поперечный размер ее растет (в), затем начинает сжиматься (г) и стягивается в точку (д), создавая две сингулярности (е), похожие на те, из которых она когда-то и возникла. Но есть одна существенная разница — каждая начальная сингулярность (а) похожа на ту, что была при Большом взрыве: время истекает из нее, давая начало последующим событиям: после Большого взрыва возникает Вселенная, а в нашем случае возникает червоточина. В отличие от этого, каждая конечная сингулярность (е) похожа на Большой хруст (глава 13); время в нее втекает, и на этом все заканчивается: Вселенная в результате Большого хруста и червоточина в нашем случае. Все, что пытается пройти через червоточину за время ее короткой жизни, оказывается захваченным в момент стягивания и уничтоженным вместе с самой червоточиной в конечных сингулярностях (е)

14. Червоточины и машины времени

цивилизация нашла способ держать червоточину открытой, т.е. не давать ей схлопываться, так что Элеанора Эрроувэй сможет путешествовать по ней от Земли до Веги и обратно. Я вытащил ручку и бумагу и начал вычислять. (К счастью, пятерка — очень прямой хайвэй, и я мог без труда делать расчеты.)

Чтобы упростить вычисления, я рассмотрел идеализированную, совершенно сферическую червоточину (как на рис. 14.1, где наша трехмерная Вселенная представлена в двумерном виде, а червоточина — совершенно круглая в поперечном сечении). В результате двух страниц вычислений на основе уравнения поля Эйнштейна я открыл три вещи.

Во-первых, *единственный способ удержать червоточину открытой — пропустить через нее вещество, которое будет расталкивать ее стенки гравитационными силами*. Я буду называть такое вещество экзотическим, потому что, как мы увидим, оно сильно отличается от любого вещества, с которым когда-либо имел дело человек.

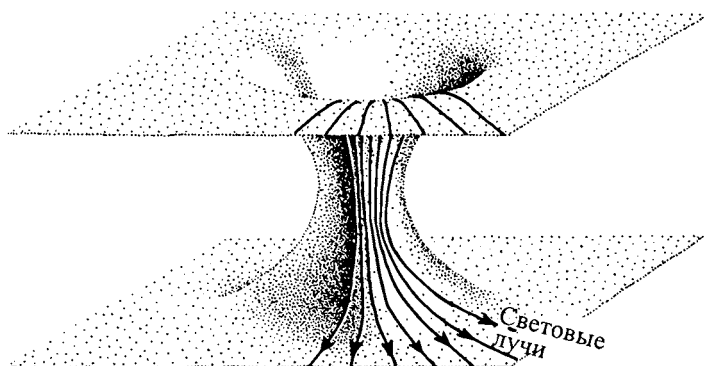
Во-вторых, я обнаружил, что точно так же, как экзотическое вещество расталкивает стенки червоточины, оно будет расталкивать гравитационными силами лучи света, проходящие через него. Другими словами, экзотическое вещество будет вести себя подобно дефокусирующей линзе; оно расфокусирует световой пучок гравитационными силами (см. Врезку 14.1).

В-третьих, я понял из уравнения поля Эйнштейна, что для того чтобы расфокусировать гравитационными силами световые пучки и раздвинуть стенки червоточины, *экзотическое вещество в ней должно иметь отрицательную среднюю плотность энергии*. Это утверждение требует некоторого объяснения. Вспомним, что гравитация (кривизна пространства-времени) есть производная массы (Врезка 2.6) и что масса и энергия эквивалентны (Врезка 5.2, где эквивалентность формулируется знаменитым уравнением Эйнштейна $E = Mc^2$). Это означает, что о гравитации тоже можно думать как о производной от энергии. Возьмем теперь плотность энергии вещества внутри червоточины (энергия на кубический сантиметр) с точки зрения светового пучка — т.е. с точки зрения путешественника, который движется через нору со скоростью света, — и усредним эту плотность энергии по траектории светового пучка. Результирующая усредненная плотность энергии должна быть отрицательной, для того чтобы вещество могло расфокусировать световой пучок и удерживать нору открытой — т.е. для того, чтобы вещество червоточины было «экзотическим».³

³ На техническом языке это значит, что экзотическое вещество «нарушает условие малой средней энергии».

**Экзотическое вещество:
как удержать открывшуюся червоточину**

Любая сферическая червоточина, через которую может распространяться свет, будет дефокусировать его гравитационными силами. Чтобы доказать это, представим себе (см. рисунок), что пучок света перед тем как войти в червоточину проходит через собирающую линзу. Таким образом, световые лучи будут сходиться в направлении центра червоточины. Затем лучи будут продолжать распространяться радиально (как же еще им распространяться?). Это значит, что когда они появятся из другого отверстия, они будут расходиться радиально из центра червоточины. Пучок дефокусирован. Пространственно-временная кривизна червоточины, которая является причиной дефокусиров-



ки, является следствием экзотического вещества, которое пронизывает червоточину, удерживая ее открытой. Поскольку эта кривизна эквивалентна гравитации, то дефокусировка светового пучка по сути дела производится силами гравитации экзотического вещества. Другими словами, экзотическое вещество расталкивает гравитационными силами световые лучи, отпихивая их от себя и, следовательно, друг от друга, т.е. дефокусирует их.

Это в точности противоположно тому, что происходит в гравитационной линзе (рис. 8.2). Там свет от удаленной звезды фокусируется гравитационным притяжением находящейся на его пути звезды, галактики или черной дыры, здесь свет дефокусируется.

Это необязательно означает, что экзотическое вещество имеет отрицательную энергию с точки зрения наблюдателя, находящегося в покое внутри червоточины. Плотность энергии — это относительное понятие: в одной системе отсчета она может быть отрицательной, а в другой — положительной. Экзотическое вещество может иметь отрицательную плотность энергии в системе отсчета светового пучка, распространяющегося через него, но положительную плотность энергии в системе отсчета червоточины. Тем не менее, поскольку почти все

14. Червоточины и машины времени

формы материи, с которыми встречались когда-либо люди, имеют положительную среднюю плотность энергии в любой системе отсчета, физики долгое время подозревали, что экзотическое вещество не может существовать. Предположительно законы физики запрещают существование экзотического вещества, о котором идет речь, но каким именно образом это делается, понять мы не могли.

Возможно, наша предубежденность к экзотическому веществу несправедлива, подумал я, когда ехал все по той же пятерке. Возможно, экзотическое вещество существует. Это был единственный способ, с помощью которого я мог помочь Карлу. Поэтому, прибыв в Пасадену, я написал Карлу длинное письмо, в котором объяснил, почему его героиня не могла воспользоваться черной дырой для быстрого межзвездного путешествия. Я предложил, чтобы вместо черных дыр она воспользовалась червоточинами, а кто-то из героев его романа открыл бы экзотическое вещество, то самое вещество, которое позволяет держать червоточины открытыми. Карл с удовольствием принял мое предложение и включил идею в окончательную версию романа «Контакт».⁴

* * *

После того как я поделился с Карлом Саганом моими размышлениями, мне пришло в голову, что его книгу можно использовать как учебное пособие для студентов, изучающих общую теорию относительности. В качестве помощи для студентов осенью 1985 г. мы с Майком Моррисом (одним из моих студентов) начали писать статью по уравнениям общей теории относительности для червоточин, поддерживаемых экзотическим веществом, и о связи этих уравнений с книгой Сагана.

Мы писали медленно — другие проекты были более срочными и более приоритетными. В начале зимы 1987–1988 гг. мы послали нашу статью в *American Journal of Physics*, но она еще не была напечатана. Моррис, который заканчивал аспирантуру, начал искать место постдока. Вместе со своими данными он рассылал повсюду рукопись нашей статьи. Одно из таких писем получил Дон Пейдж (профессор Пенсильванского университета и бывший мой и Хокинга студент), который прочел нашу рукопись и сразу же ответил Моррису.

⁴ См. с. 347, 348, 406 книги «Контакт» Карла Сагана. Там условие «экзотизма» (отрицательной средней плотности энергии с точки зрения световых пучков, распространяющихся сквозь червоточину) выражено другим, но эквивалентным способом: с точки зрения наблюдателя, находящегося в покое внутри червоточины, вещество должно иметь большое натяжение вдоль радиального направления, натяжение, которое больше плотности энергии вещества.

«Дорогой Майк, как следует из положения 9.2.8 книги Хокинга и Эллиса, а также из уравнений поля Эйнштейна, *любая* червоточина [требуется экзотического вещества для того, чтобы быть открытой]. Искренне Ваш, Дон. Н. Пейдж».

Я себя почувствовал ужасно глупым. Я никогда глубоко не изучал глобальные методы⁵ (основная тема книги Хокинга и Эллиса) и теперь я пожинал плоды своего невежества. На пятом хайвэе без больших усилий я вывел, что для поддержания в открытом состоянии совершенно сферической червоточины необходимо пропустить через нее экзотическое вещество. Теперь, однако, с помощью глобальных методов и затратив еще меньше усилий, Пейдж показал, что такое вещество требуется для поддержания *любой* червоточины (сферической, кубической и т.п.). Позднее я узнал, что Деннис Гэннон и К. В. Ли пришли почти к такому же выводу в 1975 г.

* * *

Это открытие, что для поддержания открытого состояния всех червоточин требуется экзотическое вещество, возбудило в 1988–1992-х годах многочисленные теоретические исследования. (Разрешают ли законы физики существование экзотического вещества, и если да, то при каких обстоятельствах?) Это было ключевым вопросом.

Ключ к ответу был уже предложен Стивеном Хокингом в 1970-х годах. В 1970 г., доказывая, что площадь поверхности черной дыры всегда возрастает (глава 12), Хокинг должен был предположить, что возле горизонта событий черной дыры нет экзотического вещества. Если бы оно там присутствовало, доказательство Хокинга потеряло бы силу, и его теорема оказалась бы неправильной, и площадь поверхности горизонта событий могла бы сжиматься. Однако Хокинга все это не слишком беспокоило; в 1970 г. сама возможность существования экзотического вещества казалась маловероятной.

Но 1974-й год приподнес всем нам большой сюрприз: исследуя испарение черных дыр, Хокинг показал (глава 12), что *вакуумные флуктуации возле горизонта событий черной дыры являются экзотическими*: они имеют с точки зрения световых лучей, выходящих наружу возле горизонта событий черной дыры отрицательную среднюю плотность энергии. По сути дела, именно это экзотическое свойство вакуумных флуктуаций позволяет сжиматься горизонту событий черной дыры по мере ее испарения, в нарушение теоремы Хокинга о возра-

⁵ Глава 13.

14. Червоточины и машины времени

стающей площади. Поскольку экзотическое вещество очень важно для физики, я позволю себе объяснить этот момент более детально.

Вспомним происхождение и природу флуктуаций вакуума (Врезка 12.4). При попытке удалить из некоторой области пространства все электрические и магнитные поля, т.е. при попытке создать совершенный вакуум, всегда остается обилие случайных, непредсказуемых электромагнитных колебаний — колебаний, которые вызваны «противоборством» соседствующих областей пространства. Поля «здесь» занимают энергию у полей «там», оставляя их с дефицитом энергии, т.е. фактически с отрицательной энергией. Эти поля «там» быстро захватывают энергию обратно, причем с некоторым избытком, что приводит к тому, что их энергия на какой-то момент времени становится положительной. Так это и происходит.

При нормальных условиях на Земле средняя энергия таких вакуумных флуктуаций равна нулю. Дефицит энергии и ее избыток продолжают примерно одинаковое время и поэтому в среднем они уравновешивают друг друга, но, как показали расчеты Хокинга в 1974 г., так происходит вдали от горизонта событий испаряющейся черной дыры. Возле горизонта событий средняя энергия должна быть отрицательной, по крайней мере, с точки зрения световых лучей. Это и означает, что флуктуации вакуума — экзотические.

Конкретные детали этого процесса стали понятны только в начале 1980-х годов, когда Дон Пейдж из Пенсильванского университета, Филип Канделас из Оксфорда и многие другие физики применили законы квантовых полей в искривленном пространстве-времени для детального исследования влияния горизонта событий черной дыры на флуктуации вакуума. Они обнаружили, что это влияние имеет большое значение. Горизонт событий изменяет форму вакуумных флуктуаций, и они становятся совершенно непохожими на земные. В результате этого смещения формы их средняя плотность энергии становится отрицательной, а флуктуации — экзотическими.

При каких других обстоятельствах могут вакуумные флуктуации стать экзотическими? Могут ли они быть экзотическими внутри червоточины и таким образом поддерживать ее открытой? В этом заключался основной вопрос исследовательских усилий, предпринятых Пейджем, который заметил, что единственный способ поддерживать любую червоточину открытой — снабдить ее экзотическим веществом.

Ответ, если это можно назвать ответом, дался нелегко. Гуннар Клинкхаммер (мой студент) доказал, что в плоском пространстве-времени, т.е. далеко от всех притягивающих объектов, флуктуации атомов *никогда* не могут быть экзотическими — они никогда не могут

иметь отрицательную среднюю плотность энергии в системе отсчета световых пучков. С другой стороны, Роберт Уолд (бывший студент Уилера) и Улви Юртсевер (бывший мой студент) доказали, что в искривленном пространстве-времени при самых разных условиях кривизна искажает флуктуации вакуума и таким образом делает их экзотическими.

Подчиняется ли червоточина, которая стремится сжаться, таким условиям? Может ли кривизна червоточины, искажая вакуумные флуктуации, сделать их экзотическими, чтобы червоточина оставалась открытой? В тот момент, когда эта книга шла в печать, мы все еще не знали ответа.

* * *

В начале 1988 г., когда в самом разгаре были теоретические исследования экзотического вещества, толчком к которым был звонок Карла Сагана, я начал осознавать всю их значимость. Я был также абсолютно уверен в том, что путь к истине будет сложным и многотрудным. Мысленные эксперименты такого типа позволяют проложить дорогу к истине, эксперименты, которые спрашивают: «что законы физики разрешают делать высокоразвитой цивилизации и что они запрещают?» (под «высокоразвитой» цивилизацией я имею в виду такую, чья активность ограничена только законами физики, а не отсутствием должного интеллектуального и технологического уровня).

Думаю что мы, физики, стремились избегать таких вопросов, поскольку они слишком близки к научной фантастике. В то время как многие из нас могут получать удовольствие от чтения фантастики или даже писать ее, мы боимся оказаться смешными перед нашими коллегами, затеявая исследования на грани этого жанра. Поэтому мы стремились сконцентрироваться на двух других, менее радикальных, типах вопросов: «Что *реально происходит* во Вселенной?» (Например, существуют ли реально черные дыры, и существуют ли реально червоточины?) И «Что мы, люди, с нашим нынешним уровнем развития, можем сделать сейчас или в ближайшем будущем?» (Например, можем ли мы производить новые элементы, такие как плутоний, и использовать их для производства атомных бомб? И можем ли мы производить высокотемпературные сверхпроводники и использовать их для экономии электроэнергии, создания летающих поездов и Суперколлайдера?)

К 1988 г. мне стало ясно, что мы, физики, были слишком консервативны в своих вопросах. К этому времени один из *сагановских*

14. Червоточины и машины времени

вопросов (как я их буду называть) уже принес свои плоды. После того как мы с Моррисом спросили себя: «Может ли высокоразвитая цивилизация поддерживать червоточины для быстрых межзвездных перелетов?» — нам стало ясно, что для их поддержания требуется экзотическое вещество. И тогда мы начали прилагать усилия в попытках понять, при каких условиях законы физики разрешают, а при каких запрещают существование экзотического вещества.

* * *

Предположим, что наша Вселенная возникла (во время Большого взрыва) вовсе без червоточин. Затем, много эпох спустя, когда возникшая разумная жизнь достигнет (гипотетически) очень высокого уровня развития, *сможет ли эта высокоразвитая цивилизация построить для быстрых межзвездных перелетов червоточины*. Разрешают ли законы физики сконструировать червоточины там, где их в начале не было? Позволяют ли законы производить такие изменения в топологии пространства нашей Вселенной?

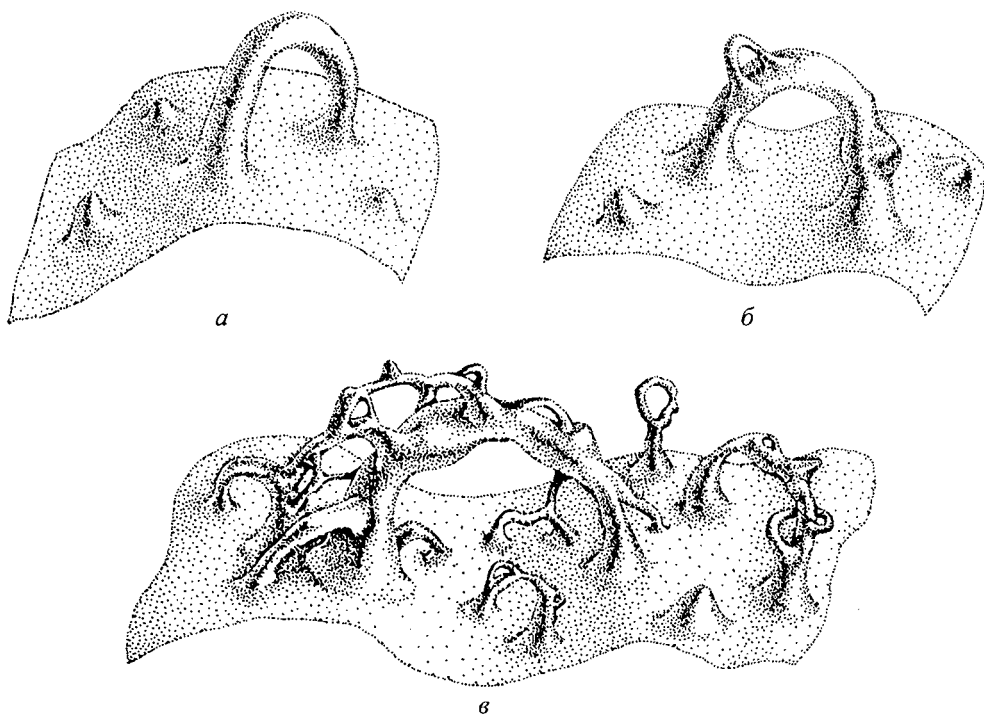
Эти вопросы представляют собой *вторую половину* межзвездной транспортной проблемы Карла Сагана. *Первую половину*, которая заключается в том, что червоточина поддерживается с момента своего создания, Саган решил с помощью экзотического вещества. В своей книге Саган описывает червоточину, через которую путешествует Элеанора Эрроувэй, поддерживаемую с помощью экзотического вещества, но эта червоточина была создана в отдаленном прошлом некоторой высокоразвитой цивилизацией, все следы которой утеряны.

Мы, физики, конечно, не испытываем удовольствия, относя создание червоточин к предыстории. Мы хотим знать, как можно и можно ли вообще изменить топологию Вселенной *сейчас*, в рамках физических законов.

Мы можем представить себе две стратегии построения червоточины там, где раньше ее не было: *квантовую и классическую*.

Квантовая стратегия опирается на *гравитационные вакуумные флуктуации* (Врезка 12.4), т. е. гравитационный аналог электромагнитных вакуумных флуктуаций, обсуждавшихся выше: случайные, вероятностные флуктуации кривизны пространства, вызванные «заимствованием» энергии у соседних областей пространства с последующим ее возвращением. По-видимому, гравитационные вакуумные флуктуации существуют везде, но при обычных обстоятельствах они настолько малы, что никакой экспериментатор никогда их не обнаруживал.

Так же, как случайные движения электрона в вырожденном состоянии при его ограничении во все меньшей области становятся все



14.3. (То же самое, что и на рис. 13.7.) Диаграммы, иллюстрирующие квантовую пену. Геометрия и топология пространства не являются точно определенными, они являются вероятностными. Например, с вероятностью 0,1% может существовать пена, показанная на рис. (а), с вероятностью 0,4% — на рис (б) и с вероятностью 0,02% — на рис. (в) (и т. д.)

интенсивнее (глава 4), гравитационные флуктуации вакуума сильнее в маленьких областях. То есть для коротких длин волн они сильнее, чем для длинных. В 1955 г. Джон Уилер сделал первый шаг в объединении законов квантовой механики и законов ОТО. При этом он пришел к выводу, что в области с размером, равным длине Планка—Уилера⁶ ($1,62 \times 10^{-33}$ см или меньше), флуктуации вакуума настолько огромны, что пространство, которое мы знаем, «вскипает» и превращается в квантовую пену, ту же квантовую пену, которая является ядром сингулярности пространства-времени (глава 13; рис. 14.3).

Таким образом, квантовая пена содержится везде: внутри черных дыр, в межзвездном пространстве, в комнате, в которой вы находитесь, в вашем мозгу. Но для того чтобы увидеть ее, нам пришлось бы

⁶ Длина Планка—Уилера равна квадратному корню из площади Планка—Уилера (которая входит в формулу для энтропии черной дыры, глава 12); она задается формулой $\sqrt{G\hbar/c^3}$, где $G = 6,670 \times 10^{-8}$ дин \cdot см²/г² — гравитационная постоянная, $\hbar = 1,055 \times 10^{-27}$ эрг \cdot с — квантово-механическая постоянная Планка, $c = 2,998 \times 10^{10}$ см/с — скорость света.

14. Червоточины и машины времени

использовать сверхмощный микроскоп, проникая все глубже и глубже в микромир. Нам пришлось бы перейти из нашего обычного мира (сотни сантиметров) в мир атома (10^{-8} см), затем в мир атомного ядра (10^{-13} см) и потом еще глубже на двадцать порядков, к 10^{-33} см. На всех ранних «больших» масштабах пространство выглядит совершенно гладким с определенной, но «крошечной» кривизной. Но когда масштаб приближается к 10^{-32} см, мы увидим, что пространство начинает скручиваться, вначале немного, а затем все более и более сильно. Когда весь окуляр микроскопа займет область 10^{-33} см, пространство превратится в накипь вероятностной квантовой пены.

Поскольку квантовая пена находится повсюду, заманчиво представить себе высокоразвитую цивилизацию, которая сумела добраться до квантовой пены, обнаружила в ней червоточину (скажем, ту «большую» на рис. 14.3б, наблюдаемую с вероятностью 0,4%), попыталась ее захватить и расширить до классического размера. Если цивилизация действительно высокоразвита, в 0,4% случаев ее попытки могли бы привести к успеху. Или нет?

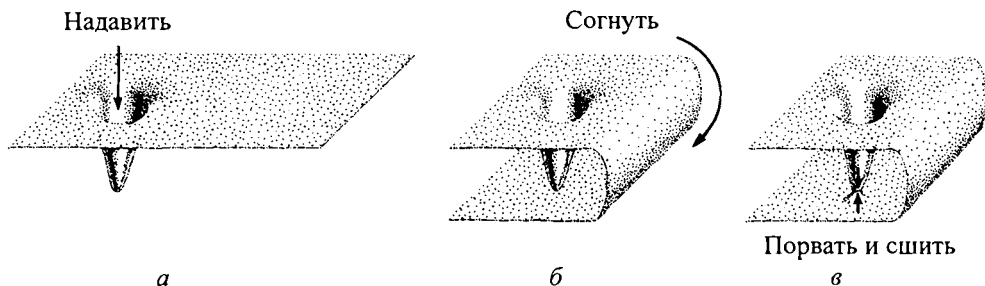
Мы еще недостаточно хорошо знаем законы квантовой гравитации. Прежде всего мы плохо понимаем саму квантовую пену. Мы даже не на сто процентов уверены, что она существует. Однако такой мысленный эксперимент «сагановского типа» по вытягиванию высокоразвитой цивилизацией червоточины из квантовой пены может оказать нам концептуальную помощь в ближайшие годы в попытке утвердиться в понимании квантовой пены и квантовой гравитации.

Пожалуй, хватит о *квантовом методе* образования червоточин. В чем заключается *классический метод*?

Следуя классическому методу, наша высокоразвитая цивилизация попыталась бы деформировать и скрутить пространство на макроскопическом уровне так, чтобы сделать червоточину там, где ее прежде не существовало. Кажется вполне очевидным, что для удачного исхода необходимо прорвать две дыры в пространстве и сшить их вместе. На рис. 14.4 показан пример такой процедуры.

Каждый такой прорыв пространства моментально приводит в точке разрыва к образованию сингулярности пространства-времени, т.е. резкой границы, на которой пространство-время заканчивается. Поскольку сингулярности управляются законами квантовой гравитации, такой способ образования червоточин фактически является не классическим, а квантово-механическим. Пока мы не поймем законов квантовой гравитации, мы не узнаем даже, существует ли он вообще.

Есть ли какой-нибудь выход из этого положения? Можно ли сделать червоточину, не вовлекая в процесс плохо понимаемые нами



14.4. Один из способов изготовления червоточины. (а) В кривизне пространства образуется «карман». (б) Пространство вне кармана слегка сгибается в гиперпространстве. (в) В кармане формируется дырка, прямо под этой дыркой образуется дыра в пространстве, и края дыр «сшиваются» вместе. Этот метод на первый взгляд выглядит классическим (макроскопическим). Однако разрыв производит, по крайней мере, на краткое время, сингулярность в пространстве-времени, которая управляется законами квантовой гравитации; следовательно, этот метод на самом деле является квантовым

законы квантовой гравитации, т. е. существует ли *чисто классический способ?*

Удивительно, но существует — но за это придется заплатить большую цену. В 1966 г. Роберт Герох (студент Уилера в Принстоне) использовал глобальные методы и показал, что *можно* построить червоточину с помощью гладкой деформации и скручивания пространства-времени, избежав при этом сингулярности. Но это можно сделать только, если в процессе создания во всех системах отсчета будет сворачиваться также и время.⁷ Более точно выражаясь, такое создание червоточины требует возможности путешествия назад во времени: каким бы «механизмом» эта червоточина ни создавалась, он, фактически, является машиной времени, которая переносит объекты из более поздних моментов строительства к более ранним (но не раньше начала строительства).

Всеобщую реакцию на теорему Героха можно выразить следующими словами (1967): «Конечно, законы физики запрещают существование машины времени, поэтому они будут препятствовать любому классическому методу образования червоточин, т. е. без образования дыр в пространстве».

За десятилетия, прошедшие с 1967 г., мы убедились в том, что некоторые вещи, в которых мы были *уверены*, оказались неверными. (Например, мы никогда бы не поверили в 1967 г., что черная дыра

⁷ Я хотел бы нарисовать простую и понятную схему, как гладко создать червоточину, но, к сожалению, не могу.

14. Червоточины и машины времени

может испаряться.) Поэтому мы научились некоторой осторожности, в частности, в конце 1980-х годов мы стали задавать вопросы типа: «Запрещают ли *на самом деле* законы физики машину времени и если да, то *почему*? Из чего следует такой запрет?» К этому вопросу я вернусь ниже.

* * *

Теперь давайте остановимся и посмотрим, что мы имеем. В 1993 г. мы думаем о червоточинах следующее:

Если червоточины не были созданы во время Большого взрыва, то высокоразвитая цивилизация могла бы попытаться сконструировать подобную червоточину одним из двух методов: квантовым (подцепив ее из квантовой пены) или классическим (скручивая пространство-время без его разрыва). В 1993 г. мы все еще недостаточно хорошо понимаем законы квантовой гравитации, чтобы решить, возможно ли квантовое создание червоточин. То, что мы знаем, — это законы классической гравитации и общая теория относительности, из которых следует, что классическое создание червоточин разрешено только в случае, если «механизм» их создания, каким бы он ни был, очень сильно сворачивает время (во всех системах отсчета), так сильно, что хотя бы на короткое время создается машина времени.

Мы также знаем, что если у высокоразвитой цивилизации каким-то образом появляется червоточина, то единственный способ удержать ее открытой (и использовать для межзвездных путешествий) — это пропустить через нее экзотическое вещество. Мы знаем, что в этом смысле обнадеживающими являются вакуумные флуктуации электромагнитного поля: они могут быть экзотическими (иметь отрицательную среднюю плотность энергии с точки зрения светового пучка) в искривленном пространстве-времени при весьма различных обстоятельствах. Мы еще не знаем, однако, могут ли они быть экзотическими внутри червоточины, т.е. поддерживать ее открытой.

На следующих страницах я буду предполагать, что высокоразвитая цивилизация каким-то образом получила червоточину и поддерживает ее открытой с помощью некоторого экзотического вещества; давайте рассмотрим, какие еще применения, кроме межзвездных полетов, могла бы найти цивилизация для своей червоточины.

Машины времени

В декабре 1986 г. в Чикаго (Иллинойс) проводился четырнадцатый полугодовой Техасский симпозиум по релятивистской астрофизике. Эти

«Техаски» начали проводиться с 1963 г.; на первом симпозиуме в Далласе (Техас) впервые обсуждалась тайна квазаров (главы 7 и 9). С тех пор проведение их стало традицией. Я поехал на симпозиум, чтобы прочесть лекцию о проектах и планах, связанных с LIGO (глава 10). Майк Моррис (мой студент, занимавшийся «червоточинами») поехал со мной, чтобы впервые выступить перед международной аудиторией из физиков-релятивистов и астрофизиков.

Между лекциями в кулуарах Моррис познакомился с Томом Романом, молодым ассистентом профессора из Коннектикутского государственного университета, который несколько лет тому назад интенсивно занимался вопросами экзотического вещества. Их беседа быстро перешла к червоточинам. Роман заметил: «Если червоточину действительно можно держать открытой, она позволит путешествовать на межзвездные расстояния со скоростью, гораздо быстрее скорости света. Не означает ли это, что червоточину можно использовать также для путешествия назад во времени?»

Какими глупцами почувствовали себя мы с Майком! Конечно же, Роман был прав. Мы еще в детстве читали о таком путешествии во времени в известном лимерике:

Мадам О'Брайт — так было имя милой леди.
Она быстрее света, знали все соседи.
Собравшись вмиг, в коляску прыг —
И оказалась на вчерашнем на обеде!

После комментария Романа, вспомнив это стихотворение, мы легко представили, как построить машину времени с помощью двух червоточин, которые движутся с большими скоростями друг относительно друга.⁸ (Я не буду здесь описывать эту машину времени, из-за ее сложности; вскоре я перейду к описанию более простой машины времени.)

⁸ Возможность существования машины времени следовала из более ранних решений уравнения поля Эйнштейна. В 1937 г. В. Дж. Ван Стокам из Эдинбурга нашел решение, в котором как машина времени работает бесконечно длинный, быстро вращающийся цилиндр. Физики долгое время отрицали возможность существования бесконечно длинных предметов во Вселенной. Они предположили (но никто этого не смог доказать), что если бы у цилиндра была конечная длина, то он бы не смог быть машиной времени. В 1949 г. Курт Гедель из Института Передовых исследований в Принстоне (Нью-Джерси) нашел решение уравнения Эйнштейна, описывающее всю вселенную, которая вращается, но не расширяется и не сжимается. В этой вселенной можно путешествовать назад во времени, просто улетаая на большие расстояния от Земли и затем возвращаясь. Физики возражают, конечно, и говорят, что наша реальная Вселенная вовсе не напоминает решение Геделя: она не вращается, по крайней мере так сильно, и она расширяется. В 1976 г. Фрэнк Типлер с помощью уравнения поля Эйнштейна доказал, что для создания машины времени в ограниченной области пространства необходимо использовать экзотическое вещество как часть этой машины. (Поскольку любая проходимая червоточина должна быть пронизана экзотическим веществом, описанные в этой главе машины времени, основанные на червоточинах, удовлетворяют требованию Типлера.)

Я одиночка. Я люблю удаляться в горы или на уединенное морское побережье, или просто на чердак, чтобы подумать. Новые идеи приходят медленно, для их вынашивания требуется спокойствие и одиночество. Для того чтобы произвести необходимые расчеты, часто требуются дни или недели интенсивной, постоянной концентрации мысли. Телефонный звонок, прозвучавший в ненужный момент, может полностью сбить мою мысль, отбросив меня назад на несколько часов. Поэтому я прячусь от мира.

Но прятаться слишком долго опасно. Время от времени мне нужно встречаться и беседовать с людьми, которые думают по-другому, чтобы взбодрить себя.

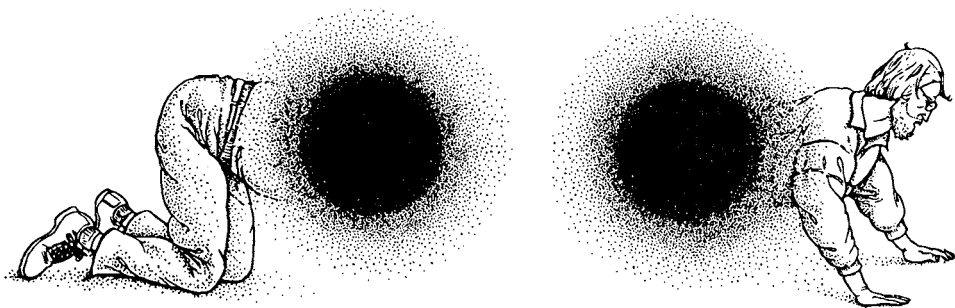
В этой главе я уже привел три примера. Без телефонного звонка Карла Сагана и стремления сделать его книгу корректной в научном плане я бы никогда не предпринял исследования червоточин и машин времени. Без письма Дона Пейджа мы с Майком Моррисом не узнали бы, что все червоточины, независимо от их формы, требуют экзотического вещества для поддержания их открытыми. И без замечания Тома Романа мы с Моррисом могли бы до сих пор пребывать в беспечном неведении того, что развитая цивилизация может легко сделать машину времени из червоточин.

На следующих страницах я расскажу о других открытиях, сделанных под влиянием «взбадривающих» обстоятельств. Однако не все идеи возникают таким образом. Некоторые появляются в результате «общения» с самим собой. Именно таким был июнь 1987 г.

В начале июня 1987 г., после нескольких месяцев интенсивного преподавания и работы с моей исследовательской группой, а также с группой LIGO, я почувствовал себя очень усталым и решил уединиться.

Всю весну меня что-то грызло, но я не обращал на это особого внимания, ожидая спокойных дней для работы. Эти дни, наконец, пришли. В уединении я позволил неясной мысли вынырнуть из моего подсознания и начал ее исследовать: *«Откуда время знает, каким образом ему надо проползти через червоточину?»* В этом и была суть дела.

Чтобы сделать вопрос более конкретным, я рассмотрел следующий пример. Предположим, что у меня есть очень короткая червоточина — туннель, который в гиперпространстве имеет длину всего лишь в тридцать сантиметров. Предположим также, что оба устья червоточины — две сферы, каждая два метра в диаметре — находятся в моей гостиной в Пасадене. Предположим, наконец, что я влезаю головой вперед в эту червоточину. С моей точки зрения, я должен вынырнуть



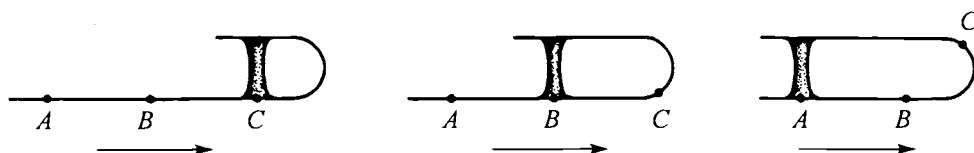
14.5. Как я пробираюсь через очень короткую гипотетическую червоточину

из второго устья сразу же после того, как я проник в первое, без всякой задержки, что означает, фактически, что когда моя голова появится из второго устья, мои ноги все еще будут пролезать в первое. Значит ли это, что моя жена Кароли, сидящая на диване в гостиной, тоже увидит одновременно мою голову, появляющуюся из второго устья и мои ноги из первого (см. рис. 14.5)? Если да, то время как-то «просачивается *через* червоточину» и течет так же, как и *вне* червоточины.

С другой стороны, спросил я себя, возможно ли, что хотя путешествие через червоточину по моим расчетам почти не отнимает времени, Кароли придется целый час ждать, пока она увидит мое появление из второго устья. А возможно ли, чтобы она увидела меня за час до того, как я войду в устье? Если так, то время течет *через* червоточину иначе, не так как *вне* ее.

Что могло бы заставить время вести себя таким ненормальным образом? — спросил я себя. С другой стороны, почему бы и нет? Только законы физики знают ответ, подумал я. Так или иначе, мне следовало вывести поведение времени из законов физики.

На следующем этапе для понимания того, как законы физики контролируют течение времени, я рассмотрел более сложную ситуацию. Предположим, что одно устье червоточины находится в покое в моей гостиной, а другое — в межзвездном пространстве и удаляется от Земли почти со скоростью света. Предположим, что, несмотря на это относительное движение двух устьев, длина червоточины (длина туннеля через гиперпространство) всегда фиксирована и составляет ровно тридцать сантиметров. (Рис. 14.6 объясняет, как длина червоточины может оставаться фиксированной, несмотря на то, что ее устья движутся относительно друг друга во внешней Вселенной.) С точки зрения внешней Вселенной два отверстия находятся в разных системах отсчета, движущихся относительно друг друга с большой скоростью,



- 14.6. Устья червоточины могут двигаться относительно друг друга во внешней Вселенной, в то время как длина червоточины остается постоянной. Каждая из этих схем — это такая же диаграмма, как на рис. 14.1, только «в профиль». Диаграммы последовательно представляют собой движение Вселенной и червоточины по отношению к гиперпространству. (Вспомним, однако, что гиперпространство — это всего лишь плод нашего воображения; мы, люди, в действительности никогда не сможем увидеть его или испытать на себе; см. рис. 3.2 и 3.3.) По отношению к гиперпространству нижняя часть нашей Вселенной на диаграммах скользит направо, а червоточина и верхняя часть Вселенной остаются в покое. Соответственно, если смотреть из нашей Вселенной, устья движутся друг относительно друга (отодвигаются все дальше), но если смотреть через червоточину, то по отношению друг к другу они остаются в покое, и длина червоточины не изменяется

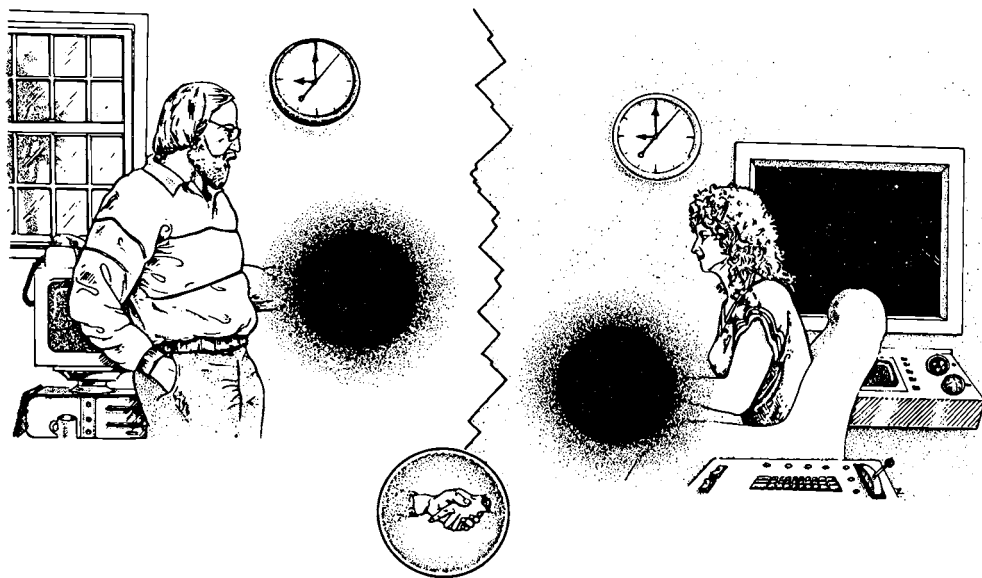
следовательно, *в этих устьях время должно течь по-разному*. С другой стороны, с точки зрения самой червоточины, по отношению друг к другу устья находятся в покое, т. е. они относятся к общей системе отсчета, а это означает, что *в этих отверстиях время должно течь одинаковым образом*. С внешней точки зрения, время в них течет по-разному, а с внутренней, — совершенно одинаково. Однако!

Постепенно недоумение покинуло меня в моем тихом уединении, и все стало ясно. Законы общей теории относительности однозначно предсказывают, как должно течь время, и они недвусмысленно указывают, что два потока времени будут *одинаковыми*, если их сравнивать через червоточину, и *разными*, если их сравнивать снаружи. В этом смысле через червоточину время течет иначе, чем во внешней Вселенной, когда два устья движутся относительно друг друга.

И тогда я сообразил, что благодаря этой разнице *высокоразвитая цивилизация может сделать машину времени из одной-единственной червоточины*. Для этого не нужно иметь две. Но как это сделать? Легко, если Вы — представитель высокоразвитой цивилизации.

Для объяснения давайте представим себе мысленный эксперимент, в котором мы, люди, являемся высокоразвитыми существами. Допустим, мы с Кароли нашли очень короткую червоточину и поместили одно из ее отверстий в гостиной у себя дома, а другое в нашем семейном космическом корабле, находящемся на лужайке перед домом.

В ходе мысленного эксперимента мы покажем, что ход времени через какую-либо червоточину зависит от ее предыстории. Для простоты давайте предположим, что когда мы с Кароли приобрели эту чер-



14.7. Кароли и я строим машину времени из червоточины. *Слева:* я остаюсь дома в Пасадене рядом с одним из устьев червоточины. *Справа:* Кароли перевозит другое устье во время сверхскоростного путешествия через Вселенную. *Врезка:* Наши руки внутри червоточины

воточину, она вела себя очень просто — время в ней текло точно так же, как в остальной Вселенной. Другими словами, если бы я пробирался через эту червоточину, то и Кароли, и я, и любой человек на Земле согласился бы с тем, что я выхожу из устья в космическом корабле в тот же самый момент, как я вхожу в устье в гостиной.

Убедившись в том, что время действительно течет через червоточину таким образом, мы с Кароли решили осуществить следующий план: я остаюсь дома в нашей гостиной, в которой находится одно из устьев, а Кароли отправляется вместе с другим устьем на нашем космическом корабле в необъятные просторы Вселенной. Там она развивает очень высокую скорость, а затем возвращается обратно. В течение всего путешествия мы держим друг друга за руки, протянув их в червоточину (см. рис. 14.7).

Кароли улетает в девять часов утра первого января 2000 года по ее и по моим часам. Кароли покидает Землю и летит шесть часов почти со скоростью света по ее собственным часам, затем она поворачивает обратно и летит назад, прибывая на лужайку перед нашим домом спустя двенадцать часов после отлета по ее собственным часам.⁹ Я

⁹ На самом деле, если бы Кароли так быстро достигла скорости света и так же быстро замедлилась, ускорение было бы настолько велико, что оно просто убило бы Кароли и искалечило ее тело. Однако в духе мысленного физического эксперимента я буду предполагать, что ее стойкое тело с комфортом переносит любое ускорение.

14. Червоточины и машины времени

держу ее за руку и вижу червоточину на протяжении всего путешествия. Конечно, я соглашаюсь, *глядя через червоточину*, что она вернулась через двенадцать часов, в девять часов вечера первого января 2000 года. Глядя через червоточину в девять часов вечера, я вижу не только Кароли, но и лужайку с нашим домом позади нее.

Затем в девять часов одну минуту я оборачиваюсь и смотрю в окно — там я вижу пустую лужайку перед домом. Космического корабля с Кароли и другим устьем червоточины там нет. Если бы у меня был достаточно хороший телескоп, я бы увидел космический корабль Кароли, улетающий от Земли. Этот полет по земным часам, *как он выглядит из внешней Вселенной*, продлится десять лет. [Это стандартный «парадокс близнецов»; «близнец», который улетаёт и возвращается обратно с большой скоростью (Кароли), пробудет в пути только двенадцать часов, в то время как «близнец», который остается на Земле (я), должен ждать окончания путешествия десять лет.]

Затем начинается моя повседневная жизнь. День за днем, месяц за месяцем, год за годом я продолжаю жить в ожидании — и, наконец, первого января 2010 года Кароли возвращается из путешествия и приземляется на лужайке перед домом. Я выхожу ее встречать и обнаруживаю, как и ожидалось, что она постарела только на двенадцать часов, а не на десять лет. Она сидит в космическом корабле, протянув руку в устье червоточины, и держит там кого-то за руку. Я стою позади нее, смотрю в отверстие норы и вижу, что человек, которого она держит, — это я сам, но на десять лет моложе, сидящий в нашей гостиной первого января 2000 года. Червоточина стала машиной времени. Если я сейчас (первого января 2010 года) войду в устье червоточины, которое находится в космическом корабле, то появлюсь из другого отверстия в нашей гостиной первого января 2000 года, где повстречаю молодого самого себя. И наоборот, если мой молодой двойник пройдет в отверстие в гостиной первого января 2000 года, то он появится из отверстия в космическом корабле первого января 2010 года. Путешествие через червоточину в одном направлении отбрасывает меня назад во времени на 10 лет; путешествие в другом направлении переносит меня на 10 лет вперед.

Но ни я и никто другой не смогут воспользоваться червоточиной, чтобы перенестись назад во времени дальше, чем девять часов утра первого января 2000 года. Тот момент, когда червоточина превратилась в машину времени, является границей для путешествия назад.

Законы общей теории относительности выполняются четко. Это прямо следует из них, если червоточины можно удерживать с помощью экзотического вещества.

Летом 1987 г., через месяц после того, как я пришел к этим выводам, моей жене позвонил Ричард Прайс. Он беспокоился обо мне. Ричард — мой близкий друг, шестнадцать лет назад он показал, что черная дыра избавляется от всех своих «волос» с помощью излучения (глава 7). Он услышал, что я работаю над теорией машин времени, испугался, что я немного не в себе и впал в старческое слабоумие. Кароли попыталась его переубедить.

Звонок Ричарда немного встряхнул меня. Не потому, что я сомневался в собственном здравом смысле; таких сомнений у меня не было. Но если даже мои ближайшие друзья обеспокоены, то (по крайней мере, с целью защиты Майка Морриса и других моих студентов) следует быть осторожным, когда мы будем знакомить с результатами наших исследований сообщество физиков и широкую публику.

Зимой 1987–1988 гг. в качестве такой предосторожности я решил опубликовать кое-что о машинах времени. Вместе с моими учениками Майком Моррисом и Улви Юртсевером мы попытались еще раз проанализировать все, что мы знали о червоточинах и ходе времени. И только после того, как мне все стало предельно ясно, я решился на публикацию.

Когда я скрывался в уединении, Моррис, Юртсевер и я работали, поддерживая связь с помощью компьютера и телефона. Тогда Кароли получила приглашение на два года на место постдока в городе Мэдисон (Висконсин), и первые семь месяцев, с января по июль 1988 г., я был при ней «домохозяйкой». Я настроил свой компьютер и оборудовал рабочее место на чердаке дома, который мы снимали в Мэдисоне; большую часть своего времени я проводил на этом чердаке: думал, считал, писал; в основном это касалось других тем, но иногда я думал над проблемой времени и червоточин.

Чтобы получить дополнительный стимул и проверить свои идеи у искушенных «оппонентов», раз в несколько недель я ездил в Милуоки, где общался с ведущими специалистами по общей теории относительности из группы Джона Фридмана и Леонарда Паркера. Иногда я ездил в Чикаго, чтобы поговорить со специалистами из другой группы, возглавляемой Субраманьяном Чандрасекаром, Робертом Герохом и Робертом Уолдом.

Один мартовский визит в Чикаго мне запомнился очень хорошо. Я выступал на семинаре и рассказывал о том, что я знаю о червоточинах и машинах времени. После семинара Герох и Уолд подошли ко мне и в упор спросили: *«Разве не будет червоточина автоматически разру-*

14. Червоточины и машины времени

шаться в тот самый момент, когда развитая цивилизация попытается превратить ее в машину времени?»

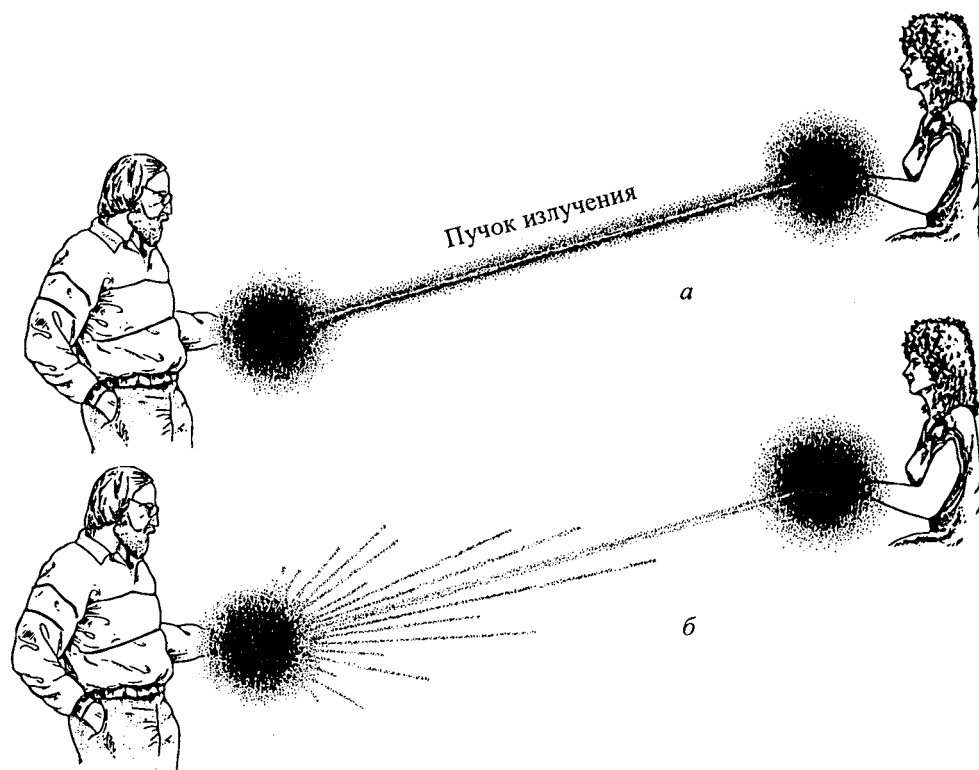
Как? Почему? К чему этот вопрос? Они объяснили. Переведенное на язык нашего с Кароли приключения, их объяснение выглядело следующим образом. Предположим, что Кароли возвращается на Землю, по-прежнему имея на борту космического корабля устье червоточины, а я сижу на Земле у себя дома рядом с другим устьем. Вскоре после ее поворота домой излучение (электромагнитные волны) внезапно получает возможность путешествовать во времени вдоль червоточины. Каждый случайный импульс излучения, уходящий из нашего дома в Пасадене и распространяющийся со скоростью света к космическому кораблю, может достигнуть звездолета через пять лет (если смотреть с Земли), проникнуть там в устье червоточины, пропутешествовать назад во времени на пять лет (опять же, если смотреть с Земли) и появиться из отверстия на Земле точно в тот же самый момент, когда этот импульс начал свое путешествие. Излучение накладывается само на себя не в пространстве, а в пространстве-времени и его интенсивность удваивается. Более того, во время путешествия каждый квант излучения (каждый фотон) приобретает дополнительную энергию благодаря относительному движению отверстий червоточины (добавка за счет эффекта Доплера).

После еще одного прохода излучения до космического корабля и обратно (через червоточину) оно вновь возвращается в тот же самый момент, как ушло, и снова накладывается само на себя. И снова его энергия растет за счет эффекта Доплера. Это происходит снова и снова, в результате чего энергия излучения становится бесконечной (рис. 14.8а).

Таким образом, начав с произвольной, очень малой интенсивности, пучок приобретает бесконечную энергию, курсируя в пространстве между двумя отверстиями червоточины. Герох и Уолд утверждали, что при прохождении пучка через червоточину он будет создавать бесконечную кривизну пространства-времени и, скорее всего, разрушит червоточину, не позволив ей превратиться в машину времени.

Из Чикаго в Мэдисон я возвращался по 90-му хайвэю в ошарашенном состоянии. В голове у меня роились геометрические картинки, состоящие из пучков излучения, распространяющихся между устьями червоточины, причем эти отверстия двигались друг относительно друга. Я на зрительных образах пытался понять, что на самом деле случится: правы ли Герох и Уолд, или они ошибаются.

Постепенно, когда я приближался к границе штата Висконсин, образы в моем мозгу приобрели ясность. Червоточина *не* будет разру-



- 14.8. (а) Разрушение червотчины (по Героху—Уолду) при попытке ее превращения в машину времени. Интенсивный пучок излучения распространяется между устьями червотчины, постепенно наращивая свою энергию. Эта энергия бесконечно увеличивается и разрушает червотчину. (б) То, что происходит на самом деле: червотчина дефокусирует пучок, уменьшая его мощность. Пучок становится все слабее и слабее, и червотчина не разрушается

шаться. Герох и Уолд не приняли в расчет существенного фактора: каждый раз, когда пучок излучения проходит через червотчину, он *дефокусируется* (см. Врезку 14.1). После дефокусировки пучок появляется из устья на Земле и расходится достаточно широко, так что только незначительная часть его возвращается обратно к отверстию на космическом корабле и переносится через червотчину вновь к Земле, чтобы «наложиться» на самого себя (рис. 14.8б).

Я образно представил себе конечный результат. Сложив всю энергию излучения после всех проходов туннеля червотчины (после каждой дефокусировки она становится все меньше и меньше), я получил, что конечный пучок должен быть слабым; слишком слабым, чтобы разрушить червотчину.

Мои расчеты оказались правильными, но, как я объясню позже, мне следовало быть более осторожным. Вся эта история с разрушением

14. Червоточины и машины времени

червоточины должна была предостеречь меня и показать, что создателя машин времени подстерегают неожиданные опасности.

* * *

Студенты выпускного курса часто доставляют мне большое удовольствие. Они делают свои собственные открытия; они спорят со мной и побеждают; они учат меня неожиданным вещам. Именно так произошло с Моррисом и Юртсевером, когда мы заканчивали нашу статью для *Physical Review Letters*. Авторство большинства технических идей и деталей в статье принадлежало им.

Наша работа подходила к концу. С одной стороны, меня начали одолевать сомнения: как бы не запятнать научную репутацию Морриса и Юртсевера, которые подавали большие надежды, ярлыком «сумасшедших физиков-фантастов»; с другой стороны, я испытывал все больший энтузиазм по поводу того, что мы узнали. Кроме того, мы поняли, что вопросы типа «сагановских» могут быть мощным инструментом в физических исследованиях. В последнюю минуту я подавил свои сомнения (которые Моррис и Юртсевер, по-видимому, не разделяли) и согласился с их предложением назвать нашу статью «Червоточины, машины времени и слабое энергетическое условие» («слабое энергетическое условие» — технический термин, связанный с «экзотическим веществом»).

Несмотря на слова «машины времени» в названии, наша статья была принята к публикации без возражений. Два анонимных рецензента с сочувствием отнеслись к нам. Я вздохнул с облегчением.

Приближалась дата публикации, и меня снова одолели сомнения. Я попросил Отдел связи с общественностью в Калифорнийском технологическом институте не давать *никакой* рекламы о нашем исследовании, касающемся машин времени. Сенсация в прессе могла бы придать нашей работе оттенок «сумасшедшей» в глазах многих физиков, а я хотел, чтобы к нашей статье сообщество ученых отнеслось с полной серьезностью. Отдел PR согласился.

Наша статья была напечатана, все шло хорошо. Как я и надеялся, пресса не проявила к ней особого интереса, но среди физиков она возбудила определенные сомнения. К нам начали стекаться письма с вопросами и возражениями, но мы сделали свою работу. Нам было что ответить.

Реакция моих друзей была смешанной. Ричард Прайс по-прежнему беспокоился: теперь он не считал меня сумасшедшим, но он стал бояться за мою репутацию. А Игорь Новиков, мой русский друг,

наоборот, пришел в восторг. Он позвонил мне из Санта Круус (Калифорния), где он в тот момент находился, и сказал: «Я так счастлив, Кип! Ты сломал барьер. Если *ты* смог опубликовать работу по машинам времени, то и я смогу!» И он приступил к своей работе.

Парадокс матереубийцы

Среди дискуссий, вызванных нашей статьей, наиболее ожесточенным был спор о так называемом парадоксе, который я предпочитаю называть *парадоксом матереубийцы*¹⁰: если бы у меня была машина времени (сделанная из червоточины или какая-нибудь другая), я смог бы отправиться назад во времени и убить мою мать до собственного зачатия. Но ведь тогда я бы не смог родиться и убить ее!¹¹

Центральной темой в парадоксе матереубийцы является *свободная воля*: обладаю ли я, как человеческое существо, властью определять свою собственную судьбу? Могу ли я на самом деле убить свою мать, вернувшись назад во времени, или (как в многочисленных научно-фантастических историях) что-то с неизбежностью остановит мою руку, когда я попытаюсь подкрасться к ней во сне?

Даже во Вселенной без машин времени свободная воля — это то, с чем физикам очень трудно иметь дело. Мы часто пытаемся избежать этой проблемы. Она только запутывает совершенно ясные вещи. А с машинами времени все становится еще хуже. Итак, еще до публикации нашей статьи (но после длительных дискуссий с нашими коллегами из Милуоки) мы с Моррисом и Юртсевером решили не упоминать свободную волю вообще. Мы договорились обойти в статье «человеческий фактор», обсуждая путешествия в машине времени с помощью червоточин. Мы имели дело *только* с простыми неодушевленными предметами, такими как электромагнитные волны.

До публикации мы много думали о волнах, которые путешествуют во времени через червоточину; мы боялись возникновения неразрешимых парадоксов. Наконец (в частности, после существенной подсказки Джона Фридмана), мы убедили себя, что таких *неразрешимых парадоксов* не существует, и мы высказали эту гипотезу в нашей статье.¹² Мы даже расширили гипотезу и предположили, что неразрешимые пара-

¹⁰ В научно-фантастической литературе чаще используется термин «парадокс дедушки». По-видимому, рыцарски настроенные писатели-фантасты, среди которых больше мужчин, предпочитают «убивать» старых мужчин, а не молодых женщин.

¹¹ Я и мои братья и сестры очень уважаем свою мать и слушаем ее; см. сноску 2 в главе 7. Я специально попросил у своей матери разрешение использовать этот пример и получил его.

14. Червоточины и машины времени

доксы никогда не возникнут, чем бы ни являлся неодушевленный предмет, проходящий через туннель. Именно это предположение вызвало наибольшие дискуссии.

Самое интересное письмо прислал нам Джо Полчински, профессор физики из Техасского университета в Остине. Он писал: «Дорогой Кип, если я правильно понял, вы предполагаете, что в вашей [машине времени, основанной на червоточине, не будет неразрешимых парадоксов]. Мне кажется, что это не так». Затем он предложил элегантный и простой вариант парадокса матереубийцы — вариант, не связанный со свободной волей, и поэтому мы чувствовали, что обязаны его проанализировать.

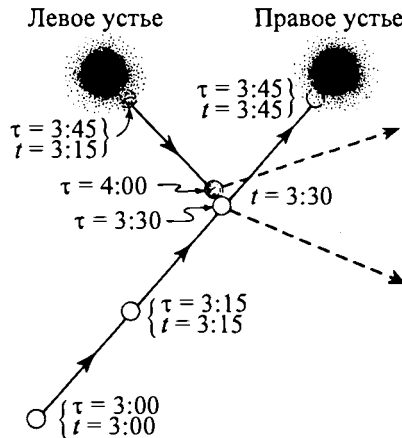
Возьмем червоточину, которая была переделана в машину времени, и разместим два ее устья в межпланетном пространстве, причем оба они будут в покое и рядом друг с другом (рис. 14.9). Допустим, бильярдный шар запускается в правое отверстие с некоторой начальной скоростью из некоторой начальной точки. Шар войдет в правое устье, переместится назад во времени и вылетит из левого устья до того, как он вошел в правое (с точки зрения внешнего наблюдателя). Затем он ударит самого себя, только более «молодого», и таким образом воспрепятствует себе войти в правое отверстие и затем ударить себя.

Эта ситуация, подобно парадоксу матереубийцы, связана с перемещением назад во времени и изменением истории. В парадоксе матереубийцы я возвращаюсь назад во времени и, убив мою мать, не даю самому себе родиться. В парадоксе Полчински бильярдный шар возвращается назад во времени и, ударив самого себя, препятствует своему путешествию во времени.

Обе ситуации не имеют смысла. Законы физики должны логически соответствовать друг другу. Точно так же эволюция Вселенной, управляемая законами физики, должна полностью согласовываться сама с собой — по крайней мере, это будет так, пока Вселенная ведет себя классическим образом (не квантово-механическим); царство квантовой механики более призрачно. Мы с бильярдным шаром — в высшей степени классические объекты (т.е. мы проявляем квантово-механические свойства, только если на нас производить чрезвычайно точные измерения; см. главу 10). Поэтому для нас с бильярдным шаром не существует способа вернуться назад во времени и изменить наши собственные истории.

¹² Спустя три года Джону Фридману и Майку Моррису удалось представить убедительное доказательство отсутствия таких парадоксов при путешествии волн назад во времени через червоточину — при условии, что волны накладываются друг на друга линейно (так, как на Врезке 10.3).

ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ И СКЛАДКИ ВРЕМЕНИ



14.9. Бильярдная версия парадокса матереубийцы, придуманная Полчински. Червоточина очень короткая и служит машиной времени, так что любой предмет, который входит в ее правое отверстие, выходит из норы за тридцать минут до своего входа в нее (по часам внешнего наблюдателя). Течение времени вне отверстия обозначается символом τ , течение времени, испытываемое самим бильярдным шаром, обозначается буквой t . Бильярдный шар запускается в момент $t = 3$ часа дня из некоторой точки и именно с той скоростью, чтобы войти в правое отверстие в момент $t = 3$ часа 45 минут. Шар появляется из левого отверстия на 30 минут раньше, в момент $t = 3$ часа 15 минут, и ударяет самого себя, более «молодого», в момент $t = 3$ часа 30 минут дня. Он сталкивает самого себя с траектории и поэтому уже не может войти в правое отверстие, а следовательно, и не ударит себя

Так что же происходит с бильярдным шаром? Чтобы это понять, мы с Моррисом и Юртсевером углубились в изучение *начальных условий* шара, т.е. его начального местоположения и скорости. Мы спросили себя: «Для тех же самых начальных условий, которые привели к парадоксу Полчински, существует ли какая-либо *другая* траектория бильярдного шара, кроме изображенной на рис. 14.9, которая являлась бы *логически самосогласованным* решением и следствием физических законов, управляющих движением классических бильярдных шаров?» После многочисленных дискуссий мы пришли к выводу, что ответ, скорее всего, положительный, но мы не были абсолютно уверены в этом. И у нас уже не было времени это уточнять. Моррис и Юртсевер заканчивали писать свои диссертации и покидали Калифорнийский институт: им удалось получить работу в Милуоки и Триесте.

* * *

К счастью, в Калифорнийском институте не перевелись умные студенты. На подходе были еще двое: Фернандо Эчеверрия и Гуннар Клинкаммер. Они и подхватили эстафету с парадоксом Полчински.

14. Червоточины и машины времени

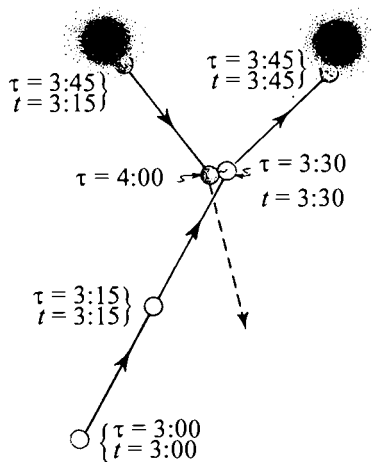
После нескольких месяцев сложных математических выкладок они доказали, что действительно *существует* полностью самосогласованная траектория бильярдного шара, в основе которой лежат начальные данные Полчински и которая удовлетворяет всем законам физики, управляющим движением классических бильярдных шаров. По сути дела, есть *две* такие траектории. Они показаны на рис. 14.10. Я опишу каждую из этих траекторий по очереди, с точки зрения самого шара.

На схеме (а) (левая половина рис. 14.10) изображена траектория молодого, чистого изначального шара, который начинает свое движение в момент времени $t = 3$ часа дня и движется по тому же самому маршруту, как в парадоксе Полчински (рис. 14.9). Этот маршрут должен привести его к правому входу в червоточину. Через полчаса, в момент $t = 3$ часа 30 минут, *сзади слева* на него налетает более пожилой и потрепанный шар (который, для нас это ясно, он же, только постарше). Этот удар достаточно мягок и он только немного отклоняет молодой шар от его первоначального курса. Но этого удара вполне хватает, чтобы его помять. Молодой шар, уже помятый, продолжает двигаться по слегка измененной траектории и входит в отверстие червоточины в момент времени $t = 3$ часа 45 минут. Затем он путешествует назад во времени на 30 минут и выходит из другого отверстия в момент $t = 3$ часа 15 минут. По сравнению с траекторией в парадоксе Полчински (рис. 14.9), его теперешняя траектория немного изменена. Поэтому наш старый и помятый шар наносит своему более молодому «Я» мягкий скользящий удар в левый бок в момент времени $t = 3$ часа 30 минут. Такого сильного удара, как на рис. 14.9, не будет. Таким образом, последовательность действий шара вполне самосогласованна.

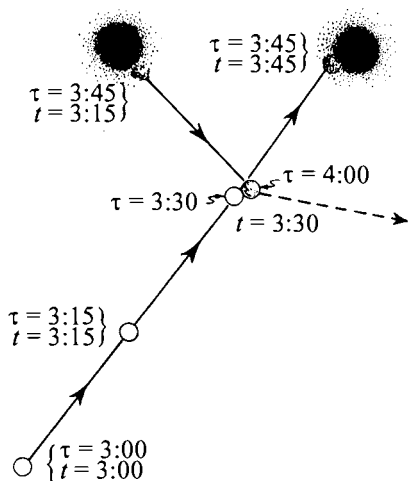
На схеме (б) (правая половина рис. 14.10) изображена та же траектория, что и на схеме (а), но здесь геометрия столкновения несколько отличается, соответственно, траектория между столкновениями является немного другой. В частности, старый помятый шар возникает из левого отверстия и направляется по другой траектории, чем на схеме (а). Эта траектория выводит его перед молодым изначальным шаром (а не позади него), и он ударяет юный шар по его *переднему правому боку* (а не по левому заднему).

Эчеверрия и Клинкхаммер показали, что обе траектории, (а) и (б), удовлетворяют всем физическим законам, которые управляют движением классических бильярдных шаров. Поэтому обе они могут возникнуть в реальной Вселенной (*если* реальная Вселенная может содержать машины времени, построенные на червоточинах).

Это и внушает наибольшее беспокойство. Такая ситуация никогда не может произойти во вселенной без машин времени. Если нет машин



а



б

14.10. Разрешение парадокса матереубийцы в версии Полчински (рис. 14.9): бильярдный шар, начинающий свое движение в 3 часа дня с теми же начальными условиями (исходная точка и скорость), как в парадоксе Полчински, может двигаться по одной из двух указанных здесь траекторий. Каждая из этих траекторий является полностью самосогласованной и удовлетворяет всем классическим законам физики на всем протяжении траектории

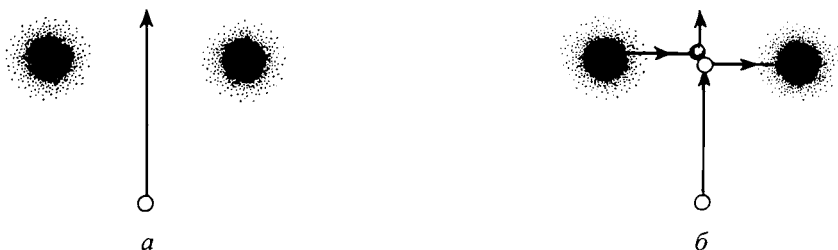
времени, каждый набор начальных условий для бильярдного шара дает одну, и только одну траекторию, удовлетворяющую всем классическим законам физики. Есть только одно направление, по которому может двигаться наш шар. Машина времени разрушает такой порядок. Теперь есть два одинаково хороших возможных направления, по которым шар может двигаться.

На самом деле ситуация еще хуже, чем выглядит на первый взгляд: машина времени разрешает существование бесконечного числа одинаково хороших возможных направлений для движения шара. Во Врезке 14.2 описан простой пример.

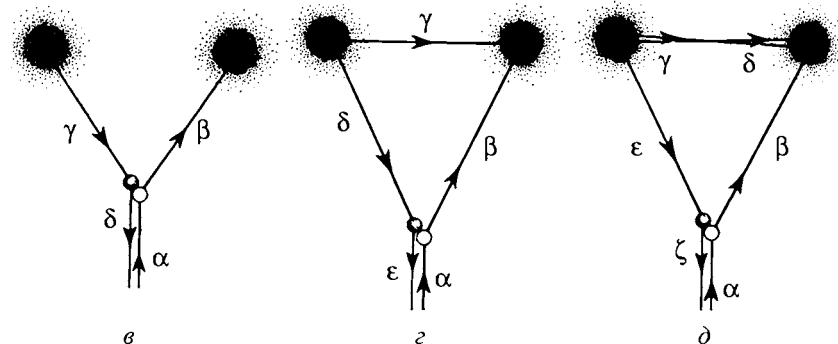
Врезка 14.2

Кризис бильярдного шара: бесконечное множество траекторий

Однажды, сидя в аэропорту Сан-Франциско в ожидании самолета, я сообразил, что бильярдный шар, запущенный между двумя устьями червоточины, превращенной в машину времени, может двигаться по двум траекториям. По одной из них, (а), он пролетит между двумя устьями без приключений. По другой, (б), во время его прохода между двумя отверстиями в результате столкновения его отбрасывает направо. Затем он продолжает движение к левому отверстию норы, выходит из него ранее своего предыдущего входа, ударяет сам себя и улетает прочь.



Через несколько месяцев Роберт Форвард [один из пионеров детектирования гравитационных волн методом лазерной интерферометрии (глава 10) и писатель-фантаст] нашел третью траекторию, удовлетворяющую всем законам физики. Это траектория (в), изображенная ниже. Столкновение происходит перед тем как шар приближается к устьям червоточины. Затем я понял, как можно сделать так, чтобы столкновение происходило все раньше и раньше, как на схемах (г) и (д): шар должен между своими двумя визитами к месту столк-



новения пройти по червоточине несколько раз. Например, на схеме (д) шар проходит по маршруту α, получает удар от своего старого альтер-эго, выходит на маршрут β и затем влетает в правое устье. Потом он проходит сквозь червоточину (назад во времени), достигает левого устья и возвращается обратно через червоточину по маршруту γ (еще дальше назад во времени). Еще одно возвращение через червоточину по маршруту δ (еще дальше назад во времени) и, наконец, маршрут ε, который приводит шар к месту столкновения, откуда он берет курс ζ.

Очевидно, существует бесконечное множество траекторий (соответствующих разному числу переходов через червоточину), которые удовлетворяют классическим (не квантовым) законам физики и имеют одинаковые начальные условия (одинаковые местоположения и скорости бильярдного шара). Остается гадать, сошла ли физика с ума или законы физики каким-то образом подскажут, какую траекторию следует выбрать шару.

* * *

Неужели машины времени сводят физику с ума? Неужели из-за них невозможно предсказать, что будет происходить в тот или иной

момент? Если нет, как законы физики помогают выбрать из бесконечного множества траекторий ту, по которой проследует бильярдный шар?

В поисках ответа на эти вопросы мы с Гуннаром Клинкхаммером обратились в 1989 г. от *классических* законов физики к *квантовым*. Почему к ним? Потому что квантовые законы — «Верховные правила» нашей Вселенной.

В частности, законы квантовой гравитации контролируют силы гравитации и структуру пространства и времени. Классические законы гравитации общей теории относительности Эйнштейна являются просто приближением к законам квантовой гравитации — приближением, которое имеет превосходную точность вдали от всех сингулярностей и на масштабах, гораздо больших, чем 10^{-33} см, тем не менее, это все-таки приближение (глава 13).

Точно так же классические законы физики, которые мы с моими студентами использовали при изучении движения бильярдных шаров в парадоксе Полчински, являются всего лишь приближением к квантово-механическим законам. Поскольку классические законы предсказывают «чепуху» (бесконечное множество возможных траекторий для бильярдного шара), мы с Клинкхаммером обратились к законам квантовой механики для более глубокого понимания процесса.

«Правила игры» в квантовой физике совершенно другие, чем в классической физике. Когда мы задаем начальные условия и пользуемся при этом классическими законами, они предсказывают, что произойдет впоследствии (например, по какой траектории проследует шар); и если машин времени не существует, эти предсказания дают единственно возможный результат. Наоборот, квантовые законы предсказывают всего лишь вероятности возможных событий (например, вероятность того, что шар проследует в ту или иную область пространства).

В свете этих правил квантово-механической игры нас не удивил ответ, который мы с Клинкхаммером получили из квантово-механических законов. Мы поняли следующее: если шар начинает движение по траектории Полчински (рис 14.9 и 14.10 в момент времени $t = 3$ часа дня), то существует определенная квантово-механическая вероятность — скажем, 48 процентов того, что он последует по траектории (а) на рис. 14.10, и определенная вероятность — скажем, тоже 48 процентов для траектории (б). Определенная (гораздо меньшая) вероятность существует для каждой из бесконечного множества других траекторий, разрешенных классической физикой. В каждом «эксперименте» шар проследует только по одной траектории, разрешаемой классическими законами; но если мы выполним огромное количество таких эк-

14. Червоточины и машины времени

спериментов с бильярдным шаром, в 48 процентов случаев шар выберет траекторию (а), еще в 48 процентах случаев — траекторию (б), и т. д.

Этот вывод отчасти является удовлетворительным. Из него следует, что законы физики достаточно легко могут приспособиться к законам времени. Будут и сюрпризы, однако ничего сверхъестественного и парадоксального не ожидается. Мы можем представить, что *National Enquirer*, узнав о наших результатах, вполне способен поместить шапку: **ФИЗИКИ ДОКАЗАЛИ, ЧТО МАШИНЫ ВРЕМЕНИ СУЩЕСТВУЮТ.** (Вот такого «освещения» я все время и боюсь.)

* * *

Осенью 1988 г., через три месяца после публикации нашей статьи «Червоточины, машины времени и слабое энергетическое условие», Кэй Дэвидсон, репортер из *San Francisco Examiner*, наткнулся на эту статью в *Physical Review Letters* и все испортил.

Могло быть и хуже. По крайней мере, сообщество физиков в течение трех месяцев спокойно впитывало наши идеи без сенсационной шумихи.

Но шквал журналистских страстей остановить было невозможно. **ФИЗИКИ ИЗОБРЕЛИ МАШИНЫ ВРЕМЕНИ!** — такие заголовки можно было увидеть повсюду. Журнал «Калифорния» в статье «Человек, который изобрел путешествие во времени» даже поместил фотографию, где я в голом виде занимаюсь физикой на горе Паломар. Я был убит — не из-за фотографии, а из-за сыпавшихся отовсюду утверждений, что я изобрел машины времени и путешествия во времени. *Если законы физики разрешают машины времени (а я сомневаюсь в этом, как будет ясно в конце этой главы), то их осуществление, скорее всего, менее доступно современному человечеству, чем космические путешествия неандертальцам.*

Поговорив с двумя репортерами, я оставил все попытки остановить лавину и добиться правильного освещения событий и стал скрываться от прессы. Пэт Лайон, мой помощник по административным делам, вынужден был отбиваться от осаждавших его представителей прессы с помощью заявлений типа: «Профессор Торн считает, что пока еще не пришло время обнародовать результаты его исследований. Когда он выяснит, запрещают или нет законы физики существование машин времени, он напишет об этом популярную статью».

Написав эту главу для книги, я фактически выполняю свое обещание.

ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ И СКЛАДКИ ВРЕМЕНИ

Защита хронологии?

В феврале 1989 г., когда основная шумиха в прессе утихла, а мы с Эчеверрия и Клинкхаммером бились над парадоксом Полчински, я полетел в Боузмен (Монтана), чтобы прочесть там лекцию. Там я встретился с Биллом Хискоком, бывшим студентом Чарльза Мизнера, и начал выяснять у него, что он думает по поводу червоточин и машин времени. В последнее время это стало моим пунктиком. Я хотел услышать обоснованные критические замечания, ожидал новых идей и точек зрения.

«Может быть, вам следует заняться изучением электромагнитных вакуумных флуктуаций», — сказал мне Хискок. — «Может быть, они разрушат червоточину, когда высокоразвитые существа попытаются превратить ее в машину времени». Хискок подразумевал мысленный эксперимент, в котором моя жена Кароли (как некое высокоразвитое существо) летит назад, на Землю, в семейном космическом корабле, в котором находится один из входов в червоточину; а я в это время сижу на Земле рядом с другим входом, и червоточина вот-вот превратится в машину времени (рис. 14.7 и 14.8). Хискок утверждал, что электромагнитные флуктуации вакуума могут циркулировать в червоточине наподобие пучков излучения (рис. 14.8). Накладываясь друг на друга, эти флуктуации могут стать бесконечно большими и разрушить червоточину.

Я отнесся к этому утверждению скептически. За год до этого, когда я ехал домой из Чикаго, я пришел к выводу, что пучки излучения, циркулирующие по червоточине, *не* будут накапливаться и создавать пучок бесконечной энергии, т. е. они не будут разрушать червоточину. Червоточина спасает сама себя путем дефокусировки излучения. Таким же образом, подумал я, она может дефокусировать и циркулирующие электромагнитные вакуумные флуктуаций и таким образом сможет спасти себя.

С другой стороны, подумалось мне, машины времени — это такое радикальное понятие в физике, что мы должны исследовать любую возможность их разрушения. Поэтому, отбросив свой скептицизм и взяв в помощники ученого из моей группы по имени Сунг-Вон Ким, я приступил к расчетам поведения циркулирующих флуктуаций вакуума.

За несколько лет до этого Хискок и Дебора Конковски разработали математический аппарат и внесли ряд идей, которые нам сильно помогли. Несмотря на эту помощь, нас с Кимом сильно сдерживало наше невежество в вопросах вакуумных флуктуаций, точнее, в законах квантовых полей в искривленном пространстве-времени (глава 13). Но, наконец, в феврале 1990 г., после целого года фальстартов и ошибок, наши вычисления сошлись и дали долгожданный ответ.

14. Червоточины и машины времени

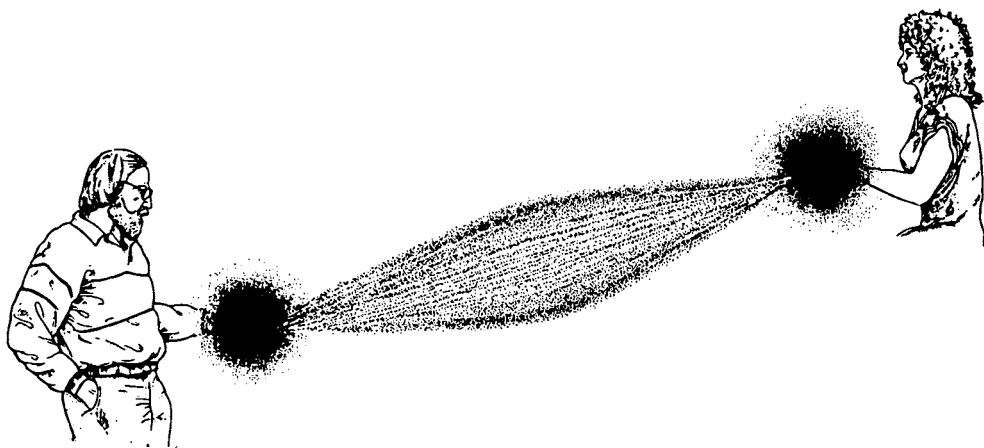
Я был удивлен и даже шокирован. Несмотря на все усилия червоточины дефокусировать флуктуации вакуума, они стремились снова сфокусироваться (рис. 14.11). Дефокусированные червоточинной флуктуации расширялись, удаляясь от устья на Земле; вначале казалось, что они не попадут на космический корабль. Затем, как будто притянутые какой-то таинственной силой, они сходились к устью червоточины на космическом корабле Кароли. Вернувшись через червоточину к Земле, они затем снова расходились от земного устья и опять сходились к устью на корабле. Этот процесс повторялся снова и снова, и в результате формировался мощный пучок вакуумных флуктуаций.

Но будет ли этот пучок электромагнитных вакуумных флуктуаций достаточно интенсивным, чтобы разрушить червоточину? — спросили мы себя. Мы пытались найти ответ на этот вопрос в течение восьми месяцев, с февраля по сентябрь 1990 г. После ряда неудачных попыток мы, наконец, пришли к выводу (неправильному): «Возможно, нет». Наши доводы показались нам и некоторым ранее знакомым с ними нашим коллегам достаточно убедительными, поэтому мы написали статью и представили ее в *Physical Review*.

Рассуждения наши были следующими: вычисления показали, что циркулирующие электромагнитные флуктуации вакуума становятся *бесконечно большими только на исчезающе коротком промежутке времени*. Они приобретают максимальное значение точно в тот момент, когда впервые становится возможным использовать червоточину для обратного путешествия во времени (т. е. в тот момент, когда червоточина впервые становится машиной времени); и затем они немедленно исчезают (рис. 14.12).

Но законы квантовой гравитации (которые мы не очень хорошо понимаем), по-видимому, говорят о том, что такого понятия, как «исчезающе короткий промежуток времени», не существует. Флуктуации пространственно-временной кривизны делают понятие длины бессмысленным на масштабах меньших, чем длина Планка—Уилера, 10^{-33} см (рис. 14.3 и соответствующий раздел текста). Точно так же флуктуации кривизны должны делать понятие времени бессмысленным на масштабах менее 10^{-43} с («время Планка—Уилера», которое равно длине Планка—Уилера, деленной на скорость света). Более короткие временные интервалы существовать не могут. Так утверждают законы квантовой гравитации. На таких маленьких интервалах не имеют смысла понятия *до*, *после* и *эволюция во времени*.

Поэтому, как утверждали мы с Кимом, циркулирующие электромагнитные флуктуации вакуума должны прекратить развиваться во времени, т. е. должны перестать нарастать за 10^{-43} с до того, как чер-



14.11. Мы с Кароли пытаемся превратить червоточину в машину времени с помощью метода, показанного на рис 14.7. При этом электромагнитные флуктуации вакуума распространяются между двумя устьями по червоточине, накладываясь друг на друга и создавая пучок огромной флуктуационной энергии

воточина превратится в машину времени. Законы квантовой гравитации должны обрезать рост флуктуаций. Эти же законы позволяют флуктуациям продолжить свое теперь уже затухание снова спустя всего лишь 10^{-43} с после того, как машина времени заработала. Между этими моментами *время* как таковое не существует, и эволюции тоже нет (рис. 14.12). Важным моментом становится вопрос: *насколько интенсивным стал пучок циркулирующих флуктуаций, когда квантовая гравитация обрезала их рост?* Наши расчеты ясно и недвусмысленно показали: когда пучок перестал расти, он все еще слишком слаб, чтобы разрушить червоточину; следовательно, говоря словами из нашей статьи, весьма вероятно, что «вакуумные флуктуации не могут препятствовать образованию или существованию замкнутых времяподобных кривых». (*Замкнутые времяподобные кривые* на языке физиков означают «машины времени»; обжегшись на прессе, я перестал пользоваться словами «машина времени» в своих статьях; чтобы пресса, не знакомая с физическим жаргоном, ничего не могла в них более понять.)

В сентябре 1990 г., когда мы послали нашу статью в *Physical Review*, мы с Кимом также послали несколько копий некоторым нашим коллегам, включая Стивена Хокинга. Он с интересом прочел нашу статью — и не согласился с ней. Хокинг не возражал против наших расчетов, касающихся пучка циркулирующих флуктуаций вакуума (по сути дела, аналогичные вычисления Валерия Фролова в Москве подтвердили к тому времени наши результаты). Хокинг протестовал против нашего анализа эффектов квантовой гравитации.



14.12. Кривая интенсивности электромагнитных флуктуаций вакуума, циркулирующих по червоточине до и после начала работы машины времени

Хокинг соглашался с тем, что квантовая гравитация, по-видимому, обрежет рост вакуумных флуктуаций за 10^{-43} с до того, как появится машина времени, т. е. за 10^{-43} с до того, как они могли бы стать бесконечно большими. «Но кем будут измерены эти 10^{-43} секунды? В чьей системе отсчета?» — спросил он. Время — не абсолютная категория, а «относительная», напомнил нам Хокинг; оно зависит от системы отсчета. Мы с Кимом предположили, что это может быть система отсчета кого-либо, находящегося в покое в устье червоточины. Хокинг же ратовал за другую систему отсчета, связанную с самими флуктуациями. Точнее говоря, за систему отсчета наблюдателя, который вместе с флуктуациями циркулирует между Землей и космическим кораблем по червоточине так быстро, что он видит расстояние между Землей и кораблем, сжатое от 10 световых лет (10^{19} см) до длины Планка–Уилера (10^{-33} см). Законы квантовой гравитации могут остановить рост пучка только за 10^{-43} с до того, как червоточина превратится в машину времени, *по часам такого «циркулирующего» наблюдателя*. Таково было замечание Хокинга.

Возвращаясь к точке зрения наблюдателя, находящегося в покое в червоточине (на показания которого полагались мы с Кимом), можно сказать, что вывод Хокинга означал: обрезание за счет квантовой гравитации возникает за 10^{-95} с до того, как червоточина станет машиной времени, а не за 10^{-43} с. К этому времени, в соответствии с нашими расчетами, вакуумный флуктуационный пучок станет достаточно сильным и, *может быть, будет в состоянии разрушить червоточину*.

Замечание Хокинга о месте квантово-гравитационного обрезания было убедительным. Возможно, он прав, заключили мы с Кимом после длительных раздумий; и мы смогли внести изменения в нашу статью с учетом его рекомендаций до ее публикации. Однако последняя выделенная курсивом строчка неоднозначна. Даже если Хокинг был прав, было совершенно не ясно, разрушит ли пучок вакуумных флуктуаций червоточину. Чтобы это понять наверняка, требовалось узнать, что происходит в момент образования машины времени, в интервале времени 10^{-95} с, когда все определяется силами квантовой гравитации.

Короче говоря, *законы квантовой гравитации прячут от нас ответ на вопрос, можно ли успешно превратить червоточины в машины времени.* Чтобы получить ответ, люди вначале должны понять законы квантовой гравитации.

У Хокинга было свое твердое мнение о машинах времени. Он считал, что природа их терпеть не может, и выразил эту «неприязнь» в виде *гипотезы о защите хронологии*. Гипотеза гласит, что *законы физики запрещают существование машин времени.* (Хокинг, с присущим ему юмором, характеризовал этот вывод так: «дабы сохранить этот мир для историков!»)

Хокинг подозревал, что рост пучка вакуумных флуктуаций — это способ, которым природа усиливает защиту хронологии: *всякий раз, когда кто-то пытается создать машину времени, независимо от того, какой тип устройства используется при этой попытке (червоточина, вращающийся цилиндр,¹³ «космическая струна»,¹⁴ и т.д.), перед тем как это устройство превратится в машину времени, через это устройство начнет циркулировать пучок вакуумных флуктуаций и разрушит его.* Хокинг готов был держать какое угодно пари по этому поводу.

У меня *нет* ни малейшего желания бросать ему вызов. Я получаю большое удовольствие от споров с Хокингом, но только от тех споров, в которых у меня большой шанс на победу. Я нутром чувствую, что этот спор проиграю. Наши с Кимом расчеты, а также неопубликованные расчеты, которые недавно сделал Иенна Фланаган (мой студент) говорят о том, что Хокинг, скорее всего, прав. *Каждая машина времени, по-видимому, самоуничтожается (с помощью циркулирующих вакуумных флуктуаций) в момент ее активации.* Однако мы этого до конца не узнаем до тех пор, пока физики не познают законы квантовой гравитации.

¹³ См. сноску 8 на стр. 504.

¹⁴ Недавно Ричард Готт из Принстонского университета сделал открытие, что машину времени можно сделать из двух бесконечно длинных космических струн (гипотетических объектов, которые, возможно, существуют в реальной Вселенной; а возможно, и нет), если заставить их двигаться друг относительно друга с очень большой скоростью.

ЭПИЛОГ

Обзор наследия Эйнштейна, прошлое и будущее теории, основные действующие лица

Почти сто лет прошло с тех пор, как Эйнштейн разрушил концепцию «абсолютного» пространства и времени Ньютона и начал закладывать фундамент своей собственной теории. За истекшее столетие теоретическое наследие Эйнштейна выросло и включает теперь, в частности, понятие об искривленном пространстве-времени и целый ряд экзотических объектов, появившихся целиком и полностью на основе этого понятия: черные дыры, гравитационные волны, сингулярности (закрытые и обнаженные), кротовые норы и машины времени.

В разные эпохи развития науки физики отказывали каждому из этих объектов в праве на существование.

- В этой книге мы узнали, как Эддингтон, Уилер и даже Эйнштейн высказывали скептицизм по поводу черных дыр; Эддингтон и Эйнштейн умерли до того, как была доказана их неправота, а Уилер, в конце концов, стал их приверженцем и защитником.
- В 1940–50-х годах многие физики, ошибочно интерпретировавшие уравнения общей теории относительности, были очень скептически настроены в отношении существования гравитационных волн (рябь кривизны). Но это история для другой книги, а скептицизма уже нет.
- Для многих физиков было (и остается) ужасным шоком открытие, что сингулярности являются неизбежным следствием законов общей теории относительности Эйнштейна. Некоторые физики испытывают комфорт оттого, что верят в гипотезу Пенроуза о «космической цензуре» (согласно которой все сингулярности должны быть закрыты, голые сингулярности запрещены). Независимо от того, существует или нет космическая цензура, большинство физиков привыкли к сингулярностям и, подобно Уилеру, считают, что там действуют непонятные законы квантовой гравитации, которые управляют этими сингулярностями и контролируют их так же, как законы гравитации Ньютона или

Эйнштейна управляют планетами и контролируют их движение по орбитам вокруг Солнца.

- Большинство физиков сегодня считают вопиющим предположение о том, что могут существовать червоточины и машины времени, хотя общие законы относительности Эйнштейна допускают их существование. Скептически настроенных физиков может отчасти успокоить недавно возникшее представление о том, что существование червоточин и машин времени может отвергаться не «мягкими» законами Эйнштейна, а более «суровыми» законами квантовых полей в искривленном пространстве-времени и законами квантовой гравитации. Когда мы лучше поймем эти законы, возможно, из них недвусмысленно будет следовать, что они всегда защищают Вселенную от червоточин и машин времени. Или, возможно по крайней мере, от машин времени.

Что можно ожидать в ближайшие сто лет — за второй век существования теории Эйнштейна?

Похоже, наши представления о пространстве, времени и объектах, существование которых основано на искривлении пространства-времени, претерпят не менее революционные изменения, чем за прошедшее столетие. Предпосылки для этой революции следующие:

- Гравитационно-волновые детекторы позволят нам вскоре наблюдать черные дыры и «услышать» их столкновения. Можно будет записать целые симфонии и получить ценную информацию о том, как ведет себя бешено пульсирующее искривленное пространство-время. Моделирование на суперкомпьютерах позволит воспроизводить эти симфонии с тем, чтобы раскрыть их тайну. Черные дыры станут объектами детального экспериментального исследования. Что мы узнаем в результате этого исследования? Здесь возможны сюрпризы.
- В течение ближайших ста лет — и вероятно, этого не так долго осталось ждать — кто-нибудь откроет законы квантовой гравитации и детально их исследует.
- Владея законами квантовой гравитации, мы сможем точно понять, как появились пространство и время в нашей Вселенной, как они возникли из квантовой пены и сингулярности Большого взрыва. Мы сможем понять смысл часто задаваемого и кажущегося бессмысленным вопроса: «Что было до Большого взрыва?» Мы сможем узнать, действительно ли из квантовой пены рождается много вселенных, как разрушается простран-

ство-время в сингулярном ядре черной дыры и в Большом хрусте, как и где пространство и время вновь воссоздаются (если это действительно происходит). Мы также сможем понять, разрешены или запрещены машины времени законами квантовой гравитации, и всегда ли машины времени саморазрушаются в момент их возникновения?

- Законы квантовой гравитации не являются конечным этапом эволюции физических законов на пути от законов Ньютона к специальной теории относительности, к общей теории относительности, к квантовой теории и, наконец, квантовой гравитации. Законы квантовой гравитации необходимо увязать с другими законами, которые проявляются в основных фундаментальных взаимодействиях природы: электромагнитном, сильном и слабом. Возможно, в ближайшие сто лет мы поймем, как объединить все эти законы — скорее всего, не так долго осталось ждать. Это объединение может радикально изменить наше представление о Вселенной. И что тогда? Никто не может сегодня предсказать, что будет дальше. Тем не менее, это может произойти еще при моей и при вашей жизни.

Заключение (Ноябрь 1993 г.)

Альберт Эйнштейн провел большую часть из последних 25 лет своей жизни в безуспешных попытках объединить свои законы общей теории относительности с законами электродинамики Максвелла. Он не понял, что для создания единой теории необходимо учитывать законы квантовой механики. Эйнштейн умер в Принстоне, штат Нью-Джерси, в 1955 г. в возрасте семидесяти шести лет.

Субраманьян Чандрасекар (сейчас ему семьдесят три года) продолжает изучать секреты уравнения поля Эйнштейна. Часто ему помогают в этом молодые коллеги. В последние годы он научил нас многому новому о пульсациях звезд и столкновениях гравитационных волн.

Фриц Цвикки в последние годы научной деятельности все более превращался из теоретика в астронома-наблюдателя. Он обладал даром предвидения и все время генерировал новые идеи дискуссионного характера, которые, однако, выходят за рамки этой книги. В 1968 г. Цвикки оставил профессорскую должность, которую он занимал в Калифорнийском технологическом институте, и уехал в Швейцарию. Там он

провел последние годы жизни, в течение которых развивал свой собственный метод познания, так называемый «морфологический метод». Цвикки умер в 1974 г.

Лев Давидович Ландау смог интеллектуально (но не эмоционально) оправиться после того, как год провел в тюрьме (1938–1939), и продолжал свои занятия наукой и преподавательской деятельностью; был уважаем и почитаем советскими физиками-теоретиками. В 1962 г. он серьезно пострадал в автокатастрофе, и его мозг так полностью и не восстановился. Он стал совершенно другим человеком и не мог уже полноценно заниматься физикой. Ландау умер в 1968 г., но его ближайшие друзья говорили впоследствии: «Для нас Дау умер в 1962 г.»

Яков Борисович Зельдович на протяжении 1970-х и 1980-х годов оставался наиболее влиятельным астрофизиком в мире. В 1978 г. в результате трагического межличностного конфликта в его группе (без преувеличения, самой мощной группе астрофизиков-теоретиков в мире) произошел разрыв. Попытки Зельдовича создать новую группу сотрудников из молодых ученых оправдались лишь частично. В 1980-х годах он был ведущим астрофизиком и космологом в мире. Зельдович умер от сердечного приступа в Москве в 1987 г., вскоре после своей первой поездки в Америку, ставшей возможной в результате политических изменений, предпринятых Горбачевым.

Игорь Дмитриевич Новиков стал лидером научно-исследовательской группы Зельдовича–Новикова после разрыва с Зельдовичем. На протяжении 1980-х годов он осуществлял руководство группой с энергией и рвением, которые были свойственны для Зельдовича в прежние времена. Но оставшись без Зельдовича, группа стала просто одной из лучших в мире, а ведь раньше она была впереди всех! С распадом Советского Союза, в 1991 г. (после операции на сердце, которая не прибавила ему оптимизма), Новиков уехал в Данию и начал работать в Копенгагенском университете над созданием нового Теоретического Центра по астрофизике.

Виталий Лазаревич Гинзбург в возрасте семидесяти семи лет продолжает участвовать в передовых исследованиях в различных областях физики и астрофизики. Во время ссылки Андрея Сахарова в г. Горький (1980–86 гг.) Гинзбург, будучи офи-

циальным «начальником» Сахарова в Институте Лебедева в Москве, отказался уволить его и выступал в роли его защитника. При перестройке во времена Горбачева Гинзбург и Сахаров были избраны членами Палаты народных депутатов СССР, где выступали за реформу. Сахаров умер от сердечного приступа в 1989 г.

Дж. Роберт Оппенгеймер, заклеенный правительством США как неблагонадежный во время слушаний в 1954 г., воспринимался большинством физиков как герой. После этого он не занимался больше научными исследованиями, но оставался в курсе основных достижений физики. Молодые физики оттачивали на нем свои идеи. В 1967 г. Оппенгеймер умер от рака.

Джон Уилер в возрасте семидесяти двух лет продолжает поиск единой теории, которая объединила бы квантовую механику с общей теорией относительности. Его лекции и книги, среди которых следует отметить «Путешествие в мир гравитации, пространства и времени» (1990), вдохновляют молодые поколения на дальнейшие изыскания.

Роджер Пенроуз, подобно Уилеру и многим другим физикам, одержим идеей объединения общей теории относительности и квантовой механики, которое может привести к рождению квантовой гравитации. Он описал свои необычные идеи в популярной книге «Новый разум императора» (1989). Многие физики скептически относятся к его воззрениям, однако Пенроуз столько раз оказывался прав...

Стивен Хокинг также продолжает работу над созданием законов квантовой гравитации и особенно над вопросом о том, как выглядит происхождение Вселенной в рамках этих законов. Он также написал популярную книгу о своих идеях «Краткая история времени» (1988). Несмотря на болезнь, чувствует он себя неплохо.

БЛАГОДАРНОСТИ

Мой долг — выразить признательность друзьям, коллегам, благодаря которым родилась эта книга

Я начал писать эту книгу благодаря Элейн Хоукс Ватсон, чья безграничная любознательность к вопросам устройства Вселенной вдохновляла меня постоянно. За те пятнадцать лет, в течение которых я то откладывал книгу, то вновь возвращался к ней, мне оказали неоценимые помощь и поддержку близкие друзья и моя семья: Линда Торн, Карес Торн, Брет Торн, Элисон Торн, Эстель Грегори, Бонни Шумейкер и, конечно же, моя жена Кароли Уинстайн.

Я обязан многим моим коллегам — физикам, астрономам и астрофизикам, которые согласились дать мне интервью и поведали о своих воспоминаниях, касающихся разных событий и истории некоторых исследований, описанных в этой книге. Их имена приведены в специальном списке в самом начале Библиографии.

Четверо из моих коллег — Владимир Брагинский, Стивен Хокинг, Вернер Израэль и Карл Саган — были настолько добры, что согласились прочесть рукопись и высказали свои критические замечания. Многие другие читали отдельные главы и уточняли отдельные исторические и научные детали: Владимир Белинский, Роджер Блэндфорд, Карлтон Кейвс, С.Чандрасекар, Рональд Драйвер, Виталий Гинзбург, Джесси Гринштейн, Исаак Халатников, Игорь Новиков, Роджер Пенроуз, Деннис Сиамма, Роберт Сербер, Роберт Спиро, Алексей Старобинский, Рокус Вогт, Роберт Уолд, Джон Уилер, Яков Борисович Зельдович. Благодаря советам этих коллег книга стала гораздо более точной. Однако не следует думать, что они соглашались со мной во всем. В некоторых случаях наша интерпретация тех или иных событий отличалась. Я придерживался в книге своей собственной точки зрения (часто, но не всегда, с учетом критических замечаний коллег). Ряд этих замечаний, в целях исторической справедливости, приведен в Примечаниях.

Большая часть первой версии книги была в пух и прах раскритикована Линдой Обст. Я ей также благодарен. Вторую версию книги

БЛАГОДАРНОСТИ

постигла та же участь со стороны К.С. Коул, однако потом она терпеливо работала со мной над книгой, страница за страницей, пока мы не получили текст, который нас удовлетворил. Ей я особенно признателен. Я благодарю также Дебру Макей за тщательное прочтение окончательного варианта рукописи; она оказалась еще большей перфекционисткой, чем я.

Книга была значительно улучшена в результате критических замечаний, сделанных после того, как ее прочли нефизики: Людмила (Лили) Бирладину, Дорис Дрюкер, Линда Феферман, Ребекка Льюсвейт, Питер Лиман, Дина Метсгер, Фил Ричман, Барри Торн, Элисон Торн, Кароли Уинстайн. Я всем им очень благодарен. Я признателен также Хэлен Надсен, которая уточнила ряд ссылок и фактов.

Мне посчастливилось увидеть восхитительные рисунки Мэтью Зимета в книге Хейнца Пейджела «Космический код». Я попросил его проиллюстрировать и мою книгу, от чего она значительно выиграла.

Наконец, я хочу поблагодарить Издательскую программу Общественного фонда и, в особенности, Александра Дж.Берна и Антонину В.Буи, а кроме того, Эда Барбера из «W.W.Norton and Company» за их поддержку, терпение, веру в меня как писателя на протяжении всех этих лет, которые понадобились, чтобы закончить эту книгу.

ДЕЙСТВУЮЩИЕ ЛИЦА

Список действующих лиц, чье появление было необходимо для повествования

Примечание: краткие характеристики ученых и перекрестные ссылки на них, которые здесь собраны, не претендуют на то, чтобы считаться биографическими очерками. (Многие из них внесли большой вклад в областях науки, выходящие за рамки этой книги, и поэтому не получили должного освещения.) Основным критерием при включении в этот раздел была не важность научного вклада, а, скорее, частота появления того или иного лица на страницах этой книги.

Бааде, Вальтер (1893–1960) — американский оптический астроном, немец по происхождению. Вместе с Цвикки разработал концепцию сверхновых звезд и их связи с нейтронными звездами (глава 5); отождествил галактики, связанные с космическими радиоисточниками (глава 9).

Бардин, Джеймс Максвелл (р. 1939) — американский физик-теоретик. Показал, что многие (возможно, большинство) черных дыр в нашей Вселенной должны обладать быстрым вращением; совместно с Петтерсоном предсказал, что вращение черных дыр должно влиять на окружающие аккреционные диски (глава 9); совместно с Картером и Хокингом открыл четыре закона механики черных дыр (законы эволюции черных дыр) (глава 12).

Бскенштейн, Якоб (р. 1947). — израильский физик-теоретик, ученик Уилера. Вместе с Хартлом показал, что по внешним проявлениям черной дыры невозможно определить, из каких частиц она состоит (глава 7); предположил, что поверхностная площадь черной дыры является мерой ее энтропии, и выдержал по этому поводу борьбу с Хокингом, оказавшись, в конце концов, правым (глава 12).

Бор, Нильс Хендрик Давид (1885–1962) — датский физик-теоретик, лауреат Нобелевской премии. Один из основателей квантовой механики; наставник многих ведущих физиков середины XX века, включая Льва Ландау и Джона Уилера; был на стороне Чандрасекара в его споре с Эддингтоном (глава 4); пытался уберечь Ландау от тюремного заключения (глава 5); совместно с Уилером разработал теорию ядерного деления (глава 6).

Брагинский, Владимир Борисович (р. 1931) — советский физик-экспериментатор. Обнаружил квантово-механические пределы точности физических измерений, в том числе с помощью гравитационно-волновых детекторов (глава 10); создал концепцию устройств на основе квантово-неразрушающих измерений, что позволяет обойти указанные квантовые пределы (глава 10).

Вебер, Джозеф (р. 1919) — американский физик-экспериментатор; впервые в мире предложил гравитационно-волновые антенны, участвовал в разработке интерферометрических детекторов гравитационных волн (глава 10); единодушно считается «отцом» гравитационно-волновой астрономии.

Герох, Роберт (р. 1942) — американский физик-теоретик, ученик Уилера. Совместно с другими учеными разрабатывал методы анализа черных дыр (глава 13); показал, что топология пространства может меняться (например, при формировании кротовых нор) только в присутствии машины времени (глава 14); совместно с Уолдом выдвинул предположение о саморазрушении машины времени в момент ее образования (глава 14).

Гинзбург, Виталий Лазаревич (р. 1916) — советский физик-теоретик. Изобрел топливо для советской водородной бомбы, содержащее дейтерид лития (LiD) (глава 6); совместно с Ландау предложил объяснение сверхпроводимости (главы 6 и 9); привел доказательство отсутствия «волос» у черных дыр (глава 7); предложил механизм синхротронного излучения космических радиоволн (глава 9) [в 2003 г. ему была присуждена Нобелевская премия по физике за открытия в области сверхпроводимости. — *Прим. пер.*].

Грипштейн, Джесси Л. (1909–2002) — американский астроном-оптик, коллега Цвикки (глава 5). Работал вместе с Фредом Уипплом над объяснением космических радиоволн (глава 9); стоял у истоков американской радиоастрономии (глава 9); совместно с Мартином Шмидтом открыл квазары (глава 9).

Джиаккони, Риккардо (р. 1931) — американский физик-экспериментатор и астрофизик, итальянец по происхождению. Руководитель научной группы, открывшей первую рентгеновскую звезду (1962) с помощью детектора, установленного на ракете (глава 8); руководитель группы, спроектировавшей и построившей рентгеновский спутник «Ухуру», благодаря которому были получены уверенные доказательства того, что источник Лебедь X-1 — черная дыра (глава 8) [в 2002 г. получил Нобелевскую премию по физике за наблюдения рентгеновских источников излучения. — *Прим. пер.*].

Зельдович, Яков Борисович (1914–1987) — советский физик-теоретик и астрофизик. Руководил школой советских астрофизиков (глава 7); разработал теорию ядерных цепных реакций (глава 5); участвовал в разработке атомной и водородной бомбы, возглавлял группу по созданию бомбы (глава 6); совместно с Дорошкевичем и Новиковым фактически первым доказал, что «у черной дыры нет волос» (глава 7); предложил несколько астрономических методов поиска черных дыр, один из которых, в конце концов, оказался успешным (глава 8); независимо от Салпетера предположил, что сверхмассивные черные дыры являются источниками энергии квазаров и радиогалактик (глава 9); на основании законов квантовой механики выдвинул идею излучения вращающейся черной дыры, которая в процессе излучения замедляется; совместно со Старобинским подтвердил эту идею; противостоял идее Хокинга об излучении и испарении невращающейся черной дыры (глава 12).

Израэль, Вернер (р. 1931) — канадский физик-теоретик, уроженец Южной Африки. Доказал, что любая невращающаяся черная дыра должна быть сферичной и что черная дыра теряет «волосы» в процессе излучения (глава 7); сделал открытие, что поверхностная площадь черной дыры может

только увеличиваться, но не осознал значение этого вывода (глава 12); совместно с Пуассоном и Ори показал, что приливные силы вокруг сингулярности черной дыры слабеют с возрастом дыры (глава 13); на ранней стадии исследования черных дыр высказал много ценных идей (глава 3).

Картер, Брэндон (р. 1942) — австралийский физик-теоретик, ученик Денниса Сиамы в Кембридже (Англия), позднее переехал во Францию. Объяснил свойства вращающихся черных дыр (глава 7); совместно с другими учеными доказал, что черная дыра не имеет «волос» (глава 7); совместно с Бардином и Хокингом открыл четыре закона механики черных дыр (законы эволюции черных дыр) (глава 12).

Керр, Рой П. (р. 1934) — новозеландский математик. Нашел решение уравнения поля Эйнштейна, описывающее вращающуюся черную дыру, — «решение Керра» (глава 7).

Ландау, Лев Давидович (1908–1968) — советский физик-теоретик, лауреат Нобелевской премии. В 1930-х годах, вернувшись в СССР, продолжал работу над идеями, которые появились у него во время стажировки в Западной Европе (главы 5 и 13); высказал гипотезу о том, что выделение энергии звездами происходит вследствие захвата звездного вещества нейтронным ядром в центре звезды, и тем самым дал толчок Оппенгеймеру, начавшему изучать нейтронные звезды и черные дыры (глава 5); был заключен в тюрьму сталинским режимом, но затем освобожден и продолжал развивать теорию сверхпроводимости (глава 5); работал над созданием ядерного оружия (глава 6).

Лаплас, Пьер Симон (1749–1827) — французский натур-философ. Исходя из ньютоновских законов физики, выдвинул идею «темной звезды» (фактически, черной дыры); занимался популяризацией этой идеи (главы 3 и 6).

Лоренц, Хендрик Антон (1853–1928) — голландский физик-теоретик, лауреат Нобелевской премии. Создал основные предпосылки для открытия законов специальной теории относительности, в том числе сокращение Лоренца–Фицджеральда и замедление времени (глава 1); друг и сторонник Эйнштейна, поддерживал его в период создания им общей теории относительности (глава 2).

Майкельсон, Альберт Абрахам (1852–1931) — американский физик-экспериментатор, немец по происхождению, лауреат Нобелевской премии. Придумал метод интерферометрии (глава 1); с использованием этого метода совершил открытие, что скорость света не зависит от скорости движения наблюдателя во Вселенной (глава 1).

Максвелл, Джеймс Кларк (1831–1879) — британский физик-теоретик, создатель законов электричества и магнетизма (глава 1).

Мизнер, Чарльз В. (р. 1932) — американский физик-теоретик, ученик Уилера. Предложил графическое описание процесса образования черной дыры при взрыве звезды (глава 6); создал научно-исследовательскую группу, работа которой совпала с «Золотым веком» в исследовании черных дыр (глава 7); сделал открытие, что электромагнитные и другие волны, распространяющиеся возле вращающейся черной дыры, могут усиливаться за счет энергии вращения дыры (глава 12); открыл осцилляции приливной гравитации вблизи сингулярности (глава 13).

ДЕЙСТВУЮЩИЕ ЛИЦА

Минковский, Герман (1864–1909) — немецкий физик-теоретик, учитель Эйнштейна (глава 1), создатель концепции единого пространства-времени (глава 2).

Митчелл, Джон (1724–1793) — британский натур-философ. Исходя из ньютоновских законов физики, выдвинул идею «темной звезды» (фактически, черной дыры); занимался популяризацией этой идеи (главы 3 и 6).

Новиков, Игорь Дмитриевич (р. 1935) — советский физик-теоретик и астрофизик, ученик Зельдовича. Совместно с Дорошкевичем и Зельдовичем предложил доказательство того, что у черной дыры нет «волос» (глава 7); совместно с Зельдовичем предложил метод поиска черных дыр в нашей Галактике, который оказался успешным (глава 8); совместно с Торном изучал структуру аккреционного диска вокруг черной дыры (глава 12); совместно с Дорошкевичем высказал предположение, что приливные силы внутри черной дыры должны меняться в процессе старения черной дыры (глава 13); исследовал возможность существования машины времени в рамках существующих законов физики (глава 14).

Ньютон, Исаак (1642–1727) — британский натур-философ. Является создателем классической механики; ввел концепцию абсолютного пространства и времени (глава 1); открыл закон всемирного тяготения (глава 2).

Оппенгеймер, Дж. Роберт (1904–1967) — американский физик-теоретик. Занимался теоретическими исследованиями вначале в Западной Европе, а затем, в 1930-е годы, в США (глава 5); совместно с Сербером опроверг гипотезу Ландау об энерговыделении звезд за счет нейтронных ядер; совместно с Волковым определил максимально возможный предел массы для нейтронной звезды (глава 5); совместно со Снайдером рассчитал модель коллапса массивной звезды в черную дыру (глава 6); являлся руководителем проекта американской атомной бомбы; вначале противостоял проекту водородной бомбы, а затем одобрил его, но потерял допуск к секретности (глава 6); выдержал битву с Уилером по вопросу о коллапсе черных дыр (глава 6).

Пенроуз, Роджер (р. 1931) — британский математик и физик-теоретик, протеже Сиами. Выдвинул предположение, что черные дыры теряют «волосы» через излучение (глава 7); сделал открытие, что вращающиеся черные дыры запасают огромные количества энергии в воронках пространства вне горизонта событий и что эту энергию можно оттуда извлекать (глава 7); ввел концепцию видимого горизонта событий черной дыры (главы 12 и 13); сделал вывод, что площадь поверхности черной дыры должна увеличиваться, но не придавал этому выводу должного значения (глава 12); разработал глобальные (топологические) методы анализа черных дыр (глава 13); привел доказательство того, что в ядрах черных дыр должна существовать сингулярность, и совместно с Хокингом пришел к выводу, что Большой взрыв содержал сингулярность (глава 13); предположил существование «космической цензуры», согласно которой законы физики препятствуют образованию «голых сингулярностей» в нашей Вселенной (глава 13).

Прайс, Ричард (р. 1943) — американский физик-теоретик и астрофизик, ученик Торна. Привел убедительное доказательство того, что черная дыра избавляется от своих «волос» путем излучения и что все, что в принципе может излучаться, будет полностью излучено (глава 7); выдвинул гипотезу

о пульсации черных дыр, но не осознал до конца значения этого предположения (глава 7); совместно с другими учеными развивал понятие о мембране в приложении к черным дырам (глава 11); очень скептически относился к идее машины времени, выдвинутой Торном (глава 14).

Пресс, Вильям (р. 1948) — американский физик-теоретик и астрофизик, ученик Торна. Вместе с Тьюкольски доказал, что черные дыры устойчивы по отношению к малым возмущениям (главы 7 и 12); выдвинул гипотезу о том, что черные дыры могут пульсировать (глава 7); настаивал на том, что эпоха интенсивного исследования черных дыр подошла к концу (глава 7).

Рис, Мартин (р. 1942) — британский астрофизик, ученик Сиамы. Создал модели двойных звездных систем с аккрецией газа на черную дыру от звезды-компаньона (глава 8); предложил гипотезу, что гигантские «радио-уши» у радиогалактик подпитываются потоками энергии из галактических ядер, и совместно с Блэндфордом рассчитал детальные модели для этих потоков (глава 9); совместно с Блэндфордом и другими коллегами создал модели радиогалактик, квазаров и активных галактических ядер, содержащих сверхмассивную черную дыру (глава 9).

Сахаров, Андрей Дмитриевич (1921–1989) — советский физик-теоретик, «отец» водородной бомбы (глава 6), ближайший друг, соратник и соперник Зельдовича (главы 6 и 7), впоследствии стал диссидентом, реабилитирован в период гласности.

Сиамы, Деннис (р. 1926) — британский астрофизик, руководитель исследований по черным дырам в Британии (главы 7 и 13).

Торн, Кип С. (р. 1940) — американский физик-теоретик, ученик Уилера. Сформулировал условия образования черной дыры из звезды при ее взрыве (глава 7); сделал оценки для гравитационных волн, которые могут излучаться астрофизическими источниками, и развивал идеи и планы обнаружения этих волн (глава 10); совместно с другими учеными разрабатывал концепцию мембраны в приложении к черным дырам (глава 11); развивал идеи статистического происхождения энтропии черной дыры (глава 12); занимался апробацией законов физики путем мысленных экспериментов с червоточинами и машинами времени (глава 14).

Тьюкольски, Саул А. (р. 1947) — американский физик-теоретик, уроженец Южной Африки, ученик Торна. Предложил метод анализа возмущений вращающихся черных дыр и совместно с Прессом показал в рамках этого метода, что черные дыры устойчивы по отношению к малым возмущениям (главы 7 и 12); совместно с Шапиро показал, что законы физики не запрещают, в принципе, образование «голых» сингулярностей в нашей Вселенной (глава 13).

Уилер, Джон Арчибальд (р. 1911) — американский физик-теоретик, руководитель американских исследований по черным дырам и другим аспектам общей теории относительности (глава 7). Вместе с Гаррисоном и Вакано нашел уравнение состояния для холодной материи и составил каталог холодных «мертвых» звезд, послуживший аргументом в пользу образования черных дыр из массивных звезд (глава 5); совместно с Нильсом Бором разрабатывал теорию деления атомного ядра (глава 6); возглавлял группу по разработке первых американских водородных бомб (глава 6); в споре с

ДЕЙСТВУЮЩИЕ ЛИЦА

Оппенгеймером первоначально отрицал существование черных дыр, но затем сменил свою точку зрения и стал их защитником (глава 6); считается автором выражений «черная дыра» и «у черной дыры нет волос» (глава 7); доказывал, что «результат конечной стадии» звезды, взрывающейся под действием ее собственного гравитационного поля, является ключевым моментом для объединения общей теории относительности и квантовой механики; благодаря его работам были созданы предпосылки для открытия Хокингом испарения черных дыр (главы 6 и 13); заложил основы для создания законов квантовой гравитации и, самое главное, ввел понятие «квантовой пены», которая предположительно входит в состав сингулярности (глава 13); ввел константы «длина Планка–Уилера» и «площадь Планка–Уилера» (главы 12–14).

Уолд, Роберт М. (р. 1947) — американский физик-теоретик, ученик Уилера. Предложил дальнейшую разработку метода Тьюкольски, посвященного анализу возмущений черной дыры и вытекающим следствиям (глава 7); совместно с другими учеными рассматривал картину поведения электрических полей вне черной дыры — картину, которая легла в основу мембранной концепции (глава 11); внес вклад в теорию испарения черных дыр и рассмотрел ее значение для происхождения энтропии у черной дыры (глава 12); совместно с Герохом привел первые аргументы в пользу разрушения машины времени в самый момент ее возникновения (глава 14).

Хартл, Джеймс Б. (р. 1939) — ученик Уилера. Совместно с Бекенштейном показал, что по внешним проявлениям черной дыры невозможно определить, из каких частиц она состоит (глава 7); совместно с Хокингом открыл законы эволюции горизонта событий черной дыры (глава 12) и продолжает искать законы квантовой гравитации (глава 13).

Хокинг, Стивен У. (р. 1942) — британский физик-теоретик, ученик Сиамы. Привел основное доказательство того, что у черной дыры нет «волос» (глава 7); совместно с Бардином и Картером открыл четыре закона механики черных дыр (законы эволюции черных дыр) (глава 12); доказал, что без учета законов квантовой механики поверхностная площадь черной дыры возрастает, а испарение и сжатие черной дыры возможно только в рамках квантовой механики (глава 12); показал, что крошечные черные дыры могли образоваться при Большом взрыве; совместно с Пейджем рассчитал наблюдательные пределы для этих первичных черных дыр на основе того, что астрономы не видят гамма-излучения в процессе их испарения (глава 12); разработал глобальные (топологические) методы анализа черных дыр (глава 13); совместно с Пенроузом доказал, что Большой взрыв содержал сингулярность (глава 13); сформулировал гипотезу о «защите хронологии», которая должна действовать в присутствии флуктуаций вакуума, разрушающих любую машину времени в момент ее возникновения (глава 14); держал пари с Кипом Торном относительно того, является ли Лебедь X-1 черной дырой (глава 8) и может ли в нашей Вселенной образоваться «голая сингулярность» (глава 13).

Цвикки, Фриц (1898–1974) — американский физик-теоретик, уроженец Швейцарии, астрофизик и астроном-оптик. Совместно с Бааде занимался исследованиями Сверхновых звезд и высказал предположение, что в резуль-

тате взрыва Сверхновой нормальная звезда превращается в нейтронную звезду (глава 5).

Чандрасекар, Субраманьян (р. 1910) — американский астрофизик, индеец по происхождению, лауреат Нобелевской премии. Вывел предел массы белых карликов и отстаивал точность своего предсказания в споре с Эддингтоном (глава 4); участвовал в разработке теории малых возмущений черных дыр (глава 7).

Шварцшильд, Карл (1876–1916) — немецкий астрофизик. Предложил решение для уравнения поля Эйнштейна, описывающее геометрию пространства-времени вблизи обычной невращающейся звезды, как статичной, так и в процессе взрыва, а также вблизи невращающейся черной дыры (глава 3); нашел решение уравнения Эйнштейна для центральной части звезды с постоянной плотностью, на основании которого Эйнштейн отрицал существование черных дыр (глава 3).

Эддингтон, Артур Стэнли (1882–1944) — британский астрофизик, сторонник общей теории относительности Эйнштейна с самых первых дней ее появления (глава 3), противник концепции черных дыр и предела массы белых карликов Чандрасекара (главы 3 и 4).

Эйнштейн, Альберт (1879–1955) — родившийся в Германии швейцарско-американский физик-теоретик, лауреат Нобелевской премии. Сформулировал законы специальной (глава 1) и общей теории относительности (глава 2); показал, что свет одновременно является частицей и волной (глава 4); не признавал черные дыры (глава 3).

ХРОНОЛОГИЯ

Хронология событий, озарений, открытий

- 1687** Ньютон публикует свои «Принципы натуральной философии», где сформулированы понятия абсолютного пространства и времени, а также законы движения и законы гравитации. [Гл.1]
- 1783 и 1795** Митчелл и Лаплас формулируют понятие «черной дыры» на основе ньютоновских законов движения и гравитации. [Гл.3]
- 1864** Максвелл формулирует единые законы электромагнетизма. [Гл.1]
- 1887** Майкельсон и Морли экспериментально показывают, что скорость света не зависит от скорости движения Земли в пространстве. [Гл.1]
- 1905** Эйнштейн показывает, что пространство и время не абсолютны, а относительны, и формулирует законы теории относительности. [Гл.1] Эйнштейн показывает, что в определенных условиях электромагнитные волны ведут себя как частицы, т. е. фактически вводит понятие корпускулярно-волнового дуализма, лежащее в основе квантовой механики. [Гл.4]
- 1907** Эйнштейн делает свои первые шаги к общей теории относительности: формулирует понятие локально инерциальной системы отсчета и принцип эквивалентности, приходит к идее замедления времени в гравитационном поле. [Гл.2]
- 1907** Герман Минковский объединяет пространство и время в абсолютное четырехмерное пространство-время. [Гл.2]
- 1912** Эйнштейн осознает, что пространство-время искривлено и что приливная гравитация — следствие этой кривизны. [Гл.2]
- 1915** Эйнштейн и Гильберт независимо формулируют уравнение поля (описывающее искривление пространства-времени под действием массы) и завершают таким образом создание законов общей теории относительности. [Гл.2]

- 1916** Карл Шварцшильд получает решение уравнения поля Эйнштейна, которое впоследствии используется для описания невращающейся и незаряженной черной дыры. [Гл.3]
Фламм открывает, что при определенном выборе топологии решение Шварцшильда для уравнения Эйнштейна может описывать пространственную нору («кротовую нору»). [Гл.14]
- 1916 и 1918** Райсснер и Нордстрем предлагают свое решение уравнения поля Эйнштейна, которое впоследствии будет использовано для описания невращающейся заряженной черной дыры. [Гл.7]
- 1926** Эддингтон формулирует «загадку» белых карликов и отвергает возможность существования черных дыр. [Гл.4]
Шредингер и Гейзенберг окончательно формулируют законы квантовой механики. [Гл.4]
На основе законов квантовой механики Фаулер показывает, как вырождение электронов помогает разрешить «загадку» белых карликов. [Гл.4]
- 1930** Чандрасекар находит предел массы для белых карликов. [Гл.4]
- 1932** Чэдвик открывает нейтрон. [Гл.5]
Янски открывает космические радиоволны. [Гл.9]
- 1933** Ландау создает в СССР научно-исследовательскую группу теоретической физики. [Гл.5, 13]
Бааде и Цвикки начинают заниматься исследованием Сверхновых, вводят понятие нейтронной звезды и предлагают гипотезу об образовании нейтронной звезды из звездного ядра в результате взрыва Сверхновой. [Гл.5]
- 1935** Чандрасекар завершает работу по определению предельной массы белого карлика и подвергается критике Эддингтона. [Гл.4]
- 1935–1939** Годы террора в СССР. [Гл.5, 6]
- 1937** Гринштейн и Уиппл утверждают, что открытое Янски космическое радиоизлучение не может объясняться известными астрофизическими процессами. [Гл.9]
Ландау, в отчаянной попытке избежать ареста, выдвигает гипотезу, что звезды поддерживают свою светимость за счет падения вещества на нейтронные ядра в их центрах. [Гл.5]
- 1938** Ландау арестовывают в Москве по подозрению в шпионаже в пользу Германии. [Гл.5]
Оппенгеймер и Сербер опровергают гипотезу Ландау о нейтронных ядрах в центрах звезд; Оппенгеймер и Волков показывают, что существует максимальный предел массы для нейтронных звезд. [Гл.5]

Бете и Критчфилд утверждают, что Солнце и другие звезды светят за счет ядерного горючего. [Гл.5]

1939 Ландау освобождают из тюрьмы. [Гл.5]

Эйнштейн утверждает, что черные дыры не могут существовать в реальной Вселенной. [Гл.4]

Оппенгеймер и Снайдер проводят расчеты, из которых следует, что при взрыве массивной звезды образуется черная дыра; результаты привели к парадоксальному выводу: внешний наблюдатель видит звезду застывшей у горизонта событий, несмотря на то, что ее поверхность продолжает сжиматься. [Гл.6]

Ребер открывает космическое радиоизлучение далеких галактик, но не может определить его природу. [Гл.9]

Бор и Уилер разрабатывают теорию деления ядра. [Гл.6]

Харитон и Зельдович разрабатывают теорию цепных реакций. [Гл.6]

Немецкая армия вторгается в Польшу и развязывает вторую мировую войну.

1942 В США начинается создание атомной бомбы под руководством Оппенгеймера. [Гл.6]

1943 В СССР начинаются работы по созданию атомного реактора и атомной бомбы согласно теоретическим разработкам Зельдовича. [Гл.6]

1945 США сбрасывают атомные бомбы на Хиросиму и Нагасаки. Заканчивается вторая мировая война. В США начинаются работы по созданию супербомбы. [Гл.6]

В СССР продолжают интенсивные работы по созданию атомной бомбы под теоретическим руководством Зельдовича. [Гл.6]

1946 Фридман со своей группой на немецкой ракете Фау-2 запускает за пределы земной атмосферы первый астрономический инструмент. [Гл.8]
Английские и австралийские физики-экспериментаторы начинают строительство радиотелескопов и радиоинтерферометров. [Гл.9]

1948 Под руководством Зельдовича, Сахарова, Гинзбурга и др. в СССР начинаются работы по созданию водородной бомбы; Гинзбург изобретает топливо из дейтрида лития, Сахаров предлагает устройство бомбы в виде слоики. [Гл.6]

1949 В СССР проводятся испытания атомной бомбы, из-за чего в США начинаются усиленные дебаты по поводу создания водородной бомбы. В СССР начинаются работы по созданию такой же бомбы. [Гл.6]

1950 В США вводится в действие программа по разработке водородной бомбы. [Гл.6]

Кипенхоер и Гинзбург приходят к выводу, что космическое радиоизлучение объясняется тем, что электроны космических лучей движутся

по спирали вокруг силовых линий межзвездных магнитных полей. [Гл.9]

Александров и Пименов пытаются применить топологические методы к исследованию кривизны пространства-времени. [Гл.13]

- 1951** Теллер и Улам в США предлагают идею создания «реальной» супербомбы произвольной мощности; Уилер организует группу по разработке такой бомбы и создает ее компьютерную модель. [Гл.6]

Грэхем Смит определяет с точностью до 1 угловой минуты положение на небе космического радиоисточника Лебедь А; Бааде с помощью наблюдений на оптическом телескопе делает открытие, что этот источник является удаленной радиогалактикой. [Гл.9]

- 1952** В США проводятся испытания нетранспортируемого термоядерного устройства, основанного на изобретении Теллера—Улама и на работе группы Уилера. [Гл.6]

- 1953** Уилер начинает заниматься ОТО. [Гл.6]

Дженнисон и Дас Гупта делают открытие, что источник радиоизлучения от галактик — гигантские радиолепестки. [Гл.9]

Кончина Сталина. [Гл.6]

В СССР проводятся испытания водородной бомбы, созданной на основе идей Гинзбурга и Сахарова. Ученые США делают заявление, что эта бомба не может считаться реальной: ее устройство таково, что невозможно создать бомбу произвольной мощности. [Гл.6]

- 1954** Сахаров и Зельдович повторяют идею Теллера—Улама, разрешающую создание «реальной» супербомбы. [Гл.6]

В США проводятся испытания первой реальной водородной бомбы, основанной на идее Теллера—Улама и Сахарова—Зельдовича. [Гл.6]

Теллер дает свидетельские показания против Оппенгеймера, и Оппенгеймер объявляется политически неблагонадежным. [Гл.6]

- 1955** В СССР проводятся испытания водородной бомбы, основанной на идее Теллера—Улама и Сахарова—Зельдовича. [Гл.6]

Уилер формулирует понятие гравитационных флуктуаций вакуума, определяет длину Планка—Уилера как характерную шкалу, на которой они становятся очень большими, и высказывает гипотезу, что на этой шкале понятие пространства-времени следует заменить понятием квантовая пена. [Гл.12–14]

- 1957** Уилер, Гаррисон и Вакано формулируют понятие «холодной» материи и составляют каталог всех возможных «холодных, умерших» звезд. Их каталог подтверждает вывод о том, что массивные звезды могут завершать свою эволюцию в результате взрыва. [Гл.5]

Группа Уилера занимается исследованием кротовых нор; Редже и Уилер предлагают метод анализа малых возмущений кротовых нор; позднее

их метод будет использован для изучения возмущений черных дыр. [Гл.7, 14]

Уилер отдает себя целиком исследованиям конечной стадии эволюции звезд после взрыва и отвергает идею Оппенгеймера, что конечная стадия связана с образованием черной дыры. [Гл.6, 13]

1958 Финкельштейн предлагает новую систему отсчета для метрики Шварцшильда и таким образом разрешает парадокс Оппенгеймера—Снайдера (1939) о кажущемся для внешнего наблюдателя «застывании» взрывающейся звезды. [Гл.6]

1958–1960 Уилер становится сторонником идеи черных дыр. [Гл.6]

1959 Уилер утверждает, что сингулярности, образовавшиеся во время Большого хруста или внутри черной дыры, должны подчиняться законам квантовой гравитации и могут состоять из «квантовой пены». [Гл.13] Барбидж показывает, что гигантские «радиоуши» галактик содержат магнитную и кинетическую энергию, эквивалентную 10 миллионам Солнц. [Гл.9]

1960 Вебер начинает строительство детекторов гравитационных волн. [Гл.10] Крускал показывает, что в отсутствие вещества червоточина сферической формы очень быстро исчезает. [Гл.14] Грейвс и Брилл показывают, что решение Рейсснера—Нордстрема для уравнения Эйнштейна описывает как сферическую, электрически заряженную черную дыру, так и кротовую нору. [Гл.7] Они также высказывают предположение о возможности путешествия из черной дыры в нашей Вселенной через гиперпространство в другую вселенную. [Гл.13]

1961 Халатников и Лифшиц утверждают, что уравнение поля Эйнштейна не разрешает существование сингулярностей со случайной кривизной, и поэтому сингулярности не могут возникать внутри реальных черных дыр или при Большом хрусте Вселенной. [Гл.13]

1961–1962 Зельдович начинает заниматься астрофизикой и общей теорией относительности, привлекает к этим исследованиям Новикова и формирует научно-исследовательскую группу. [Гл.6]

1962 Торн начинает заниматься научно-исследовательской деятельностью под руководством Уиллера и делает первые шаги к формулировке своей гипотезы оброча. [Гл.7] Джаакони со своей группой открывают космическое рентгеновское излучение с помощью гейгеровского счетчика, запущенного на ракете Аэробы за пределы земной атмосферы. [Гл.8]

1963 Керр предлагает свое решение уравнения поля Эйнштейна. [Гл.7] Шмидт, Гринштейн и Сандаж открывают квазары. [Гл.9]

- 1964** Начинается Золотой век теоретического исследования черных дыр. [Гл.7]
 Пенроуз вводит топологический метод в исследования гравитации и использует его для доказательства того, что сингулярности должны присутствовать во всех черных дырах. [Гл.13]
 Гинзбург, а впоследствии Дорошкевич, Новиков и Зельдович приводят первые аргументы в пользу того, что черная дыра не имеет «волос». [Гл.7]
 Колгейт, Мэй и Уайт в США, а также Подурец, Имшенник и Надежин в СССР создают компьютерные модели взрыва звездного ядра; они подтверждают вывод Цвикки (1934) о том, что взрыв звезды малой массы приводит к Сверхновой и образованию нейтронной звезды, а также вывод Оппенгеймера–Снайдера (1939) о том, что взрыв звезды большой массы приводит к образованию черной дыры. [Гл.6]
 Зельдович, Гусейнов и СалпETER высказывают первые предложения о том, как проводить поиски черных дыр в реальной Вселенной. [Гл.8]
 СалпETER и Зельдович предлагают гипотезу о сверхмассивных черных дырах как источниках светимости квазаров и радиогалактик. [Гл.9]
 Герберт Фридман с помощью счетчика Гейгера, установленного на ракете, открывает со своей группой рентгеновский источник Лебедь X-1. [Гл.8]
- 1965** Бойер и Линдквист, а также Картер и независимо от него Пенроуз показывают, что решение Керра для уравниения поля Эйнштейна описывает вращающуюся черную дыру. [Гл.7]
- 1966** Зельдович и Новиков предлагают проводить поиски черных дыр в двойных звездных системах, в которых одна звезда излучает в рентгеновском, а другая — в оптическом диапазоне; этот метод начнет использоваться в 1970-х годах. [Гл.8]
 Герох показывает, что неквантовые изменения топологии пространства (например, червоточины) могут возникать только, если в процессе возникает хотя бы на кратчайший промежуток времени машина времени. [Гл.14]
- 1967** Уилер придумывает название «черная дыра». [Гл.7]
 Израэль проводит строгое доказательство первой части теоремы о том, что «у черной дыры нет волос»: Невращающаяся черная дыра должна иметь совершенно сферическую форму. [Гл.7]
- 1968** Пенроуз утверждает, что путешествие из нашей Вселенной в другую вселенную с использованием черной дыры как перехода в гиперпространство невозможно; его аргументация будет подтверждена другими учеными в 1970-х годах. [Гл.13]
 Картер раскрывает природу пространственной воронки вокруг вращающейся черной дыры и ее влияния на падающие частицы. [Гл.7]
 Мизнер и, независимо от него, Белинский, Халатников и Лифшиц обнаружили новое решение уравнения Эйнштейна, описывающее ко-

лебательный режим приближения к особой точке (сингулярности). [Гл.13]

- 1969** Хокинг и Пенроуз приводят доказательство того, что в самом начале Большого взрыва наша Вселенная должна была находиться в состоянии сингулярности. [Гл.13]

Белинский, Халатников и Лифшиц продолжают исследовать колебательный режим приближения к особой точке как новое решение уравнения Эйнштейна; они отмечают случайные колебания пространственно-временной кривизны найденной ими сингулярности и утверждают, что именно такой тип сингулярности характерен для черных дыр и Большого хруста. [Гл.13]

Пенроуз открывает, что вращающаяся черная дыра запасает огромные количества энергии в вихревом движении пространства, происходящем вокруг нее, и что эта энергия вращения может переходить в другие формы. [Гл.7]

Пенроуз выдвигает гипотезу о «космической цензуре», согласно которой законы физики препятствуют образованию голых сингулярностей. [Гл.13]

Линден-Белл высказывает гипотезу о том, что в ядрах галактик находятся гигантские черные дыры, окруженные аккреционными дисками. [Гл.9]

Кристодулу замечает подобие законов эволюции черной дыры, на которую происходит медленная аккреция вещества, законам термодинамики. [Гл.12]

Вебер объявляет предварительные свидетельства существования гравитационных волн; это вдохновляет многих других экспериментаторов на строительство гравитационных детекторов. К 1975 г. станет ясно, что Вебер на самом деле не видел гравитационные волны. [Гл.10]

Брагинский говорит о существовании квантового предела чувствительности гравитационно-волновых детекторов. [Гл.10]

- 1970** Бардин показывает, что из-за аккреции газа типичные черные дыры в нашей Вселенной должны вращаться очень быстро. [Гл.9]

Прайс, основываясь на работах Пенроуза, Новикова, Чейза де ла Круз и Израэля, приходит к выводу, что черные дыры теряют свои «волосы» путем излучения, и утверждает, что излучение черных дыр продолжается до конца: пока все, что может излучаться, не излучится. [Гл.7]

Хокинг формулирует понятие абсолютного горизонта событий черной дыры и приводит доказательство того, что площадь поверхности абсолютного горизонта событий может только увеличиваться. [Гл.12]

Группа Джаакони создает «Ухуру», первый детектор рентгеновского излучения на спутнике, и осуществляет его запуск на орбиту. [Гл.8]

- 1971** Получены совместные наблюдения двойной звездной системы Лебедь X-1 в рентгеновском, радио и оптическом диапазоне, которые свиде-

тельствуют в пользу того, что система состоит из черной дыры и нормальной звезды. [Гл.8]

Вайс в Массачусеттском технологическом институте и Форвард в лаборатории Говарда Хьюза создают интерферометрические детекторы гравитационных волн. [Гл.10]

Рис выдвигает предположение, что гигантские радиолепестки радиогалактик возникают благодаря струям, вырывающимся из ядер галактик. [Гл.9]

Ханни и Руффини формулируют понятие поверхностного заряда на горизонте событий, которое послужит основой создания мембранного подхода. [Гл.11]

Пресс открывает возможность пульсаций черных дыр. [Гл.7]

Зельдович выдвигает гипотезу об излучении вращающихся черных дыр; Зельдович и Старобинский доказывают эту гипотезу на основании законов квантовых полей в искривленном пространстве-времени. [Гл.12]

Хокинг указывает на возможность создания крошечных «изначальных» черных дыр во время Большого взрыва. [Гл.12]

- 1972** Основываясь на работе Хокинга и Израэля, Картер доказывает (не считая некоторых технических деталей, внесенных позже Робинсоном), что гипотеза об отсутствии волос приложима также к вращающимся незаряженным черным дырам. Он показывает, что такая черная дыра всегда описывается решением уравнения Эйнштейна, полученным Керром. [Гл.7]

Торн предлагает гипотезу об обруче в качестве критерия момента образования черной дыры. [Гл.7]

Бекенштейн выдвигает предположение, что площадь поверхности черной дыры по существу определяет ее энтропию и что энтропия черной дыры равна логарифму числа всевозможных способов ее образования. Хокинг решительно выступает против этого предположения. [Гл.12]

Бардин, Картер и Хокинг формулируют законы эволюции черных дыр в форме, идентичной законам термодинамики, но при этом утверждают, что площадь поверхности горизонта событий не является «замаскированной» энтропией черной дыры. [Гл.12]

Тьюкольски разрабатывает метод возмущений для анализа пульсаций вращающихся черных дыр. [Гл.7]

- 1973** Пресс и Тьюкольски доказывают, что пульсации вращающейся черной дыры устойчивы; они не подпитываются за счет вращательной энергии черной дыры. [Гл.7]

- 1974** Хокинг показывает, что *все* черные дыры без исключения, как вращающиеся, так и невращающиеся, излучают в точности так, как если бы они имели температуру, пропорциональную силе их поверхностной гравитации; следовательно, они испаряются. Он признает, что был неправ, когда утверждал, что законы механики черных дыр никоим образом не соответствуют законам термодинамики, и снимает свою

критику Бекенштейна по этому вопросу (последний утверждал, что площадь поверхности черной дыры фактически соответствует ее энтропии). [Гл.12]

1974–1978 Блэндфорд, Рис и Линден-Белл предлагают несколько моделей возникновения джетов у сверхмассивных черных дыр в ядрах галактик и квазаров. [Гл.9]

1975 Бардин и Петтерсон показывают, что воронка пространства вокруг вращающейся черной дыры является своего рода гироскопом, поддерживающим направление струй. [Гл.9]

Чандрасекар начинает создавать точную математическую теорию возмущений черных дыр (у него уйдет на это 5 лет). [Гл.7]

Унру и Дэвис приходят к выводу, что для внешнего наблюдателя, движущегося с ускорением вблизи горизонта событий черной дыры, черная дыра выглядит окруженной горячей атмосферой из частиц; эти частицы постепенно излучаются, за счет чего черная дыра испаряется. [Гл.12]

Пейдж рассчитывает спектр частиц, излучаемых черными дырами. На основании результатов наблюдений космического гамма-излучения Хокинг и Пейдж приходят к заключению, что в одном кубическом световом годе пространства содержится не более 300 крошечных, первичных, испаряющихся черных дыр. [Гл.12]

По мнению нового поколения исследователей, Золотой век теоретического изучения черных дыр подходит к концу. [Гл.7]

1977 Гиббонс и Хокинг подтверждают предположение Бекенштейна о том, что энтропия черной дыры равна логарифму количества всевозможных способов ее возникновения. [Гл.12]

Интерферометрическим методом радиоастрономы открывают струи, исходящие из черных дыр в центрах галактик и подпитывающие гигантские радиолепестки этих галактик. [Гл.9]

Блэндфорд и Знаек показывают, что магнитные поля, пронизывающие горизонт событий вращающейся черной дыры, могут извлекать вращательную энергию черной дыры и снабжать ею квазары и радиогалактики. [Гл.9]

Знаек и Дамур формулируют понятие мембраны для описания горизонта событий черной дыры. [Гл.11]

Брагинский с коллегами, а также Кейвс, Торн и др. разрабатывают оптимальные детекторы гравитационных волн, позволяющие обходить квантовый предел измерений. [Гл.10]

1978 Группа Джаакони заканчивает строительство первого рентгеновского телескопа с высоким разрешением («Эйнштейн») и запускает его на орбиту. [Гл.8]

1979 Таунс и др. получают данные, указывающие на существование в центре нашей Галактики черной дыры с массой 3 миллиона солнечных масс. [Гл.9]

Драйвер в Калифорнийском технологическом институте начинает работу над проектом интерферометра для измерения гравитационных волн. [Гл.10]

1982 Бантинг и Мазур доказывают справедливость гипотезы об «отсутствии волос» у вращающейся электрически заряженной черной дыры. [Гл.7]

1983–1988 Финни и др. разрабатывают разнообразные модели квазаров и радиогалактик, имеющие в своей основе черную дыру. [Гл.9]

1984 Национальный научный фонд (США) объединяет усилия Калифорнийского технологического института и Массачусетского института технологии по созданию гравитационно-волновых детекторов в рамках проекта LIGO. [Гл.10]

Редмаунт (основываясь на более ранней работе Эрдли) показывает, что излучение, попадающее в пустую сферическую червоточину, ускоряется до высоких энергий, в результате чего червоточина быстро схлопывается. [Гл.14]

1985–1993 Торн, Моррис, Юртсевер, Фридман, Новиков и др. исследуют законы физики с точки зрения непротиворечивости идеи путешествия вдоль червоточины и существования машины времени. [Гл.14]

1987 Войт становится руководителем проекта LIGO, и проект начинает интенсивно разрабатываться. [Гл.10]

1990 Ким и Торн показывают, что независимо от способа образования машины времени в самый момент ее возникновения в ней начинает циркулировать интенсивный пучок вакуумных флуктуаций. [Гл.14]

1991 Хокинг предлагает гипотезу о «защите хронологии» (согласно которой законы физики запрещают существование машины времени) и утверждает, что циркулирующий пучок вакуумных флуктуаций разрушает любую машину времени в момент ее возникновения. [Гл.14]

Израэль, Пуассон и Ори на основании работы Дорошкевича и Новикова показывают, что сингулярность внутри черной дыры изменяется со временем («стареет»); Ори показывает, что объекты, попадающие в «старую и спокойную» черную дыру, не подвергаются сильному воздействию приливной гравитации сингулярности, пока не достигнут квантово-гравитационного ядра. [Гл.13]

Шапиро и Тьюкольски, в результате моделирования на суперкомпьютере, приходят к выводу, что гипотеза о «космической цензуре» может не выполняться: «голые» сингулярности могут формироваться при взрыве сильно несферических звезд. [Гл.13]

1993 Халсе и Тейлор получают Нобелевскую премию за доказательство существования гравитационных волн путем наблюдений двойного пульсара. [Гл.10]

ГЛОССАРИЙ

Определения экзотических терминов

абсолютный

Независимый от системы координат, один и тот же в любой системе координат.

абсолютный горизонт событий

Поверхность черной дыры. См. *горизонт событий*.

абсолютное время

Ньютоновская концепция универсального времени, в которой соблюдается договоренность об одновременности событий и о временных интервалах между двумя любыми событиями.

абсолютное пространство

Ньютоновская концепция трехмерного пространства, в котором мы живем. В этом пространстве имеет смысл понятие абсолютного покоя, а длина объекта не зависит от движения системы отсчета, в которой она измеряется.

абсолютности скорости света принцип

Принцип Эйнштейна, утверждающий, что скорость света является универсальной константой, одинаковой во всех направлениях и во всех инерциальных системах отсчета, независящей от движения этих систем.

адиабатический показатель

То же самое, что и *сопротивление сжатию*.

аккреционный диск

Диск из газа, который окружает черную дыру или нейтронную звезду. Трение в диске заставляет газ продвигаться внутрь по спирали и *аккрецировать* на черную дыру или звезду.

антивещество

Форма вещества, которое является «анафемой» для обычного вещества. Каждому типу частиц обычного вещества (например, электрону, протону или нейтрону) соответствует почти идентичная античастица антивещества (позитрон, антипротон или антинейтрон). При встрече частицы вещества с соответствующей античастицей антивещества происходит их аннигиляция.

астроном

Ученый, наблюдающий космические объекты с помощью телескопа.

астрофизик

Физик (как правило, физик-теоретик), который с помощью законов физики пытается понять поведение космических объектов.

астрофизика

Область физики, которая имеет дело с космическими объектами и законами физики, управляющими этими объектами.

атом

Основной строительный «кирпичик» вещества. Каждый атом состоит из ядра с положительным электрическим зарядом и облака, состоящего из электронов с отрицательным зарядом. Электронное облако связано с ядром электрическими силами.

атомная бомба

Бомба, которая черпает энергию взрыва из цепной реакции распада ядер урана-235 или плутония-239.

безволосости гипотеза

Гипотеза, выдвинутая в 1960-х–1970-х годах и подтвержденная в 1970-х–1980-х годах, о том, что все свойства черной дыры полностью определяются ее массой, электрическим зарядом и вращением.

белый карлик

Звезда, окружность которой примерно равна земной, а масса равна массе Солнца; в которой истощились все запасы ядерного топлива и которая постепенно охлаждается. Она удерживается от сжатия силами своей собственной гравитации за счет давления вырожденного электронного газа.

Блэндфорда–Знаека процесс

Извлечение энергии вращения из вращающейся черной дыры посредством магнитных полей.

болванки (твердотельные антенны)

Гравитационно-волновой детектор, в котором под действием гравитационных волн сжимается и растягивается большая металлическая болванка, и за ее колебаниями следит специальный датчик.

Большой взрыв

Взрыв, который дал начало Вселенной.

Большой хруст

Конечная стадия эволюции Вселенной, когда Вселенная сожмется в одну точку (если предположить, что Вселенную ожидает такой конец).

БХЛ-сингулярность

Сингулярность, вблизи которой приливные силы гравитации хаотически колеблются во времени и в пространстве. Возможно, этот тип сингулярности формируется в центрах черных дыр и в Большом хрусте нашей Вселенной.

вакуум

Область пространства-времени, из которой удалены все частицы, поля и энергия; нельзя удалить только вакуумные флуктуации.

вакуумные флуктуации

Случайные, непредсказуемые, неудаляемые колебания поля (например, электромагнитного или гравитационного), которые вызваны мгновенным обменом энергией между малыми областями пространства, когда соседние области захватывают энергию друг у друга и затем отдают обратно. См. также *вакуум* и *виртуальные частицы*.

видимый горизонт событий

Самая удаленная от черной дыры область, где испускаемые фотоны еще втягиваются назад силами гравитации. Видимый горизонт событий совпадает с (*абсолютным*) *горизонтом событий*, если черная дыра находится в спокойном состоянии.

виртуальные частицы

Частицы, которые возникают парами с использованием энергии, заимствованной у ближайшей области пространства. В соответствии с законами квантовой механики, эта энергия должна быть быстро возвращена назад, поэтому виртуальные частицы быстро аннигилируют и их невозможно зарегистрировать. Виртуальные частицы, наблюдаемые свободно падающим наблюдателем, представляют собой корпускулярный аспект вакуумных флуктуаций. Виртуальные фотоны и виртуальные гравитоны представляют собой корпускулярный аспект электромагнитных вакуумных флуктуаций и гравитационных вакуумных флуктуаций соответственно. См. также *корпускулярно-волновой дуализм*.

вложенная диаграмма

Диаграмма, с помощью которой можно представить себе кривизну двумерной поверхности, поместив ее в плоское трехмерное пространство.

водородная бомба

Бомба, черпающая энергию взрыва из реакции термоядерного синтеза ядер водорода, дейтерия и трития с образованием ядер гелия. См. также *супербомба*.

возмущение

Небольшое искажение нормальной формы объекта или кривизны пространства-времени вокруг объекта.

возмущений методы

Методы математического анализа небольших возмущений объекта, например, черной дыры.

волна

Колебание какого-либо поля (например, электромагнитного поля или кривизны пространства-времени), распространяющегося в пространстве-времени.

волны форма

Кривая, описывающая детальную картину колебаний волны.

волны длина

Расстояние между двумя соседними гребнями волны.

«волосы»

Любое свойство черной дыры, от которого она может избавиться путем излучения и, следовательно, не может удержать это свойство; например, магнитное поле или гора на ее горизонте событий.

вращательная энергия

Энергия, связанная с вращением черной дыры, звезды или какого-либо другого объекта.

вращение

См. *угловой момент*.

Вселенная

Наша вселенная.

вселенная

Область пространства, не связанная с другими областями; подобно острову в океане, отделенному от других участков суши.

второй закон термодинамики

Закон, в соответствии с которым энтропия может только увеличиваться.

галактика

Совокупность большого числа звезд (от 1 миллиарда до 1 триллиона), вращающихся вокруг единого центра. Диаметр галактик в среднем составляет 100 тысяч световых лет.

гамма-излучение

Электромагнитное излучение на очень коротких длинах волн; см. рис.П.2 в Прологе.

Гейгера счетчик

Простой прибор для детектирования рентгеновского излучения; называется также «пропорциональным счетчиком».

геодезическая

Прямая линия в искривленном пространстве или пространстве-времени. На поверхности Земли геодезическими линиями являются большие круги.

гигантская черная дыра

Черная дыра с массой миллион масс Солнца или больше. Считается, что такие черные дыры находятся в ядрах галактик и квазаров.

гиперпространство

Вымышленное плоское пространство, в которое наше воображение помещает части искривленного пространства нашей Вселенной.

гироскоп

Быстровращающийся объект, ось вращения которого остается фиксированной в течение очень долгого времени.

ГЛОССАРИЙ

глобальные методы

Математические методы, основанные на комбинации топологии и геометрии, используемые для анализа структуры пространства-времени.

голая сингулярность

Сингулярность, которая не находится внутри черной дыры (не окружена горизонтом черной дыры), и поэтому ее можно видеть и изучать. См. *гипотезу космической цензуры*.

горизонт

Поверхность черной дыры, точка невозврата, пройдя которую ничего не может покинуть черную дыру. Также называется *абсолютным горизонтом событий*, чтобы отличить его от *видимого горизонта событий*.

гравитационная волна

Рябь кривизны пространства-времени, распространяющаяся со скоростью света.

гравитационная линза

Свойство гравитирующего тела (например, черной дыры или галактики) фокусировать свет от удаленного источника путем отклонения световых лучей. См. *отклонение света*.

гравитационное замедление времени

Замедление хода времени возле гравитирующего тела.

гравитационное обрезание

Фраза, которую использовал Оппенгеймер для описания процесса образования черной дыры вокруг коллапсирующей звезды.

гравитационное покраснение света

Удлинение световой волны (ее «покраснение») в результате ее прохождения через гравитационное поле.

гравитон

Частица, которая в рамках модели гравитационно-волнового дуализма связана с гравитационными волнами.

границы ошибок

Область на небе, в которой, согласно наблюдениям, может находиться та или иная звезда или объект. Она называется областью ошибок, потому что с увеличением неопределенности (ошибки) наблюдений эта область увеличивается.

давление

Сила, возникающая в веществе при его сжатии и направленная наружу.

давление вырождения

Давление внутри очень плотного вещества, создаваемое хаотическими и чрезвычайно быстрыми движениями электронов и нейтронов. При охлаждении вещества до абсолютного нуля это давление остается достаточно большим.

датчик

Устройство для слежения за колебаниями стержня или движениями массы.

двойная система

Два объекта, вращающиеся по орбитам друг вокруг друга; это могут быть две звезды или две черные дыры, или же звезда и черная дыра.

двойная система из черных дыр

Двойная система, состоящая из двух черных дыр.

дейтерия ядра, или дейтроны

Атомные ядра, состоящие из одного протона и одного нейтрона, удерживаемые ядерными силами. Дейтерий называют также «тяжелым водородом», так как химические свойства атомов дейтерия и водорода очень похожи.

деление ядерное

Разрыв большого атомного ядра с образованием нескольких маленьких ядер. Деление ядер урана или плутония является источником энергии взрыва атомной бомбы; ядерное деление является также источником энергии атомных реакторов.

дифференциальное уравнение

Уравнение, в которое включены функции и их производные. «Решить дифференциальное уравнение» означает найти значения функций из дифференциального уравнения.

доплеровское смещение

Смещение длины волны в сторону более высоких частот (более коротких длин волн и высоких энергий), если источник излучения движется к наблюдателю, и в сторону более низких частот (более длинных волн и низких энергий), если источник движется от наблюдателя.

закон обратной пропорциональности гравитации квадрату расстояния

Закон всемирного тяготения (закон гравитации Ньютона), который утверждает, что между любыми двумя объектами во Вселенной действует гравитационная сила, притягивающая эти объекты друг к другу; эта сила пропорциональна произведению масс объектов и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними.

законы физики

Фундаментальные принципы, из которых можно вывести с помощью логических и математических построений поведение нашей Вселенной.

замедление времени

Замедление течения времени.

замерзшая звезда

Термин, используемый для черной дыры в СССР в 1960-х годах.

защиты хронологии гипотеза

Гипотеза Хокинга о том, что законы физики не допускают существование машин времени.

излучение

Любая форма распространяющихся с высокой скоростью волн или частиц.

инерциальная система отсчета

Невращающаяся система отсчета, на которую не действуют никакие внешние силы. Такая система отсчета находится в движении только под действием своей собственной инерции. См. также *локальная инерциальная система отсчета*.

инерция

Сопротивление тела ускорению любых действующих на него сил.

интерференция

Способ усиления двух волн, накладывающихся друг на друга и линейно складывающихся, если их гребни и впадины совпадают (конструктивная интерференция), и уничтожают друг друга, если гребни совпадают с впадинами (деструктивная интерференция).

интерферометр

Устройство, основанное на интерференции волн. См. также *радиоинтерферометр* и *интерферометрический детектор*.

интерферометрический детектор

Детектор гравитационных волн, в котором их приливные силы покачивают массы, свисающие с проволочек, а для слежения за движениями масс используется интерференция лазерных пучков. Также называется *интерферометром*.

интерферометрия

Измерение с помощью интерферометров.

инфракрасное излучение

Электромагнитные волны с длиной волны, немного превышающей свет. См. рис. П.2.

ион

Атом, который потерял несколько орбитальных электронов и поэтому имеет суммарный положительный заряд.

ионизированный газ

Газ, в котором большая часть атомов потеряла свои орбитальные электроны.

искривление времени или пространства-времени

Свойство времени или пространства-времени, вследствие которого нарушаются положения геометрии Евклида или Минковского; т. е. параллельные линии начинают пересекаться.

квазар

Компактный объект очень высокой светимости в удаленной Вселенной; по-видимому, черпает энергию от гигантской черной дыры.

квантовая гравитация

Законы физики, получаемые путем объединения принципов общей теории относительности с квантовой механикой.

квантовая механика

Законы физики, управляющие микромиром (атомами, молекулами, электронами, протонами), которые лежат также в основе макромира, но редко в нем проявляются. Среди явлений, с которыми имеет дело квантовая механика, можно назвать *принцип неопределенностей*, *корпускулярно-волновой дуализм* и *флуктуации вакуума*.

квантовая механика новая

Окончательная версия законов квантовой механики, сформулированная в 1926 г.

квантовая механика старая

Ранняя версия законов квантовой механики, разработанная в первые два десятилетия XX века.

квантовая пена

Вероятностная пенообразная структура пространства, которая, вероятно, является сердцевинной сингулярностей и, возможно, существует в обычном пространстве на масштабах длины Планка—Уилера или меньших.

квантовая теория

То же самое, что и *квантовая механика*.

квантово-неразрушающие измерения

Метод измерений, который позволяет обойти стандартный квантовый предел.

квантового поля в искривленном пространстве-времени законы

Частичное объединение принципов общей теории относительности (искривленное пространство-время) с законами квантовых полей, при котором гравитационные волны и негравитационные поля считаются квантово-механическими объектами, в то время как искривленное пространство-время, в котором они распространяются, считается классическим.

квантовое поле

Поле, которое управляется законами квантовой механики. Все поля, измеряемые с достаточной точностью, оказываются квантовыми полями; но если их измерять с умеренной точностью, они могут вести себя классическим образом (т.е. они не проявляют корпускулярно-волнового дуализма или вакуумных флуктуаций).

классический

Подверженный влиянию обычных законов физики, которые управляют макроскопическими объектами; не квантово-механический.

коллапсар

Название черных дыр на Западе в 1960-х годах.

корпускула

Название частицы света в XVII и XVIII веках.

корпускулярно-волновой дуализм

Положение, согласно которому все волны иногда ведут себя как частицы, а все частицы — как волны.

космической цензуры гипотеза

Гипотеза о том, что законы физики препятствуют образованию голых сингулярностей при схлопывании объекта.

космическая струна

Гипотетический одномерный струноподобный объект, возникший вследствие искривления пространства. У струны нет концов (либо она замкнута на себя подобно резиновой ленте, либо она просто бесконечна); вследствие такого искривления пространства любая опоясывающая струну окружность будет иметь отношение длины окружности к диаметру немного меньше, чем π .

космические лучи

Частицы вещества или антивещества, бомбардирующие Землю из космоса. Некоторые из них рождаются на Солнце, а некоторые — в отдаленных районах Млечного Пути, возможно, в горячих облаках газа, извергнутых в межзвездное пространство сверхновыми.

красное смещение

Смещение длины электромагнитных волн в сторону диапазона с большей длиной волны, т. е. «покраснение» волн.

кривизна пространства-времени

Свойство пространства-времени, которое заставляет свободно падающие частицы, движущиеся вначале вдоль параллельных мировых линий, сходиться или расходиться. Пространственно-временная кривизна и *притягивающие гравитационные силы* — разные названия одного и того же явления.

критическая окружность

Окружность горизонта событий черной дыры; окружность, до которой должен сжаться объект для того, чтобы образовать черную дыру. Величина критической окружности составляет 18,5 км, умноженных на массу черной дыры в единицах массы Солнца.

лепестки

В данном случае — огромные радиоизлучающие облака газа вне галактики или квазара.

линейный

Свойство объединения с помощью простого сложения.

локальная инерциальная система отсчета

Система отсчета, на которую не действуют никакие другие силы, кроме гравитации, которая свободно падает в гравитационном поле и которая

достаточно мала, чтобы в ней можно было пренебречь приливными гравитационными ускорениями.

магнитное поле

Поле, порождающее магнитные силы.

Максвелла законы электромагнетизма

Система физических законов, с помощью которых Джеймс Кларк Максвелл объединил все электромагнитные явления. С помощью этих законов можно предсказать, пользуясь математическими расчетами, поведение электричества, магнетизма и электромагнитных волн.

масса

Мера количества вещества, заключенная в объекте. (Инерция объекта пропорциональна его массе, а Эйнштейн показал, что масса фактически является очень компактной формой энергии.) Слово «масса» обычно употребляется вместо фразы «объект, состоящий из массы» в контексте, где важна инерция объекта.

машина времени

Устройство для путешествий назад во времени. На языке физиков: «замкнутая времяподобная кривая».

межгалактическое пространство

Пространство между галактиками.

межзвездное пространство

Пространство между звездами нашей галактики Млечный Путь.

метапринцип

Принцип, которому должны подчиняться все физические законы. Примером метапринципа является принцип относительности.

микроволны (СВЧ)

Электромагнитное излучение, длины волн которого немного короче, чем у радиоволн; см. рис. П.2.

микросекунда

Одна миллионная доля секунды.

мировая линия

Траектория объекта в пространстве-времени или на пространственно-временной диаграмме.

Млечный Путь

Галактика, в которой мы живем.

миксерная сингулярность

Сингулярность, возле которой приливные силы гравитации хаотически колеблются во времени, но не обязательно изменяются в пространстве. См. также *БХЛ-сингулярность*.

молекула

Ансамбль нескольких атомов, у которых общее электронное облако. Молекула воды, например, состоит из двух атомов водорода и одного атома кислорода.

наблюдатель

Субъект, обычно гипотетический, который предельно измеряет.

нарушение одновременности

Свойство событий быть одновременными в одной системе отсчета и неодновременными в другой системе отсчета, которая движется по отношению к первой.

натуральная философия

Обозначение естественных наук в XVII, XVIII и XIX столетиях.

нейтрино

Очень легкая частица, напоминающая фотон, за исключением того, что она практически не взаимодействует с веществом. Нейтрино, возникающие в центре Солнца, например, пролетают через него, практически не поглощаясь и не рассеиваясь.

нейтрон

Внутриатомная частица. Нейтроны и протоны, удерживаемые ядерными силами, составляют ядра атомов.

нейтронная звезда

Звезда, по массе примерно равная Солнцу, но с длиной окружности всего от 50 до 1000 км. Она состоит из нейтронов, плотно упакованных силами гравитации.

нейтронное ядро

Название, данное нейтронной звезде Оппенгеймером. Также нейтронная сердцевина в центре нормальной звезды.

нелинейный

Свойство объединения величин с помощью более сложного способа, чем простое сложение.

неопределенностей принцип

Квантово-механический закон, утверждающий, что при измерении с высокой точностью положения объекта или интенсивности поля происходит непредсказуемое возмущение скорости объекта или изменения поля в процессе проведения этого измерения.

неустойчивость

Свойство объекта, выражающееся в том, что незначительное его возмущение начинает расти и сильно изменяет объект, возможно, даже разрушая его. Более точно это свойство называется «неустойчивостью к малым возмущениям».

новая звезда

Яркая вспышка старой звезды, вызванная ядерным взрывом во внешних слоях звезды.

нуклон

Нейтрон или протон.

Ньютона законы физики

Законы физики, построенные на основе ньютоновской концепции абсолютного пространства и времени, господствовавшей в науке о Вселенной в XIX столетии.

Ньютона закон гравитации (закон всемирного тяготения)

См. закон обратной пропорциональности гравитации квадрату расстояния.

обруча гипотеза

Гипотеза, в соответствии с которой черная дыра образуется тогда и только тогда, когда тело сжимается настолько сильно, что помещается в обруч, равный критической окружности, который можно вращать вокруг тела во всех направлениях.

общая теория относительности (ОТО)

Предложенная Эйнштейном система физических законов, в которых гравитация описывается кривизной пространства-времени.

оптический астроном

Астроном, наблюдающий Вселенную в видимом свете.

орбитальный период

Время, требуемое некоторому объекту, вращающемуся по орбите вокруг другого, чтобы совершить один полный оборот.

отклонение света

Изменение направления распространения света и других электромагнитных волн при их пролете возле Солнца или какого-либо другого гравитирующего тела. Отклонение возникает вследствие кривизны пространства-времени вокруг тела.

относительный

Зависящий от системы отсчета; принимающий разные значения в разных системах отсчета, движущихся по-разному во Вселенной.

парадигма

Алгоритм, используемый сообществом ученых в исследованиях того или иного предмета и в обмене полученной информацией друг с другом.

перигелий

Ближайшее положение планеты к Солнцу на ее орбите.

перигелия Меркурия смещение

Возникающие отклонения в эллиптической орбите Меркурия, которые приводят к тому, что его перигелий смещается от оборота к обороту.

поле

Нечто, распределенное непрерывно и гладко в пространстве. Примерами поля являются: электрическое поле, магнитное поле, кривизна пространства-времени и гравитационная волна.

ГЛОССАРИЙ

полоса

Диапазон частот.

плазма

Горячий, ионизированный, электропроводящий газ.

Планка постоянная

Фундаментальная постоянная, обозначаемая \hbar , которая входит в законы квантовой механики; отношение энергии фотона к его угловой частоте (т. е. частота, умноженная на 2π); она равна $1,055 \times 10^{-27}$ эрг·с.

Планка—Уилера длина, площадь и время

Величины, связанные с законами квантовой гравитации. Длина Планка—Уилера, $\sqrt{G\hbar/c^3} = 1,62 \times 10^{-33}$ см — масштаб длины, ниже которого известное нам пространство перестает существовать и становится квантовой пеной. Время Планка—Уилера (длина Планка—Уилера, деленная на c , или примерно 10^{-43} с) является кратчайшим возможным интервалом времени; если два события разделены меньшим промежутком времени, невозможно определить, которое из них было раньше. Площадь Планка—Уилера (квадрат длины Планка—Уилера, равный $2,61 \times 10^{-66}$ см²) играет решающую роль в энтропии черной дыры. Постоянные: $G = 6,670 \times 10^{-8}$ дин·см²/г² — постоянная всемирного тяготения, $\hbar = 1,055 \times 10^{-27}$ эрг·с — постоянная Планка, $c = 2,998 \times 10^{10}$ см/с — скорость света.

плутоний-239

Особый тип атомных ядер плутония, в которых содержатся 239 нуклонов (94 протона и 145 нейтронов).

поляризация

Свойство двухкомпонентности электромагнитных и гравитационных волн, когда компоненты распространяются в разных направлениях.

поляризованное тело

Тело, отрицательный и положительный электрические заряды которого сосредоточены в разных областях.

поляризованный свет; поляризованные гравитационные волны

Свет или гравитационные волны, в которых полностью отсутствует одно из двух направлений поляризации.

постдок

Ученый, недавно получивший степень доктора философии и продолжающий свои изыскания под руководством более опытного исследователя.

Прайса теорема

Теорема, утверждающая, что все особенности черной дыры, которые способны превратиться в излучение, превратятся в него и будут полностью излучены, таким образом, лишив черную дыру ее «волосяного покрова».

первичная черная дыра

Черная дыра, гораздо менее массивная, чем Солнце, образовавшаяся в Большом взрыве.

приливные силы гравитации

Гравитационное воздействие на объекты, которое сжимает их в одном направлении и вытягивает в другом. Приливные гравитационные силы со стороны Луны и Солнца вызывают приливы и отливы земных океанов.

принцип относительности

Принцип Эйнштейна о равноправности всех инерциальных систем отсчета по отношению к законам физики; т. е. эти законы имеют одинаковую форму в любой инерциальной системе отсчета. В присутствии гравитации этот принцип сохраняется, но роль инерциальной системы отсчета играет локальная инерциальная система отсчета.

пространственно-временная диаграмма

Диаграмма, на которой время отложено по вертикальной, а пространство — по горизонтальной оси.

пространство-время

Четырехмерная «структура», возникающая при объединении пространства и времени.

пульсар

Замагниченная вращающаяся нейтронная звезда, от которой исходит пучок излучений (радиоволны и иногда свет и рентгеновские лучи). При вращении звезды этот пучок излучения крутится вместе со звездой, как луч вращающегося прожектора; всякий раз, когда он попадает на Землю, астрономы регистрируют импульс излучения.

пульсации

Колебания объекта, например, черной дыры, звезды или колокола.

пьезо-электрический кристалл

Кристалл, который индуцирует напряжение при сжатии или растяжении.

радиоастроном

Астроном, изучающий Вселенную с помощью радиоволн.

радиоволны

Электромагнитные волны относительно низких частот, используемые людьми для передачи радиосигналов, а в астрономии — для изучения удаленных астрономических объектов; см. рис. П.2.

радиогалактика

Галактика, интенсивно излучающая в радиодиапазонах.

радиоинтерферометр

Система нескольких радиотелескопов, связанных вместе и работающих как один большой радиотелескоп.

радиоисточник

Любой астрономический объект, излучающий радиоволны.

радиотелескоп

Телескоп, наблюдающий Вселенную в радиодиапазонах.

расщепитель пучка

Устройство, используемое для расщепления светового пучка на две части, идущие в различных направлениях, и для объединения двух световых пучков, которые приходят с различных направлений.

рентгеновское излучение (X-лучи)

Электромагнитные волны с промежуточными длинами волн между ультрафиолетовым и гамма-излучением; см. рис. П.2.

сверхпроводник

Вещество, проводящее электрический ток без всякого сопротивления.

сверхмассивная звезда

Гипотетическая звезда с массой 10 тысяч масс Солнца или более.

Сверхновая

Гигантский взрыв умирающей звезды. Взрыв внешних слоев звезды происходит за счет энергии, освобождающейся при коллапсе внутреннего ядра и образовании нейтронной звезды.

свет

Электромагнитные волны, видимые человеческим глазом; см. рис. П.2.

свободно падающий объект

Объект, на который не действуют никакие силы, кроме гравитации.

свободная частица

Частица, на которую не действуют никакие силы; т.е. частица, которая движется только под действием своей собственной инерции. В присутствии гравитации: частица, на которую не действуют никакие силы, *за исключением* гравитации.

силовые линии магнитного поля

Линии, которые указывают направление магнитного поля (т.е. направление, на которое показывала бы стрелка компаса, помещенная в магнитном поле). Эти линии вокруг магнитного стержня можно проявить, расположив над ним лист бумаги с насыпанными на него железными опилками.

силовые линии электрического поля

Линии, указывающие направление силы, которую оказывает электрическое поле на заряженные частицы. Электрический аналог магнитных силовых линий.

силы поверхностной гравитации

Интенсивность гравитационного поля, которую измерил бы наблюдатель, находящийся в покое над горизонтом событий черной дыры (более точно: интенсивность гравитационного поля, умноженная на

величину гравитационного замедления времени в точке расположения наблюдателя).

сингулярность

Область пространства-времени, в которой его кривизна становится такой сильной, что нарушаются законы ОТО и вступают в действие законы квантовой гравитации. При попытке описать сингулярность только в рамках ОТО мы приходим к неверному выводу, что приливные силы гравитации и кривизна пространства-времени становятся в этой точке бесконечно большими. Квантовая гравитация, по-видимому, позволяет избавиться от этих бесконечностей благодаря введению понятия квантовой пены.

синтез, ядерный

Слияние двух маленьких атомных ядер с образованием одного большого ядра. Синтез ядер атомов водорода, дейтерия и трития с образованием ядер атомов гелия — основной источник энергии Солнца и водородных бомб.

синхротронное излучение

Электромагнитные волны, излучаемые электронами, движущимися с большими скоростями по спирали вокруг магнитных силовых линий.

Сириус В

Белый карлик — компонент звезды Сириус.

система отсчета

Воображаемая лаборатория для проведения физических измерений, которая движется во Вселенной специальным образом.

скорость убегания

Скорость, с которой следует запустить объект с поверхности гравитирующего тела для того, чтобы он преодолел гравитационное притяжение этого тела.

событие

Точка в пространстве-времени; местоположение в пространстве в определенный момент времени. То, что происходит в некоторой точке пространства-времени, например, взрыв петарды.

сокращение длины

Уменьшение длины объекта в результате его движения мимо наблюдателя, измеряющего эту длину. Сокращение происходит только вдоль направления движения.

сопротивление сжатию, или просто сопротивление

Также *адиабатический* показатель. Рост давления внутри вещества в процентном отношении при увеличении плотности на 1%.

сохранения закон

Любой физический закон, утверждающий неизменность какого-либо количества. Примерами являются законы сохранения массы и энергии.

специальная теория относительности (СТО)

Законы физики Эйнштейна в отсутствие гравитации.

спектральные линии

Резкие особенности в спектре излучения какого-либо источника. Эти особенности возникают вследствие сильного излучения или поглощения атомов или молекул на отдельных длинах волн.

спектрограф

Усложненная версия призмы для разделения разных цветов (длин волн) света и измерения его спектра.

спектр

Диапазон длин волн или частот электромагнитных волн, начиная радиоволнами низкой частоты, включая видимый диапазон, до гамма-лучей высокой частоты; см. рис. П.2 в Прологе. Также картина распределения света в зависимости от частоты (или длины волны), полученная после прохождения света через призму.

стандартный квантовый предел

Предел, в соответствии с принципом неопределенностей, точности измерений определенных величин с помощью стандартных методов. Этот предел можно преодолеть, используя квантово-неразрушающие методы измерения.

стробоскопическое измерение

Определенный тип квантово-неразрушающих методов измерений, при которых осуществляется последовательность очень быстрых измерений колеблющегося стержня, причем каждое последовательное измерение проводится спустя промежуток времени, равный одному периоду колебаний после предыдущего.

структура звезды

Детальная картина изменения давления, плотности, температуры и сил гравитации внутри звезды при удалении от ее центра к поверхности.

струя (джет)

Струя газа, уносящая энергию из центрального источника радиогалактики или квазара в удаленную область, излучающую радиоволны.

схлопывание (коллапс)

Сжатие звезды, вызванное собственными силами ее гравитации, происходящее с большой скоростью.

темная звезда

Этот термин использовался для обозначения черной дыры в конце XVIII и начале XIX столетия.

тепловое давление

Давление, возникающее вследствие тепловых, случайных движений атомов, молекул, электронов и/или других частиц.

термодинамика

Ряд физических законов, управляющих случайным, статистическим поведением большого количества атомов и молекул, включая их тепловые движения.

термоядерная бомба

Водородная бомба, принцип действия которой основан на реакции термоядерного синтеза, в результате ее взрыва выделяется чрезвычайно большое количество энергии.

термоядерные реакции

Ядерные реакции слияния ядер, индуцированные сильным нагреванием.

топология

Область математики, рассматривающая качественные связи объектов друг с другом. Например, существенно разными объектами в топологии являются сфера (у которой нет дырки) и пончик (с одной дыркой).

точность (о выводе)

Высокая степень точности и надежности (применяется к математическим расчетам и рассуждениям).

третий

Атомные ядра, состоящие из одного протона и двух нейтронов, связанных друг с другом ядерной силой.

туманность

Облако ярко светящегося газа в межзвездном пространстве. До 1930-х годов за туманности ошибочно принимались многие галактики.

угловой момент

Мера количества вращения тела. В этой книге вместо «углового момента» используется слово «вращение».

ультрафиолетовое излучение

Электромагнитное излучение с длинами волн короче света; см. рис. П.2.

уравнение состояния

Вид зависимости давления вещества (или его сопротивления сжатию) от плотности.

уран-235

Особый тип ядра урана, содержащего 235 нуклонов (92 протона и 143 нейтрона).

усиленная атомная бомба

Атомная бомба, взрывная сила которой увеличена одним или более слоями атомных зарядов.

ускоренный наблюдатель

Наблюдатель, который не находится в свободном падении.

устье червоточины

Вход в червоточину. Такой вход существует на обоих ее концах.

фотон

Частица света или любого другого типа электромагнитного излучения (радио, микроволнового, инфракрасного, ультрафиолетового, рентгеновского, гамма-излучения); частица, которая в соответствии с корпускулярно-волновым дуализмом ассоциируется с электромагнитными волнами.

фронт ударной волны

Область в струе газа, где плотность и температура газа испытывают внезапный большой скачок.

функция

Математическая зависимость, которая показывает, как одна величина, например, длина окружности горизонта событий черной дыры, зависит от другой величины, например, массы черной дыры; в нашем примере функция есть $C = 4\pi GM/c^2$, где C — длина окружности, M — масса, G — постоянная всемирного тяготения, c — скорость света.

холодное, мертвое вещество

Холодное вещество, в котором все ядерные реакции завершены.

цепная реакция

Последовательность расщепления атомных ядер, в которой нейтроны, появившиеся в результате расщепления одного ядра, вызывают расщепление других ядер.

Чандрасекара предел

Максимальная масса, которую может иметь белый карлик.

частица

Крошечный объект; один из «кирпичиков» материи (например, электрон, протон, фотон или гравитон).

частота

Скорость колебаний волны, т.е. число циклов колебаний в секунду.

червоточина (кротовая нора)

«Туннель» в топологии пространства, соединяющий две далеко отстоящие друг от друга точки в нашей Вселенной.

черная дыра

Объект, возникший при схлопывании звезды, который может поглотить все, но из которого ничто никогда не может выйти наружу.

чувствительность

Самый слабый сигнал, который еще можно измерить тем или иным устройством. Способность устройства принимать сигналы.

Шварцшильда геометрия

Геометрия пространства-времени вокруг и внутри сферической, невращающейся черной дыры.

Шварцшильда сингулярность

Фраза, служившая в 1916–1958 гг. для описания черной дыры.

ширина полосы

Диапазон частот, в котором инструмент может обнаружить волну.

экзотическое вещество

Вещество, имеющее *отрицательную* среднюю плотность энергии с точки зрения наблюдателя, который движется сквозь него почти со скоростью света.

электрический заряд

Свойство частицы или вещества, которое позволяет им порождать электрические силы и чувствовать их.

электрическое поле

Поле, создаваемое электрическим зарядом и действующее на другие электрические заряды.

электромагнитные волны

Распространяющиеся в пространстве электромагнитные поля. В зависимости от длины волны они включают радиоволны, микроволновое излучение, инфракрасное излучение, обычный свет, ультрафиолетовое излучение, рентгеновское и гамма-излучение.

электрон

Фундаментальная частица вещества с отрицательным электрическим зарядом, находящаяся во внешних областях атома.

электронное вырождение

Поведение электронов при высоких плотностях, характеризующееся их хаотическими движениями с высокими скоростями. Вырождение является следствием квантово-механического дуализма, когда каждая частица имеет также свойства волны.

элементарная частица

Частица вещества или антивещества меньшая атома. К элементарным частицам относятся электроны, протоны, нейтроны, позитроны, антипротоны и антинейтроны.

эквивалентности принцип

Принцип, согласно которому все законы физики в местной инерциальной системе отсчета в присутствии гравитации принимают ту же форму, что и в инерциальной системе отсчета в отсутствие гравитации.

энтропия

Мера случайности большого ансамбля атомов, молекул или других частиц; равна логарифму количества способов, с помощью которых можно распределить эти частицы, не меняя их макроскопических свойств.

эфир

Гипотетическая среда, которая (в соответствии с воззрениями XIX века) колеблется при прохождении электромагнитных волн, по сути создавая эти волны. Считалось, что эфир находится в покое в абсолютном пространстве.

ядерная сила

Называется также «сильным взаимодействием». Сила, действующая между протонами, нейтронами, протонами и нейтронами, которая удерживает атомные ядра. Если частицы находятся достаточно далеко друг от друга, ядерная сила притягивает; когда они приближаются, она начинает их расталкивать. Ядерная сила ответственна за большую часть давления в центральной области нейтронной звезды.

ядерная реакция

Слияние нескольких атомных ядер с образованием одного большого ядра (синтез) или разрыв большого ядра с образованием нескольких маленьких (расщепление, или деление).

ядерное горение

Реакции ядерного синтеза, поддерживающие светимость звезд и вызывающие взрыв водородной бомбы.

ядерный реактор

Устройство, в котором используется цепная реакция ядерного деления для производства энергии, плутония и в некоторых случаях — электричества.

ядро, атомное

Плотная сердцевина атома. Атомные ядра имеют положительный электрический заряд, состоят из нейтронов и протонов и удерживаются вместе ядерными силами.

Cyg A

Лебедь A; радиогалактика, которая похожа на две сталкивающиеся галактики, но не является ими. Первая надежно отождествленная радиогалактика.

Cyg X-1

Лебедь X-1; массивный объект в нашей галактике, который, возможно, является черной дырой. Падающий на него горячий газ вызывает рентгеновское излучение, наблюдаемое на Земле.

LIGO

Лазерная Интерферометрическая Гравитационно-волновая Обсерватория.

NSF (Национальный научный фонд)

Правительственное агентство в США, которое занимается поддержкой основных научных исследований.

 Sco X-1

Скорпион X-1, самая яркая рентгеновская звезда на небе.

ПРИМЕЧАНИЯ

*Что придает мне уверенности в том,
что я говорю?*

Источники и сокращения

Все источники, цитируемые в этих примечаниях, перечислены в библиографии. В примечаниях использованы следующие сокращения:

ЕСР-1, ЕСР-2 — *The Collected Papers of Albert Einstein*, Volume 1, Volume 2, в библиографии указаны как ЕСР-1, ЕСР-2.¹

ИНТ — Интервью, взятые автором, перечисленные в начале библиографии.

МТУ — Мизнер, Торн и Уилер (Misner, Thorne and Wheeler, 1973).²

Пролог

Страница

- 15 [Из всех порождений ... большие трудности.] Этот параграф адаптирован из статьи (Thorne, 1974).
- 18 [Из периода обращения ... («10 солнечных масс»)] Формула Ньютона: $M_h = C_0^3 / (2\pi G P_0^2)$, где M_h — масса дыры (или любого другого притягивающего тела), а C_0 и P_0 — окружность и период любой круговой орбиты вокруг дыры, $\pi = 3,14159 \dots$, а G — гравитационная постоянная Ньютона $= 1,327 \times 10^{11} \text{ км}^3/\text{с}^2$ на солнечную массу. См. примечание далее по тексту на с. 21. Подставляя в эту формулу период обращения звездолета $P_0 = 5$ минут 46 секунд и окружность орбиты $C_0 = 10^6$ километров, получаем, что $M_h = 10$ солнечных масс. (Одна солнечная масса равна $1,989 \times 10^{30} \text{ кг}$.)
- 20–21 [Что касается размеров ... тем больше ее горизонт.] Формула для окружности горизонта имеет вид $C_h = 4\pi G M_h / c^2 = 18,5 \text{ км} \times (M_h / M_\odot)$, где M_h — масса дыры, G — гравитационная постоянная Ньютона (см. выше), $c = 2,998 \times 10^5 \text{ км/с}$ — скорость света и $M_\odot = 1,989 \times 10^{30} \text{ кг}$ — масса Солнца. См., например, главы 31 и 32 МТУ.
- 27 [Именно из-за этих приливов ... приливной силой.] Приливная сила, выраженная как разность ускорений между вашей головой и вашими ногами (или между любыми другими объектами), определяется как $\Delta a = 16\pi^3 G (M_h / C^3) L$, где G — ньютоновская гравитационная постоянная (см.

¹ Русский перевод цитируемых работ самого А. Эйнштейна, см. его Собрание научных трудов, т. 1–4 — М.: Наука, 1965–1967. [Прим. ред.]

² Русское издание: Мизнер Ч., Торн К., Уилер Дж. Гравитация. В 3-х т. — М.: Мир, 1977. [Прим. ред.]

ПРИМЕЧАНИЯ

- выше), M_h — масса черной дыры, C — окружность, на которой вы находитесь, и L — расстояние между головой и ногами. Заметьте, что ускорение гравитации на Земле равно $9,81 \text{ м/с}^2$. См., например, с. 29 МТУ.
- 29 [ЗАРЯ напоминает, что согласно предсказаниям общей теории относительности ... становятся слабее.] Приведенная в предыдущем примечании формула дает для приливной силы $\Delta a \sim M_h / C^3$. Когда окружность близка к горизонту, $C \sim M_h$ (примечание к с. 21), поэтому $\Delta a \sim 1/M_h^2$.
- 30 [Весь путь — расстояние в 30100 световых лет ... займет всего 20 лет.] Время звездолета T_{ship} , время на Земле T_E и дальность полета D связаны соотношениями $T_E = (2c/g) \sinh(gT_{\text{ship}}/2c)$ и $D = (2c^2/g) [\cosh(gT_{\text{ship}}/2c) - 1]$, где g — ускорение корабля (для «земной гравитации» $9,81 \text{ м/с}^2$), c — скорость света, а \cosh и \sinh — гиперболические косинус и синус. См., например, главу 6 МТУ. Для полетов длительностью много большей одного года эти формулы дают приблизительно $T_E = D/c$ и $T_{\text{ship}} = (2c/g) \ln(gD/c^2)$, где \ln — натуральный логарифм.
- 31–32 [Чтобы оставаться на круговой орбите ... швырнула вас к центру.] Математическое исследование круговых (и иных) орбит вокруг невращающейся черной дыры см., например, в главе 25 МТУ, особенно Врезку 25.6.
- 33 [Расчеты показали ... на окружности в 1,0001 горизонта.] Ускорение, которое вы почувствуете, зависнув на окружности C над черной дырой с массой M_h и окружностью C_h , будет $a = 4\pi^2 G(M_h / C^2) / (1 - C_h / C)^{1/2}$, где G — гравитационная постоянная Ньютона. Если вы находитесь очень близко к горизонту, то $C \approx C_h \sim M_h$, и значит, $a \sim 1/M_h$.
- 33 [При использовании обычного ускорения в $1g$... по часам звездолета.] См. примечание к с. 30 выше.
- 36 [Пятно уменьшилось ... видим на Земле.] Если зависнуть на окружности C чуть выше горизонта радиусом C_h , то свет из внешней Вселенной можно будет увидеть сосредоточенным в ярком диске с угловым диаметром $\alpha \approx 3\sqrt{3} \sqrt{1 - C_h / C}$ рад $\approx 300 \sqrt{1 - C_h / C}$ град. См., например, Врезку 25.7 МТУ.
- 36–38 [Также необычно то, что цвета ... длиной волны 5×10^{-7} метра.] Если зависнуть на окружности C чуть выше горизонта C_h , то длина волны света λ из внешней Вселенной будет иметь синеволновое смещение (эффект, обратный красному гравитационному сдвигу) к $\lambda_{\text{принято}} / \lambda_{\text{излучено}} = \sqrt{1 - C_h / C}$. См., например, с. 657 МТУ.
- 42 [Подставив эти числа ... через 7 дней.] Когда две черные дыры массой M_h каждая обращаются вокруг друг друга на расстоянии D , они имеют период обращения $2\pi \sqrt{D^3 / 2GM_h}$, а сила отдачи испускаемых ими гравитационных волн заставит их сблизиться по спирали и слиться через время $(5/512) \times (c^5 / G^3) (D^4 / M_h^3)$, где, как и выше, G — гравитационная постоянная Ньютона, а c — скорость света. См., например, уравнение (36.17b) в МТУ.
- 46 [Кольцо имеет длину окружности в 5 миллионов километров ... искривления пространства-времени.] Человек, находящийся на собранном из

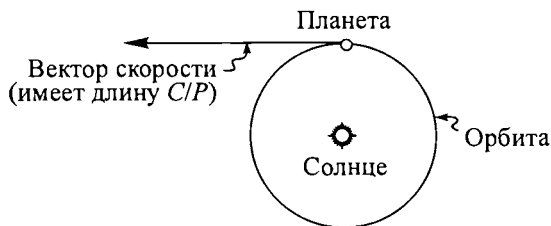
балок кольцо, на расстоянии L от внутренней поверхности почувствует ускорение $a = (24\pi^3 G M_h / C^3) L$, направленное к центральному слою, на одну треть вызванное центробежными силами вращающегося кольца и на две трети приливными силами черной дыры. G — гравитационная постоянная Ньютона, M_h — масса дыры и C — окружность центрального слоя кольца. Для сравнения гравитационное ускорение на поверхности Земли равно $9,81 \text{ м/с}^2$. См. примечание к с. 27 выше.

- 48–49 [Законы квантовой гравитации ... для путешествия во времени.] $1,62 \times 10^{-33} \text{ см} = \sqrt{G/\hbar c^3}$ — длина Планка–Уилера, где G — гравитационная постоянная Ньютона, c — скорость света и \hbar — постоянная Планка ($1,055 \times 10^{-34} \text{ кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}^2$). См. главу 14.
- 51 [Другим фактом ... с развевающимися знаменами.] См., например, (Will, 1986).

Глава 1

Общее замечание к главе 1. Большая часть информации о жизни Эйнштейна основана на общеизвестных биографических изданиях: (Pais, 1982; Hoffman, 1972; Clark, 1971; Einstein, 1949; Frank, 1947). Я не привожу отдельно ссылки на цитаты и факты, взятые из этих источников. Сейчас становятся доступными новые исторические материалы: опубликованы избранные статьи Эйнштейна, ECP-1, ECP-2, (Einstein and Marić, 1992). Ниже я буду ссылаться на материалы из этих источников.

- 53 [Профессору Вильгельму Оствальду ... Герман Эйнштейн] Документ 99 из ECP-1
- 54 [«Бездумное поклонение авторитетам есть злейший враг истины»,] Документ 115 в ECP-1, согласно переводу на английский (Renn and Schulmann, 1992, с. xix).
- 55 Сноска 1: Приведем пример того, что означает применять математические выкладки к законам физики:
В начале XVII столетия на основании проведенных Тихо Браге наблюдений планет Иоганн Кеплер вывел, что для всех известных в то время планет: Меркурия, Венеры, Земли, Марса, Юпитера и Сатурна, куб длины орбиты, деленный на квадрат ее периода обращения вокруг Солнца: C^3/P^2 , есть одна и та же величина. Полвека спустя Исаак Ньютон нашел этому объяснение при помощи своих законов движения и тяготения (см. текст на с. 55) и математических выкладок:
1. Из следующей диаграммы, немного попотев, можно получить, что у планеты, вращающейся вокруг Солнца, скорость изменения скорости определяется формулой $a = 2\pi C/P^2$, где $\pi = 3,14159...$ Эту величину называют *центростремительным ускорением* обращающейся по орбите планеты.
 2. Второй закон движения Ньютона говорит, что центростремительное ускорение должно быть равно силе гравитационного притяжения F_g , которая действует на планету со стороны Солнца, деленной на массу планеты M_p , иными словами, $2\pi C/P^2 = F_g/M_p$.



3. Закон тяготения Ньютона утверждает, что сила притяжения F_g пропорциональна массе Солнца M_s , умноженной на массу планеты M_p , деленную на квадрат длины ее орбиты. Если вместо пропорциональности записать точное равенство, то получится: $F_g = 4\pi^2 GM_s M_p / C^2$. Здесь: G — ньютоновская постоянная всемирного тяготения, равная $6,67 \times 10^{-20} \text{ км}^3/(\text{с}^2 \cdot \text{кг})$, или, что то же самое, $1,327 \times 10^{11} \text{ км}^3/\text{с}^2$ на массу Солнца.
4. Подставляя это выражение для силы гравитационного притяжения F_g во второй закон движения Ньютона (см. пункт 2 выше), мы получаем: $2\pi C/P^2 = 4\pi^2 GM_s / C^2$. Умножая обе части этого уравнения на $C^2/2\pi$, мы получаем: $C^3/P^2 = 2\pi GM_s$.

Так ньютоновские законы движения объясняют и делают более строгими соотношения, обнаруженные Кеплером: величина C^3/P^2 одинакова для всех планет и она зависит только от постоянной всемирного тяготения и массы Солнца.

Приведенный выше пример хорошо иллюстрирует силу физических законов, поскольку он не только объясняет наблюдения Кеплера, но также дает нам способ определения массы Солнца. Разделив последнее уравнение на $2\pi G$, мы получаем: $M_s = C^3/(2\pi GP^2)$. Подставляя в эту формулу длину орбиты C и ее период обращения P , измеренные астрономами, и гравитационную постоянную G , которую можно измерить в земной лаборатории, мы получаем, что масса Солнца равна $1,989 \times 10^{30} \text{ кг}$.

- 56 [«Вебер читает мастерски ... каждую новую лекцию».] Документ 39 в ECP-1; Документ 2 (Einstein and Marić, 1992).
- 57 [И поскольку эфир ... покоится в абсолютном пространстве,] В этой главе я ничего не говорю о рассуждениях некоторых физиков XIX века о том, что вблизи Земли эфир может увлекаться ею, двигаясь относительно абсолютного пространства. Дело в том, что существует веский экспериментальный факт, противоречащий этому: если бы у поверхности Земли эфир был неподвижен по отношению к ней, не было бы звездной aberrации; однако этот эффект, возникающий из-за движения Земли вокруг Солнца, хорошо известен. Коротко историю представлений об эфире можно найти в главе 6 (Pais, 1982), более подробную информацию — в приведенных там ссылках.
- 58 [Двадцативосьмилетний американец Альберт Майкельсон ... обладающий рекордной точностью.] Доступная в то время технология не позволяла еще для проверки ньютоновских предсказаний сравнивать с достаточной точностью (одна часть на 10^4) скорости света в разных направле-

ниях за один проход. Однако существовало аналогичное предсказание разностей скоростей света для прохода света туда и обратно по разным направлениям (разница примерно пять частей на 10^9 при проходе в направлении, параллельном движению Земли через эфир и перпендикулярном ему). Новая технология Майкельсона идеально подходила для измерения такой разницы, это было именно то, что Майкельсон пытался, но не мог обнаружить.

- 59 [В отличие от них, Генрих Вебер ... морочить студентам головы.] Я не могу утверждать *навверняка*, что Вебер был уверен в этом, или того, что лично он считал, что упоминать опыты Майкельсона–Морли в лекциях не следует. Данное утверждение основано на отсутствии каких-либо данных о том, что Вебер обсуждал эти опыты или их следствия в своих лекциях, см. заметки Эйнштейна об этих лекциях (Документ 37 в ECP-1) и краткое описание (с. 62 в ECP-1) других заметок об этих лекциях.
- 59 [Сравнивая их с результатами других экспериментов.] Существовали экспериментальные результаты, такие, например, как измерение аберрации света звезд, которые указывали на то, что эфир не увлекается Землей, см. примечание к с. 57 выше.
- 59 [Ничтожное (на пять миллиардных долей) ... опытов Майкельсона–Морли.] Майкельсон измерял (см. примечание к с. 57) скорость света распространяющегося туда и обратно и искал различие примерно в пять миллиардных долей.
- 60 [Если записать уравнения Максвелла ... (см. рис. 1.1a, б)] Этот пример с началами и концами силовых линий и его иллюстрация на рис. 1.1 представляет собой мою попытку перевести на доступный язык картинок один из выводов, следующих из уравнений Максвелла, над объяснением которого бились Лоренц, Лармор и Пуанкаре. Подробнее об этом можно узнать: с. 123–130 Pais (1982).
- 60–61 [Если бы фицджеральдовское сокращение ... «замедляет» время.] Для того чтобы сделать уравнения красивыми, нужно было не только ввести сокращение объектов и замедление времени, но также признать, что одновременность событий относительна, т. е. зависит от того, как движется наблюдатель. Лоренц, Лармор и Пуанкаре учитывали это наравне с сокращением объектов и замедлением времени, однако в этом месте я для упрощения опустил это здесь, остановившись на понятии одновременности ниже в этой же главе.
- 62 [«Я все более и более убеждаюсь, ... неверна».] Документ 52 в ECP-1, Документ 8 в (Einstein and Marić, 1992).
- 62 [В течение последующих шести лет ... замедления времени.] Здесь я немного фантазирую. Достоверно неизвестно, насколько серьезно Эйнштейн занимался данной проблемой в 1899–1905. Согласно Pais (1982, часть 6b), в это время Эйнштейн еще не знал о выводах Лоренца, Лармора и Пуанкаре касательно сокращения длины и замедления времени, следующих из уравнений Максвелла. Если вдаваться в технические подробности, он знал о следствиях, получаемых из преобразований Лоренца в первом порядке разложения по скорости (включая нарушение одновре-

менности), но не во втором, где появляется замедление времени и сокращение длины. С другой стороны, он, скорее всего, знал о выводах Фицджеральда–Лоренца о том, что из опытов Майкельсона–Морли может следовать сокращение длины, и мы знаем, что он в своей работе 1905 г. по специальной теории относительности привел свои собственные полные формулы для преобразований Лоренца и все следствия из них, включая сокращение длины, замедление времени и нарушение одновременности.

- 63 [Энергичной и волевой Милеве Марич,] Описание личности Марич, основанное в основном на ее любовной переписке с Эйнштейном, см. (Renn and Schulmann, 1992); сами любовные письма см. ECP-1 и (Einstein and Marić, 1992).
- 63 [«Я совершенно уверен... плохую рекомендацию».] Документ 94 в ECP-1, Документ 95 в (Einstein and Marić, 1992).
- 63 [«Я давно бы нашел ... наделил его толстой шкурой».] Документ 100 из ECP-1.
- 63 [«Из-за этой мисс Марич ... терпеть ее не могу».] Документ 138 из ECP-1.
- 63 [«Эта леди ... бессердечные и злые люди!»] Документ 125 из ECP-1.
- 63 [«Я вне себя от радости... из моих бывших учителей».] Документ 104 из ECP-1.
- 64 [рождение у них внебрачного ребенка... в пуританской Швейцарии,] ECP-1, Эйнштейн и Марич (1992).
- 64–65 [Большую часть этого времени он проводил в изучении физики и размышлениях о ней,] Я предполагаю, основываясь на различных биографических данных об Эйнштейне, что он проводил свое свободное время именно так.
- 65 [«Он сидел в кабинете... погрузился в работу».] Seeling (1956), согласно цитате Clark (1971).
- 65 [Иногда все же общение помогало ... «Лучшего слушателя ... во всей Европе».] Обратите внимание на дискуссию на с. xxvi (Renn and Schulmann, 1992) о вкладе Бессо в работу Эйнштейна.
- 72 [Это доказательство... придумано Эйнштейном в 1905 г.] Часть 2 Документа 23 из ECP-2.
- 72 [То, что пространство и время ... в конце XX века.] См., например, приложение в (Will, 1986).
- 74 [Эйнштейн, *предположив...пришел к своему принципу относительности*.] Как выяснил Pais (1982, часть 6b.6), Анри Пуанкаре сформулировал упрощенный вариант принципа относительности (назвав его «принцип относительности») за один год до Эйнштейна, однако он не понимал его значимости.
- 78 [Статья Эйнштейна... и опубликована.] Документ 23 из ECP-2.

Глава 2

Общее замечание к главе 2. Большая часть информации о жизни Эйнштейна основана на общеизвестных биографических изданиях: (Pais, 1982; Hoffman, 1972; Clark, 1971; Einstein, 1949; Frank, 1947). В большинстве случаев я не привожу отдельно ссылки на цитаты и факты, взятые из этих источников. В ближайшее время с публикацией сборников, следующих за ЕСП-1 и ЕСП-2, должны стать доступны новые исторические материалы.

В этой главе я старался проследить тот путь, которым шел Эйнштейн от специальной теории относительности к созданию общей теории относительности. По необходимости я многое упрощал и излагал свое описание современным языком, а не тем, которым пользовался Эйнштейн. Более аккуратную реконструкцию интеллектуального пути Эйнштейна см. (Pais, 1982).

- 83 [Представление о пространстве и времени ... независимая реальность.] Обращение Германа Минковского к 80-й Ассамблее немецких физиков и естествоиспытателей в Кельне 21 сентября 1908 г. В переводе на английский опубликовано в (Lorentz, Einstein, Minkowski and Weyl, 1923).
- 90 [Другое несоответствие ... неверной интерпретации астрономических наблюдений.] Казалось, что Луна слегка ускоряет свое движение по орбите вокруг Земли, эффект, который не могли объяснить законы Ньютона. В 1920 г. Г.Тейлор и Х.Джеффрис поняли, что на самом деле Луна *не* ускоряется. Напротив, это замедляется вращение Земли из-за того, что Луна за счет гравитационного притяжения водит по ней приливные волны. Наблюдая за движением Луны с учетом уменьшения скорости вращения Земли, астрономы правильно объяснили ее кажущееся ускорение. См. (Smart, 1953).
- 92 [Пригласили написать ... *Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik.*] Эта замечательная обзорная статья Эйнштейна была опубликована как Документ 47 в ЕСП-2.
- 97 [Эйнштейн открыл гравитационное замедление ... представлен на Врезке 2.4.] Рассуждения Эйнштейна, приведенные на Врезке 2.4, были впервые опубликованы в работе (Einstein, 1911).
- 97 [Начиная работать над обзорной статьей в 1907 г. ... *Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik.*] Документ 47 из ЕСП-2.
- 99 [Жизнь профессора ... читал блестяще.] См. (Frank, 1947), с. 89–91.
- 113 [Все эти выводы ... 25 ноября.] (Einstein, 1915).
- 114–115 Врезка 2.6: Примечание для тех, кто знаком с математической формулировкой общей теории относительности: описание уравнения поля Эйнштейна, данное здесь, соответствует формуле: $R_{\mu\nu} = 4\pi G(T_{\mu\nu} + T_{xx} + T_{yy} + T_{zz})$, где $R_{\mu\nu}$ — временная диагональная компонента тензора Риччи, G — гравитационная постоянная, $T_{\mu\nu}$ — плотность массы, выраженная в единицах энергии (см. Врезку 5.2), и $T_{xx} + T_{yy} + T_{zz}$ — сумма основных давлений по трем ортогональным направлениям, см. с. 406 МТУ. Если эта

временная диагональная компонента уравнения поля Эйнштейна выполняется во *всех* системах отсчета, то все остальные его девять компонент также будут выполняться.

- 115 [Просматривая научные публикации... не были переведены на английский вплоть до 1993 года!] Статьи Эйнштейна и права на их переиздание были предметом юридических баталий в течение нескольких десятилетий. Русское издание его избранных статей было подготовлено и издано в то время, когда Советский Союз еще не присоединился к Международной конвенции по авторским правам. В настоящее время есть гораздо более полное и последовательное издание на английском языке, его первые тома обозначаются как ECP-1 и ECP-2.

Глава 3

- 117 [«Важным результатом этого исследования ... реальности».] (Einstein, 1939).
- 118 [В 1783 г. британский натурфилософ Митчелл ... должны выглядеть] (Michell, 1784). Обсуждения этой работы: см., например, (Gibbons, 1979; Schaffer, 1979; Israel, 1987, а также Einstein, 1991).
- 119 [Через тринадцать лет ... последующих изданий своей книги.] (Лаплас, 1796, 1799). Обсуждение публикаций Лапласа о темных звездах вы можете найти в (Israel, 1987) и (Eisenstaedt, 1991). Айзенштэт обсуждал неудачную попытку проверить с помощью наблюдений предсказание Митчелла о гравитационном торможении света, излучаемого массивными звездами, и то влияние, которое эта попытка могла оказать на решение Лапласа исключить темные звезды из третьего издания его книги.
- 127 [Джим Браулт ... предсказаниями Эйнштейна.] Подробное обсуждение экспериментальной проверки законов тяготения общей теории относительности Эйнштейна можно найти здесь: (Will, 1986).
- 128 [Однако мало кто ... плотных звезд.] Обсуждение первых откликов на Шварцшильдовскую геометрию и первых исследований в этой области см. (Eisenstaedt, 1982). Более широко история, охватывающая период с 1916 по 1974 гг. представлена (Israel, 1987).
- 131 [В 1939 г. Эйнштейн опубликовал ... не могут существовать.] (Einstein, 1939).
- 131–132 [Для подтверждения ... по логике Эйнштейна.] (Schwarzschild, 1916b).
- 134 [«Я уверен ... огромную опасность».] (Israel, 1990).
- 135 [«Существует удивительная ... об этом можно подумать».] (Israel, 1990).

Глава 4

Общее замечание к главе 4. Рассказ об исторических событиях, затронутых в этой главе, основан на: 1) личных беседах с С. Чандрасекаром за последние двадцать пять лет; 2) записан-

ном мной с ним интервью (ИНТ-Чандрасекар); 3) написанной им книге об Эддингтоне (Чандрасекар, 1983а) и 4) прекрасной его биографии (Wali, 1991). Кроме особых случаев, я не ссылаюсь по каждому поводу на конкретные источники. Научные публикации Чандрасекара о белых карликах собраны вместе в сборнике (Chandrasekhar, 1989).

- 137 [Особенно интересной ... *Royal Astronomical Society*] (Fowler, 1926).
- 137 [Статья Фоулера указала ... Артура С. Эддингтона,] (Eddington, 1926).
- 139 Сноска 2: Детальное обсуждение тех трудностей, с которыми столкнулся Адамс, и погрешностей в его измерениях см. (Greenstein, Oke, and Shipman, 1985). По этой ссылке также можно найти информацию о наблюдательных исследованиях Сириуса В до 1985 г.
- 146 [Чандрасекар вывел сопротивление сжатию ... давления.] Здесь необходимо сделать два замечания. Во-первых, в работе (Fawler, 1926) уже было рассчитано сопротивление сжатию, поэтому Чандрасекар в основном проверял вычисления Фаулера. Во-вторых, это был не тот способ, которому следовал в своих вычислениях Чандрасекар (ИНТ-Чандрасекар), хотя математически он и эквивалентен истинному. Описанный способ мне было проще объяснить; настоящий путь состоял в расчете давления электронов как интеграл по пространству их импульсов.
- 149 [Наконец, спустя год ... напечатана.] (Chandrasekhar, 1931).
- 149 Сноска 4: (Stoner, 1930). Этот результат Стоунера кратко отмечен Чандрасекаром (Chandrasekhar, 1931). Обсуждение работы Стоунера и связанной с ней работы Вильгельма Андерсона см. (Israel, 1987).
- 150 [К концу 1934 г. ... известно.] (Anderson, 1929), (Stoner, 1930).
- 151 Рис. 4.3: Массы и окружности белых карликов, показанные на рисунке, и результаты Чандрасекара по внутренней структуре звезд типа белых карликов были позже опубликованы (Chandrasekhar, 1935).
- 157 [«Звезда будет продолжать излучать ... абсурдным образом!»] (Eddington, 1935a). Другие детали аргументации Эддингтона см. (Eddington, 1935b).
- 158 [Вот что он писал Леону Розенфельду ... «Если Эддингтон прав ... утверждениях Эддингтона».] (Wali, 1991).
- 158–159 [В 1939 г. в Париже ... «Здесь мы не верим Эддингтону».] (Wali, 1991).
- 159 [Если природа не противопоставила ... «могилу» белого карлика.] Мне это авторитетно заявил один известный профессор астрономии, когда я был студентом в Калтехе в 1958–62. У меня осталось сильное личное впечатление от того времени, что большинство астрономов придерживались этого взгляда, и так было до начала 1940-х годов, но я не могу быть уверен.
- 159 [«Я чувствовал, что все астрономы ... чем-то другим».] Цитируется по (Wali, 1991).
- 159 [Эддингтону такое обращение ... астрономического сообщества.] Эта интерпретация поведения Эддингтона, которая, как мне кажется, хоро-

шо согласуется с историческими фактами, была предложена мне Вернером Израэлем в критических замечаниях к ранней версии этой главы.

Глава 5

Общее замечание к главе 5. Рассказ об исторических событиях, затронутых в этой главе, основан на: 1) моих интервью с участниками описываемых событий, их коллегами и друзьями (ИНТ-Байм, ИНТ-Брагинский, ИНТ-Эгген, ИНТ-Фоулер, ИНТ-Гинзбург, ИНТ-Гринштейн, ИНТ-Гаррисон, ИНТ-Халатников, ИНТ-Лифшиц, ИНТ-Сандаж, ИНТ-Сербер, ИНТ-Волков, ИНТ-Уилер); 2) моем знакомстве с научными статьями, написанными участниками. Для характеристики общего фона истории физики в 1920-х и 1930-х годах я иногда использовал книгу (Kevles, 1971) и для советской физики книгу (Medvedev, 1978). Полезную информацию и общие сведения о Ландау я узнал из книг (Livanova, 1980; Gamow, 1970), об Оппенгеймере из книг (Rabi et al., 1969; Smith and Weiner, 1980), а о развитии идей Уилера из его рабочих журналов (Wheeler, 1988). В некоторых местах я полагался на другие источники, цитируемые ниже.

- 160 [«Когда я познакомился с Фрицем ... ошибаются»,] ИНТ-Фоулер.
- 160 [Джесси Гринштейн ... «самоуверенного гения ... других людей»,] ИНТ-Гринштейн и (Greenstein, 1982).
- 161 [Для популяризации концепции нейтронных звезд ... радиошоу.] (Zwicky, 1935).
- 162 [«Цвикки называл Бааде ... в одной комнате»,] ИНТ-Гринштейн.
- 163 [(Сегодня мы знаем, ... примерно в 10 раз,) (Baade, 1952).
- 163 [Объединив знания Бааде ... 10 миллионов] Это число Бааде и Цвикки в том виде, в котором оно появилось в тезисах доклада, воспроизведенных на рис. 5.2 (Baade and Zwicky, 1934a), фраза «10 тысяч, а возможно, и в 10 миллионов» взята из их более развернутой статьи на ту же тему (Baade and Zwicky, 1934b). Их ошибка происходит из предположения, что когда сверхновая находится в самой яркой стадии, окружность ее горячего, излучающего газа находится в пределах от 1 до 100 солнечной. Фактически, окружность получается гораздо больше, и если следовать их аргументам, это приводит к гораздо меньшему ультрафиолетовому и рентгеновскому излучению.
- 167 [Нейтрон появился ... полагал, что в энергию взрыва.] В этом разделе и во всей главе 5 я связываю с Цвикки концепцию нейтронных звезд и ее следствия для сверхновых и космических лучей, хотя опубликована идея была в совместной публикации с Бааде. Отдавая Цвикки приоритет за изобретение идеи (а Бааде за ключевое понимание наблюдательных данных), я полагаюсь на свои умозаключения, сделанные на основе информации, полученной в ходе обсуждений с их научными коллегами: ИНТ-Эгген, ИНТ-Фоулер, ИНТ-Гринштейн, ИНТ-Сандаж.

- 170 Рис. 5.2: (Baade and Zwicky, 1934a). Некоторые обоснования чисел, содержащихся в тезисах, см. в более развернутой презентации (Baade and Zwicky, 1934b).
- 175 [Публикация Ландау ... криком о помощи:] Эта интерпретация публикации Ландау была мне разъяснена ближайшим его другом всей жизни Евгением Михайловичем Лифшицем (ИНТ-Лифшиц).
- 176 [Проходивший стажировку ... «Я живо помню ... одобрение»] Цитируется по (Livanova, 1980).
- 176 [«Все хорошенькие девушки ... что остались»,] Цитируется по (Livanova, 1980).
- 177 [Георгий Гамов, ... «Русская наука ... капиталистических стран».] (Gamow, 1970).
- 177–178 [В 1936 г. Сталин, ... полностью разгромлены.] Статистика репрессированных и убитых при Сталине несколько неопределенна. (Medvedev, 1978) дает числа, которые были, вероятно, наиболее надежными из доступных в 1970-х. Однако в конце 1980-х с наступлением гласности стал возможным более широкий доступ к информации, что привело к росту всех чисел. Числа, которые я цитирую, являются обобщенной оценкой, сделанной моими русскими друзьями, которые попробовали углубиться в этот вопрос в свете появившихся в эпоху гласности откровений.
- 178–179 [Артур Эддингтон ... *термоядерным синтезом*.] См. главу 11 книги (Eddington, 1926) и ссылки оттуда.
- 181 [В действительности в 1931 г. Ландау ... могут нарушаться.] (Landau, 1932).
- 181 [В конце 1937 г. Ландау написал работу,] Работа Ландау была напечатана (Landau, 1938). Хотя это и не было известно Ландау, ту же идею уже опубликовал к тому времени его близкий друг Георгий Гамов (Gamow, 1937). Гамов покинул СССР в 1933 г., вскоре после того, как опустился сталинский железный занавес (см. Gamow, 1970), но перед этим он был знаком с донейтронной идеей Ландау о поддержании жара звезд за счет плотного центрального ядра. После открытия нейтрона было естественно, что Гамов и Ландау (более не общающиеся друг с другом) независимо проинтерпретируют ядро 1931 г. как нейтронное ядро.
- 181–182 [Вместе с рукописью Ландау послал Бору ... «Новая идея ... Бор».] Ближайший личный друг Ландау Евгений Михайлович Лифшиц обратил мое внимание на эту переписку в 1982 г. (ИНТ-Лифшиц) и объяснил мне то, что за этим стояло, так как я здесь изложил. После смерти Лифшица была опубликована вся переписка, включая письма Капицы Молотову, Сталину и Берии, которые, в конце концов, привели к освобождению Ландау из тюрьмы (Халатников, 1988).
- 183 [хотя в случае с Ландау причина стала известна, ... архивов КГБ.] (Gorelik, 1991).
- 183 [Ландау повезло ... (Явление сверхтекучести было открыто ... мощь советской науки.)] См. примечание к с. 181–182.

- 184 [«Ну хорошо, Роберт, ... я не понял ни слова!»] Цитата по (Royal, 1969).
- 184–186 [«Оппи ... двадцать пять долларов в месяц».] (Serber, 1969).
- 187 [(Однако с позиций начала 1990-х ... может работать.)] Эти гигантские звезды, как предполагается, могут образовываться в двойных звездных системах, когда одна звезда схлопывается с образованием нейтронной звезды, а другая гораздо позднее постепенно наматывается на ядро своего компаньона и так и остается снаружи. Эти экзотические объекты стали называть звездами «Торна–Житковой», поскольку Анна Житкова и я первыми в деталях рассчитали их структуру. См. (Thorne and Żytkow, 1977; Cannon et al., 1992).
- 187–188 [Потому 1 сентября 1938 г. ... «Оценки Ландау ... массой Солнца».] (Oppenheimer and Serber, 1938).
- 189 [В 1990-х годах ... 3 солнечными массами.] (Shapiro and Teukolsky, 1983; Hartle and Sabbadini, 1977).
- 189–192 Врезка 5.4: Описание в этой врезке шагов, которые были сделаны в процессе исследования, является во многом моим информированным предположением, основанным на интервью с Волковым (ИНТ-Волков), архивах Толмана (Tolman, 1948) и публикациях участников (Oppenheimer and Volkoff, 1939; Tolman, 1939).
- 192 [19 октября, ... большим количеством формул.] Переписка между Толманом и Оппенгеймером сохранена в (Tolman, 1948).
- 192 [«Я помню восторг ... свои вычисления».] ИНТ-Волков.
- 192 [В пределах диапазона ... несколькими солнечными массами.] Этот вывод был опубликован в (Oppenheimer and Volkoff, 1939). Анализ Толмана, на котором основывали свои оценки ядерных сил Оппенгеймер и Волков, опубликован в (Tolman, 1939).
- 194 [В марте 1956 г. Уилер ... Оппенгеймера и Волкова.] Том 4, с.33–40 (Уилер, 1988).
- 194–195 [Уилер был прекрасно подготовлен ... водородную бомбу.] Детальное описание предыдущего опыта и работ Уилера см. в (Wheeler, 1979; Thorne and Zurek, 1986).
- 196–198 Врезка 5.5: Это уравнение состояния (плод труда Гаррисона и Уилера) было опубликовано в работе (Harrison, Wakano, and Wheeler, 1958) и подробнее в (Harrison, Thorne, Wakano, and Wheeler, 1965). Более поздняя сплошная кривая для плотностей околоядерных (10^{14} грамм на кубический сантиметр) и выше является приближением на основе различных уравнений состояний, содержащихся в обзоре (Shapiro and Teukolsky, 1983).
- 199 Рис. 5.5: По (Harrison, Wakano, and Wheeler, 1958) и (Harrison, Thorne, Wakano, and Wheeler, 1965). Сплошная кривая является приближением на основе различных современных компьютерных вычислений, рассмотренных в обзоре (Shapiro and Teukolsky, 1983).

- 203 [Таким образом, его совместная статья с Волковым ... «О массивных нейтронных ядрах».] (Oppenheimer and Volkoff, 1939).
- 203 [Плод его усилий ... «О теории и наблюдении сильно сколлапсировавших звезд».] (Zwicky, 1939).
- 205 [Айседор И. Раби, ... «...мне кажется, ... со своими учениками».] (Rabi et al., 1969).

Глава 6

Общее замечание к главе 6. Рассказ об исторических событиях, затронутых в этой главе, основан на: 1) моих интервью с участниками описываемых событий, их коллегами и друзьями (ИНТ-Брагинский, ИНТ-Финкельштейн, ИНТ-Фоулер, ИНТ-Гинзбург, ИНТ-Гаррисон, ИНТ-Лифшиц, ИНТ-Мизнер, ИНТ-Сербер, ИНТ-Уилер, ИНТ-Зельдович); 2) моем собственном участии в части событий; 3) моем знакомстве с научными статьями, написанными участниками; 4) описаниях американского ядерного проекта (Bethe, 1982; Rhodes, 1986; Teller, 1955; York, 1976); 5) описаниях советского ядерного проекта и других событий в СССР (Golovin, 1973; Medvedev, 1978; Ritus, 1990; Romanov, 1990; Sakharov, 1990); 6) рабочих журналах Джона Уилера (Wheeler, 1988).

- 206–208 [Это случилось поздним утром в четверг 10 июня 1958 г. ... «Трудно поверить ... удовлетворительным ответом».] Печатная версия лекции Уилера и обмен комментариями между Уиллером и Оппенгеймером опубликован в (Solvay, 1958).
- 207 [«кажется, не уйти от заключения ... массу [до двух солнечных],» Эта цитата является парафразом из (Harrison, Wakano, and Wheeler, 1958) с минимальными изменениями в деталях, сделанными для согласования с терминологией, принятой в этой книге.
- 209 [«Хартланд плевал ... либеральной политики».] ИНТ-Сербер.
- 209 [«Оппи был чрезвычайно культурным человеком ... самым независимым».] ИНТ-Фоулер.
- 209 [«Хартланд был более талантлив ... делали остальные».] ИНТ-Сербер.
- 209 [Прежде чем погрузиться ... обзор проблемы.] Здесь я только предполагаю. Я точно не знаю, действительно ли такое быстрое обозрение было сделано, но, основываясь на моем понимании принципов работы Оппенгеймера и на содержании статьи, написанной по окончании работы (Oppenheimer and Snyder, 1939), я сильно подозреваю, что так оно и было.
- 214 [Анализируя эти формулы, ... на ее поверхности.] Оппенгеймер и Снайдер опубликовали эти результаты своих исследований в (Oppenheimer and Snyder, 1939).

ПРИМЕЧАНИЯ

- 216 [В Калтехе, например, ... не слишком убедило.] ИНТ-Фоулер.
- 216 [Здесь Лев Ландау, ... чрезвычайно трудно принять.] ИНТ-Лифшиц.
- 217 [«Как личности они ... Я выбрал Брейта».] (Уилер, 1979). Эта ссылка является автобиографическим свидетельством Уилера о его исследованиях в ядерной физике.
- 218 [Уилер и Бор в Принстоне ... Статья Бора–Уилера ... *Physical Review*.] (Bohr and Wheeler, 1939; Wheeler, 1979). Бор и Уилер явно не называют в своей статье плутоний-239, но Луис А. Тёрнер определил непосредственно из рис. 4 в этой работе, что это ядро является идеальным для поддержки ядерных реакций, и в знаменитом секретном меморандуме предложил использовать его в качестве топлива для атомной бомбы (Wheeler, 1985).
- 220 [Зельдович вместе с близким другом ... для сведения ученых всего мира.] ИНТ-Зельдович, Зельдович и Харитон (1939).
- 220 [Уилер был ведущим ученым ... бомбы Нагасаки.] Некоторые детали ключевой роли Уилера, см. на с. 2–5 (Klauder, 1972).
- 220–221 [«Если атомные бомбы ... Лос-Аламос и Хиросиму».] Из речи Оппенгеймера в Лос-Аламосе, Нью-Мексико, 16 октября 1945, см. с.172 (Goodchild, 1980).
- 221 [«Остается тяжелое чувство ... не могут утратить».] с.174 (Goodchili, 1980).
- 221 [«Обращаясь назад ... 6 августа 1943 г».] (Wheeler, 1979).
- 222–223 [Пока неумолимо разворачивались ... американской разработки.] Эти подробности были раскрыты Харитоном в его лекции в Москве, о которой сообщила газета «Нью-Йорк Таймс» в выпуске от четверга 14 января 1993 г., с. А5.
- 223 [скопления отходов ... окраины страны] (Medvedev, 1979).
- 224 [«Мы основываем наши рекомендации ... геноцида».] Доклад генерального консультативного комитета Комиссии США по атомной энергии от 30 октября 1949 г. Воспроизведен в (York, 1976).
- 224 [«девять из десяти ... печатью гения».] (Bethe, 1982).
- 225 [Как вспоминает Уилер, «... это был ... каждый день».] ИНТ-Уилер.
- 225 [Уилер вспоминает: «Когда я начал ... к проекту».] ИНТ-Уилер.
- 225 [«Наша программа в 1949 г. ... бомбу».] (USAEC, 1984, с. 251).
- 226 [«Мне сообщили ... термоядерных устройств».] ИНТ-Уилер.
- 227 [Весной 1948 г., за 15 месяцев до испытания] Есть некоторые разногласия относительно даты начала работы над советской водородной бомбой. Сахаров (1990) утверждает, что это было весной 1948 г., а Гинзбург (1990), что в 1947 г.
- 227 [В июне 1948 г. ... вторая группа для разработки супербомбы.] Эта дата приводится Сахаровым (1990); Гинзбург (1990) пишет о 1947 г.

- 227 Сноска 3: Рассуждения Сахарова даны по книге (Sakharov, 1990). Зельдович утверждал это в разговоре с одним из своих русских друзей, который передал это мне.
- 227 [«Наша работа — лизать Зельдовичу задницу».] В таком виде высказывание было передано мне Виталием Гинзбургом, который при этом присутствовал, Сахаров тоже при сем присутствовал, и в англоязычной версии его воспоминаний (Sakharov, 1990) высказывание приведено в форме: «Наша работа — целовать Зельдовичу задницу». О моих взглядах на сложные взаимоотношения между Зельдовичем и Сахаровым см. (Thorne, 1991).
- 227 [«эта сука, Зельдович»,] Об этом высказывании Ландау сообщали мне независимо многие советские физики-теоретики.
- 227 [Сахаров предложил ... дейтерид лития (LiD).] (Romanov, 1990).
- 229 [оно было в 800 раз мощнее ... в Хиросиме.] Числа, которые я цитирую для энергий взрывов различных бомб, взяты мной из (York, 1976).
- 229 [«Я нахожусь под влиянием ... его человечности».] (Sakharov, 1990).
- 230 [В марте 1954 г. Сахаров ... идеи Теллера–Улама.] (Romanov, 1990; Sakharov, 1990). В статье в честь Сахарова Романов приписывает открытие одновременно Сахарову и Зельдовичу. Сахаров пишет: «Некоторые у нас в теоретических отделах пришли [к этой идее] почти в одно время», но по книге остается впечатление, что ему принадлежит больший приоритет, однако он все же говорит, что «Зельдович, Юрий Трунов и другие, безусловно, внесли существенный вклад».
- 232–233 [«В огромном числе случаев ... не доверять ему».] (USAEC, 1954).
- 233 [Теллер «имел мужество ... заслуживают признательности»,] Дж. А. Уилер, телефонный разговор с К.С.Торном в июле 1991 г.
- 233 [С этим согласился ... Андрей Сахаров.] (Sakharov, 1990).
- 236 [В Ливерморе ... с образованием черной дыры.] Мотивацией для этих исследований, как отмечается в (Colgate and Johnson, 1960), послужил поиск понимания сверхновых и их роли в качестве источника космических лучей. Сначала было сделано моделирование образования сверхновой звезды малой массы с использованием ньютоновского, а не эйнштейновского описания гравитации (Colgate and White, 1963, 1966). Затем была смоделирована звезда большой массы, образующая черную дыру, с использованием общерелятивистского описания Эйнштейна (May and White, 1965, 1966).
- 238 [Чтобы детально разобраться в загадке ... почти идентичны американским.] (Imshennik and Nadezhin, 1964; Podurets, 1964).
- 241 [«Трудно смириться ... одновременно правильными»,] ИНТ-Лифшиц.
- 241 [В один из дней 1958 г., ... Дэвида Финкельштейна.] (Finkelstein, 1958).
- 242 Сноска 5: См., например, обсуждение во Врезке 31.1 и в главе 51 МТУ.

ПРИМЕЧАНИЯ

- 243 [Финкельштейн довольно случайно открыл ... схлопыванием звезд.] См. (Finkelstein, 1993).
- 243 [для статьи в *Scientific American*] (Thorne, 1967).
- 252 [В 1964 и 1965 гг. ... звездном схлопывании.] (Harrison, Thorne, Wakano, and Wheeler, 1965).
- 255 [Он опробовал его на конференции ... «Вследствие ... увеличивая ее гравитационное притяжение».] (Wheeler, 1968).

Глава 7

Общее замечание к главе 7. Рассказ об исторических событиях, затронутых в этой главе, основан: 1) на моем собственном участии в них; 2) на моих интервью с другими участниками (ИНТ-Картер, ИНТ-Чандрасекар, ИНТ-Детвейлер, ИНТ-Эрдли, ИНТ-Эллис, ИНТ-Герох, ИНТ-Гинзбург, ИНТ-Хартли, ИНТ-Ипсер, ИНТ-Израэль, ИНТ-Мизнер, ИНТ-Новиков, ИНТ-Пенроуз, ИНТ-Пресс, ИНТ-Прайс, ИНТ-Рис, ИНТ-Скьяма, ИНТ-Смарт, ИНТ-Тьюкольски, ИНТ-Уолд, ИНТ-Уилер, ИНТ-Зельдович); 3) на прочитанных мной научных статьях участников событий.

- 259–260 [«мало найдется случаев ... с квантовой физикой».] (Wheeler, 1964b).
- 264 [гипотеза об обруче:] Впервые я опубликовал эту гипотезу об обруче в специальном выпуске, посвященном Уилеру (Thorne, 1972) и во Врезке 32.3 МТУ.
- 266 [что схлопывание звезды ... текущим вспять временем.] Эта идея была названа Новиковым и Зельдовичем идеей *полузакрытой Вселенной*. В конце концов, они по отдельности опубликовали статьи с ее изложением: (Zel'dovich, 1962; Novikov, 1963).
- 267 [«Возможно, Вы *сейчас* не хотите ... но Вам потом *захочется*».] ИНТ-Новиков.
- 268 [«Яков Борисыч ... к следующему дню».] ИНТ-Новиков.
- 272–273 [Полный расчет коллапса ... вообще без магнитного поля.] Ключевые соображения и первые расчеты такого исследования были опубликованы Гинзбургом (1964); более полные и детальные расчеты сделаны Гинзбургом совместно с его молодым коллегой Леонидом Моисеевичем Озерным (1964).
- 273–274 [Дорошкевич, Новиков и Зельдович ... никаких выступов.] Результаты проведенного анализа и его выводы опубликованы в статье Дорошкевича, Зельдовича и Новикова (1965).
- 276 [В Лондоне Новиков прочел... ничего подобного!] Читатель может познакомиться с «духом» доклада Новикова в обзорных статьях Зельдовича и Новикова (1964, 1965).
- 276 [Печатная версия... на русском языке.] Дорошкевич, Зельдович и Новиков (1965); см. Примечание к с. 273–274.

- 277 [Первым был Вернер Израэль... станет ясно ниже.] Результаты его анализа опубликованы в работе (Israel, 1967).
- 279 [Он пришел на финиш третьим, после Новикова и Израэля.] (Novikov, 1969; de la Cruz, Chase, and Israel, 1970; Price, 1972).
- 281 [(Этот последний случай... и Тедом Чейзом,] (de la Cruz, Chase, and Israel, 1970).
- 281–282 [Поле теперь пронизывает не звезду, а горизонт событий,... а дыра становится незамагнитченной.] Более детально картина взаимодействия магнитных полей с черной дырой изображена на рис.10, 11 и 36 в книге (Thorne, Price, and Macdonald, 1986).
- 283 [Львиная доля... Мазур.] Обзор этой работы и соответствующие ссылки можно найти в книге Картера (1979) (раздел 6.7); окончательные результаты опубликованы в статье (Mazur, 1982) и содержатся также в диссертации (Bunting, 1983).
- 285 [Джон Грейвс и Дитер Брилл,... заряженную черную дыру.] См. (Graves and Brill, 1960), а также ссылки в этой статье.
- 288 [Рой Керр только что... вокруг вращающейся звезды.] (Kerr, 1963).
- 288–289 [В течение года он показал,... Ричардом Линдквистом,] (Carter, 1966; Boyer and Lindquist, 1967).
- 289 [Картер и другие исследователи ... в принципе могут существовать.] (Carter, 1979); см. также ссылки там.
- 289 [Картер, погрузившись в эту математику, ... должны быть эти свойства.] (Carter, 1968).
- 291 [Вернер Израэль показал ... разрешенный для нее максимум.] (Israel, 1986).
- 292 [В 1969 г. Роджер Пенроуз ... замечательное открытие.] (Penrose, 1969).
- 293 [Тедом Ньюманом... и Робертом Торренсом.] (Newman et al., 1965).
- 294 [Осенью 1971 г. Билл Пресс,... самой черной дыры.] (Press, 1971).
- 295 [Победителем стал... Саул Тьюкольски.] (Teukolsky, 1972).
- 295–296 [Тьюкольски с удовольствием вспоминает...«Иногда в математике подсказку... расположить нужные члены».] ИНТ-Тьюкольски.
- 296–297 [Сам Тьюкольски ... пульсации черной дыры стабильны, несмотря на скорость ее вращения.] (Press and Teukolsky, 1973).
- 297 [*Математическая теория черных дыр*] (Chandrasekhar, 1983b).

Глава 8

Общее замечание к главе 8. Рассказ об исторических событиях, затронутых в этой главе, основан на: 1) моем собственном опыте участника события; 2) моих интервью с участниками описываемых событий (ИНТ-Джаккони, ИНТ-Новиков, ИНТ-Рис, ИНТ-Ван-Аллен, ИНТ-Зельдович); 3) моем знакомстве с

ПРИМЕЧАНИЯ

- научными статьями, написанными участниками; 4) на ряде публикаций об описываемых событиях: (Friedman, 1972; Giacconi, and Gursky, 1974; Hirsh, 1979; Uhuru, 1981).
- 299 [«Такой объект ... другой звезде»] (Wheeler, 1964a).
- 299 [Если вы Зельдович ... схлопывания звезды.] Двадцать два года спустя, в 1988 г., Зельдович выразил мне сожаление, что он не проявлял интереса к тому, что происходит внутри черных дыр (ИНТ-Зельдович).
- 304 [Среди многих сотен ... кандидатов в черные дыры.] (Zel'dovich and Guseinov, 1965).
- 304–305 [Поискав непосредственно в каталогах ... восьми кандидатов в черные дыры.] (Trimble and Thorne, 1969).
- 305 [К счастью, его мозговой штурм ... Нью-Йорк.] (Salpeter, 1964; Zel'dovich, 1964).
- 306 [Зельдович и Новиков поняли ... падающего газа] (Novikov and Zel'dovich, 1966).
- 307 [«ракета в соответствии с расчетом ... испарилась».] (Friedman, 1972).
- 311 [Два месяца Джаккони ... *предсказывали астрофизики.*] (Giacconi, Gursky, Paolini, and Rossi, 1962).
- 317 [Примером такой подписи (предложенной в 1972 г. Рашидом Сюняевым, ... Зельдовича)] (Sunyaev, 1972).

Глава 9

Общее замечание к главе 9. Рассказ об исторических событиях, затронутых в этой главе, основан на: 1) моем собственном опыте периферийного их участника, начиная с 1962 г. и далее; 2) моих интервью с некоторыми участниками (ИНТ-Гинзбург, ИНТ-Гринштейн, ИНТ-Рис, ИНТ-Зельдович); 3) прочитанных мной научных статей участников событий и 4) следующих опубликованных и неопубликованных исторических свидетельствах: (Hey, 1973; Greenstein, 1982; Kellermann and Sheets, 1983; Struve and Zebergs, 1962, Sullivan, 1982, 1984).

- 322 [Космическое радиоволны ... в 1932 г. Карлом Янски.] (Jansky, 1932).
- 322–323 [Двумя исключениями ... было бы *невозможно.*] (Whipple and Greenstein, 1937).
- 323 [«Я ни разу не встретил ... ни одного астронома»,] ИНТ-Гринштейн.
- 323 [Профессиональные ученые ... (позывной W9GFZ).] Описание истории работы Ребера, сделанное им самим, см. в (Reber, 1958).
- 326 [В 1940 г., построив ... публикацию рукописи.] (Reber, 1940).
- 326 [Гринштейн описывает Ребера как «идеал американского изобретателя ... миллион долларов».] ИНТ-Гринштейн.
- 326 [«Университет ни цента ... независимым малым»,] ИНТ-Гринштейн.

- 329 [Первая критическая отметка ... должны лежать радиоисточники.] (Bolton, Stanley, and Slee, 1949).
- 331 [Когда Бааде проявил ... две сталкивающиеся друг с другом галактики] (Baade and Minkowski, 1954).
- 331 [Р.С.Дженнисон и М.К. Дас Гупта ... с двух сторон от «сталкивающихся галактик».] (Jennison and Das Gupta, 1953).
- 333 [Гринштейн организовал в Вашингтоне 5 и 6 января 1954 г. конференцию.] Труды этой конференции опубликованы (Washington, 1954).
- 335 [Ментальный барьер был взломан Маартеном Шмидтом,] (Schmidt, 1963).
- 335 [Гринштейн развернулся ... 37% световой.] (Greenstein, 1963).
- 336 [Харлан Смит ... чем один месяц.] (Smith, 1965).
- 338 [Развивая плодотворные идеи ... заполняющих межзвездное пространство] (Alfven and Herlofson, 1950; Kiepenheuer, 1950; Ginzburg, 1951). Описание истории этой работы см. (Ginzburg, 1984).
- 339 [Джеффри Бэрбидж ... со 100%-ной эффективностью.] (Burbidge, 1959).
- 340 [Для стимулирования диалога ... в Далласе, в Техасе,] Труды этой конференции опубликованы (Robinson, Schild, and Shucking, 1965).
- 341–342 [Поэтому, как только Керр начал свое выступление, ... пошло своим чередом.] Это описание приводится по моим личным впечатлениям от участия в той конференции.
- 342 [В 1971 г. это подсказало ... дает энергию квазарам.] (Rees, 1971).
- 343 [Малкольм Лонгэйр ... электромагнитных волн.] (Longair, Ryle, and Scheuer, 1973).
- 345 [Идея о том ... Эдвардом Салпетером и Яковом Борисовичем Зельдовичем в 1964 г.] (Salpeter, 1964; Zel'dovich, 1964).
- 345 [Более полное ... Дональдом Линден-Беллом.] (Lynden-Bell, 1969).
- 346 [Каким образом ... ответ в 1975 г.] (Bardeen and Petterson, 1975).
- 347 [Насколько сильным может быть завихрение ... близкую к максимальной.] (Bardeen, 1970).
- 348 [Во-первых, Блэндфорд и Рис поняли,] (Blandford and Rees, 1974).
- 348 [Во-вторых, ... показал Линден-Белл,] (Lynden-Bell, 1978).
- 348 [В-третьих, как представлялось Блэндфорду,] (Blandford, 1976).
- 349–350 [Четвертый способ ... процесс Блэндфорда–Знаека.] (Blandford and Znajek, 1977).
- 351 [Если квазары и радиогалактики черпают энергию от одного и того же механизма,] Более подробное обсуждение современного состояния по-

нимания квазаров, радиогалактик, струй и роли черных дыр с аккреционными дисками как источника их энергии см., например, (Begelman, Blandford, and Rees, 1984; Blandford, 1987).

- 354 [Свидетельства присутствия подобной черной дыры ... далеко не прочны.] См., например, (Phinney, 1989).

Глава 10

Общее замечание к главе 10. Рассказ об исторических событиях, затронутых в этой главе, основан на: 1) моих собственных впечатлениях как участника; 2) моих интервью с некоторыми участниками (ИНТ-Брагинский, ИНТ-Драйвер, ИНТ-Форвард, ИНТ-Гришук, ИНТ-Вебер, ИНТ-Вайс); 3) прочитанных мной научных статьях участников событий. Более технические обзоры по гравитационным волнам и усилий по их поиску см., например, (Blair, 1991; Thorne, 1987).

- 366 [Тогда же, когда Вебер опубликовал свое предложение.] (Weber, 1953).
- 367 [В конце 1957, ... широкой частью к приходящей волне] Плоды работы Вебера были опубликованы (Weber, 1960; 1961).
- 368 [Его единственной зацепкой ... близкую к критической.] Письмо Вебера ко мне, датированное 1 октября 1992 г.; Вебер тогда не опубликовал этот аргумент. Сотрудник Вебера Фримэн Дайсон был первым, кто показал, что природа, скорее всего, производит гравитационные волны вблизи частот, выбранных Вебером (Dyson, 1963).
- 369 [Однако в 1970-х ... в реальность.] Вебер объявил о наблюдении свидетельств гравитационных волн в работе (Weber, 1969). Последовавшая экспериментальная активность и споры о том, действительно ли были детектированы и описаны гравитационные волны, описана, например, в (de Sabbata and Weber, 1977) и в цитированных там статьях. Социологическое исследование споров см. (Collins, 1975; 1981).
- 370 [Нашими преподавателями были ... и другие.] Лекции, прочитанные на летней школе, включая лекцию Вебера, опубликованы (DeWitt and DeWitt, 1964).
- 371–372 [Во время нашей встречи в 1969 г. ... предельное ограничение.] Ранний вариант этого предупреждения Брагинского был опубликован (Braginsky, 1967).
- 373 [Однако в 1976 г., ... *принципом неопределенностей*.] Это более четкое предостережение было опубликовано в (Braginsky, 1977; Giffard, 1976), а его связь с принципом неопределенностей объяснена в (Thorne, Drever, Caves, Zimmermann, and Sandberg, 1978).
- 375 [Ответ был 10^{-21} .] См. некое изложение дискуссии во время конференции 1978 г. в (Epstein and Clark, 1979).
- 376 [Мы нашли ответ одновременно ... разными путями.] (Braginsky, Vorontsov, and Khalili, 1978; Thorne, Drever, Caves, Zimmermann, and Sandberg, 1978).

- 379 [В принципе существовала возможность расширить частотный диапазон] (Michelson and Taber, 1984).
- 384 [Использовать для детектирования гравитационных волн интерферометры ... лаборатории Хьюза.] (Gertsenshtein and Pustovoit, 1962; Weber, 1964; Weiss, 1972; Moss, Miller, and Forward, 1971).
- 384 [Драйвер добавил ... разработки.] См., например, (Drever, 1991) и ссылки там.
- 388 [Он перенаправил большую часть работы своей команды на другие направления, далекие от детектирования гравитационных волн.] См. (Braginsky and Khalili, 1992).
- 393 [Ключом к успеху наших усилий ... или *LIGO*.] Обзор планов LIGO см. (Abramovici et al., 1992). [Самую последнюю информацию можно найти на сайте <http://ligo.caltech.edu> — Прим. ред.]

Глава 11

Общее замечание к главе 11. Рассказ об исторических событиях, затронутых в этой главе, основан на: 1) моем собственном участии в них; 2) моих интервью с двумя другими участниками (ИНТ-Дамур, ИНТ-Уолд); 3) научных статьях, прочитанных мной; 4) курсе лекций Томаса Куна об основных концепциях и научных революциях, который я прослушал в Принстонском университете в 1965 г.

- 403 [*Структура научных революций*] (Kuhn, 1962).
- 405 [Такая свобода дает некоторую власть.] Ричард Фейнман, один из величайших физиков нашего столетия, прекрасно описал широкие возможности, которые открываются для тех, кто умело пользуется различными научными подходами, в своей книге «Характер физических законов» (Feynman, 1965). Однако он никогда не пользовался словом «парадигма»; подозреваю, что он никогда не читал работ Куна. Кун писал о том, как работают люди, подобные Фейнману; Фейнман же просто работал.
- 406 [Физиков не всегда удовлетворяет ... концепцию плоского пространства-времени.] Парадигма плоского пространства-времени была изобретена более или менее независимо сразу несколькими людьми; она известна как «теория поля для ОТО в формулировке плоского пространства-времени». Историю вопроса см. в книге МТУ: разделы 7.1 и 18.1; Дополнения 7.1, 17.2 и 18.1; Упражнение 7.3. Элегантное обобщение концепции и ее связь с парадигмой искривленного пространства-времени даны в работе (Grishchuk, Petrov, and Popova, 1984).
- 409 [В 1971 г. Ханни и Руффини ... Джеф Козн] (Kohen and Wald, 1971; Hanni and Ruffini, 1973).
- 410 [Спустя пять лет Роджер Блэндфорд ... энергию мощных струй] (Blandford and Znajek, 1977).
- 412 [В течение 1977 и 1978 гг. Знаек ... интересную интерпретацию:] (Znajek, 1978; Damour, 1978).

ПРИМЕЧАНИЯ

- 413 [*Черные дыры: мембранный подход.*] (Thorne, Price, and Macdonald, 1986).
См. также (Price and Thorne, 1988).

Глава 12

Общее замечание к главе 12. Рассказ об исторических событиях, затронутых в этой главе, основан на: 1) моем собственном участии в них; 2) моих интервью с другими участниками (ИНТ-де Витт, ИНТ-Эрдли, ИНТ-Хартли, ИНТ-Хокинг, ИНТ-Израэль, ИНТ-Пенроуз, ИНТ-Унру, ИНТ-Уолд, ИНТ-Уилер, ИНТ-Зельдович); 3) прочитанных мной научных статьях участников событий; 4) следующих опубликованных исторических свидетельствах: (Бекенштейн, 1980; Хокинг, 1988; Israel, 1987).

- 415 [Идея пришла ... так внезапно.] Это последовательное описание того, как Хокинг пришел к этой идее, я узнал от него из интервью с ним (ИНТ-Хокинг) и из (Hawking, 1988). Детали и следствия этой идеи, обозначенной в первом разделе этой главы, опубликованы в (Hawking, 1971b; 1972; 1973).
- 417 [Многие физики вслед за Роджером Пенроузом] (Penrose, 1965).
- 418–419 Врезка 12.1: (Hawking, 1972; 1973).
- 420 [Стивен Хокинг был не первым ... Вернер Израэль] ИНТ-Израэль, ИНТ-Пенроуз, ИНТ-Хокинг.
- 420 [в удивительном открытии Пенроуза, сделанном им в 1964 г. ... должна иметь в центре сингулярность] (Penrose, 1965).
- 421–422 Врезка 12.2: (Hawking, 1972; 1973).
- 422 [Хокинг и Джеймс Хартли ... других тел.] (Hawking and Hartle, 1972).
- 425–426 [Деметриос Кристодулу ... уравнения термодинамики.] (Christodoulou, 1970).
- 428 [Джекоба Бекенштейна это не убедило.] Этот эпизод и последующая полемика с Хокингом описаны в (Bekenstein, 1980). Гипотеза Бекенштейна по поводу энтропии черной дыры и его соображения в пользу этой гипотезы опубликованы в статьях (Bekenstein, 1972; 1973).
- 429–430 [В августе 1972 г., ... местечке Лезуш,] Труды летней школы 1972 г. в Лезуш опубликованы (DeWitt and DeWitt, 1973).
- 430 [К концу месяца Бардин, Картер и Хокинг ... законов механики черных дыр,] (Bardeen, Carter, and Hawking, 1975).
- 431 [Зельдович пригласил меня в Москву ...] Чарльз Мизнер и Джон Уилер сопровождали меня в поездке в Москву в июне 1971 г., но не присутствовали дома у Зельдовича во время дискуссии, описанной далее.
- 432 [Зельдович, с пляшущим огоньком в глазах, ...] Я восстановил эту беседу по памяти и передал ее менее научным языком, чем тот, которым мы пользовались.

- 437 [Зельдович, однако, не забыл. ... статья была опубликована.] (Zel'dovich, 1971).
- 437–438 [Однажды Старобинский рассказал о гипотезе Зельдовича ... действительно излучает.] (Zel'dovich and Starobinsky, 1971).
- 438 [Затем разорвалась бомба.] Хокинг описывает, как он пришел к ошеломляющему открытию об излучении черных дыр, в книге (Hawking, 1988). Само открытие и следствия из него опубликованы в (Hawking, 1974; 1975; 1976).
- 441 [Такое объединение и требование идеального согласования ... практически полностью.] См., например, (Wald, 1977).
- 441 Сноска 11: (Wald, 1977).
- 442 [Проще всего описать ... пользуясь корпускулярной, а не волновой картиной.] (Hawking, 1988).
- 446 [В течение следующих десяти лет мы постепенно пришли к новому пониманию, которое показано на рис. 12.3.] Глава 8 (Thorne, Price, and Macdonald, 1986) и ссылки там же.
- 447–448 Врезка 12.5: (Davies, 1975; Unruh, 1976; Unruh and Wald, 1982; 1984).
- 449 [Хокингом ... абстрактное доказательство.] (Gibbons and Hawking, 1977).
- 450 [В 1975 г. Дон Пейдж ... живет $1,2 \times 10^{70}$ лет.] (Page, 1976).
- 450 [Детальные расчеты, проведенные Хокингом, Зельдовичем, Новиковым и др. ... крошечные черные дыры] Например, (Hawking, 1971a; Novikov, Polnarev, Starobinsky, and Zel'dovich, 1979).
- 451 [Отсутствие избыточного гамма-излучения ... слишком мягким.] (Page and Hawking, 1975; Novikov, Polnarev, Starobinsky, and Zel'dovich, 1979).

Глава 13

Общее замечание к главе 13. Рассказ об исторических событиях, затронутых в этой главе, основан: 1) на моем собственном участии в них (хотя не как участника, а как наблюдателя); 2) на моих интервью с другими участниками (ИНТ-Белинский, ИНТ-де Витт, ИНТ-Герох, ИНТ-Халатников, ИНТ-Лифшиц, ИНТ-МакКалум, ИНТ-Мизнер, ИНТ-Пенроуз, ИНТ-Скьяма, ИНТ-Уилер); 3) на прочитанных мной научных статьях участников событий.

- 452 [Джон Арчибальд Уилер ... черной дыры.] (Harrison, Wakano, and Wheeler; 1958; Wheeler, 1960).
- 453 [Но и после того как Уилер принял ... стоит поохотиться.] (Wheeler, 1964a,b; Harrison, Thorne, Wakano, and Wheeler, 1965).
- 453 [Дж. Роберт Оппенгеймер и Хартланд Снайдер в 1939 г.] (Oppenheimer and Snyder, 1939).

ПРИМЕЧАНИЯ

- 453 [свойственный Оппенгеймеру научный консерватизм, его нежелание делать излишние предположения.] См. последние несколько страниц главы 5.
- 454 [Сингулярность, предсказанная в расчетах Оппенгеймера–Снайдера.] Под описанной здесь сингулярностью имеется в виду сингулярность в вакууме вне схлопывающейся звезды. Поскольку соответствующая область вакуума описывается решением уравнений Эйнштейна–Шварцшильда, эту сингулярность часто называют *сингулярностью в геометрии Шварцшильда*. Ее количественный анализ дан, например, в главе 32 МТУ.
- 455 Рис. 13.1: Там же.
- 456–457 [Одна группа ... законы общей теории относительности не действуют] (Wheeler, 1960; 1964a,b; Harrison, Thorne, Wakano, and Wheeler, 1965).
- 457 [Вторая группа ... нельзя доверять.] Эта точка зрения и расчеты, которые привели к ней Халатникова и Лифшица, были опубликованы (Lifshitz and Khalatnikov, 1960; 1963) и в книге Ландау и Лифшица (1962).
- 458 [Халатников и Лифшиц ... *малых возмущений*.] Там же.
- 459 [«Теория поля»] (Ландау и Лифшиц, 1962).
- 460 Рис. 13.4: студентам группы Уилера, в которой было сделано исследование Грейвса–Брилла (Graves and Brill, 1960), в начале 1960-х годов было очевидно, что должно существовать решение уравнений Эйнштейна типа того, которое изображено здесь. Однако из беседы с Пенроузом мне стало ясно, что исследователи в других группах не подозревали об этом до конца 1960-х годов. В явном виде получить такие решения было трудно, и мы в группе Уилера не пытались этого сделать. Первая публикация, посвященная этой идее, и первая попытка получить явное решение, насколько мне известно, содержится в статье Новикова (Novikov, 1966).
- 461 [Гансом Райсснером и Гуннаром Нордстремом ... Дитер Брилл и Джон Грейвс,] (Graves and Brill, 1960) и ссылки там же.
- 463 [Роджер Пенроуз вырос ... в Британии.] Последующий биографический очерк основан в основном на ИНТ-Пенроуз и ИНТ-Скьяма.
- 464 [Соблазн начался в 1952 г.] Там же.
- 465 [Однажды поздней осенью 1964 г. ...] ИНТ-Пенроуз, (Penrose, 1989).
- 466 [«Мы прервали ... переходили дорогу»,] (Penrose, 1989).
- 466 [он написал краткую статью в журнал *Physical Review Letters*,] (Penrose, 1965).
- 468 [Это так называемые *глобальные методы*.] Описание глобальных методов дано в классической книге (Hawking and Ellis, 1973).
- 468 [Хокинг и Пенроуз в 1970 г. доказали ... сингулярность.] (Hawking and Penrose, 1970).
- 470 [В конце 1950-х годов Лифшиц ... до 1976 г.] Из моих личных бесед с Лифшицем в 1970-х.

- 470 [Что касается Халатникова, то против него было два довода ... в Лондон.] Письмо Халатникова мне от 18 июня 1990 г.
- 470–471 [Халатников выступал ... Пенроуз, возможно, ошибается.] По моим собственным воспоминаний о докладе и событиях после него.
- 472 [«Пожалуйста, ... пошли в редакцию *Physical Review Letters*.] (Khalatnikov and Lifshitz, 1970). См. также (Belinsky, Khalatnikov, and Lifshitz, 1970, 1982).
- 473 [Я привез рукопись в Америку, спрятав ее среди своих личных бумаг ... опубликована.] Там же.
- 474 [Уровень советской теоретической физики ... значительные открытия в физике.] ИНТ-Лифшиц, (Livanova, 1980).
- 475 [Интересно, что задолго до того, ... Пименов.] Я узнал об этом от Пенроуза.
- 475 [В 1950–1959 гг. Александров ... установлены.] (Aleksandrov, 1955, 1959).
- 475 [продолжил его молодой коллега, Пименов.] (Pimenov, 1968).
- 477 [В частности, Халатников и Лифшиц ... *неустойчиво по отношению к малым возмущениям*.] (Lifshitz and Khalatnikov, 1960, 1963).
- 478 [Райсснер и Нордстрем ... большую вселенную.] См., например, (Novikov, 1966).
- 478 [Он стимулировал не только воображение ученых ... в многочисленных расчетах.] Говоря научным языком, неустойчивым является *внутренний горизонт Коши* в решении Райсснера–Нордстрема. Формулировку гипотезы см. в книге (Penrose, 1968); доказательство содержится в статье (Chandrasekhar and Hartle, 1982) и в более ранних работах, процитированных в этой статье.
- 478 [Белинский, Халатников и Лифшиц ... (БХЛ — сокращенное название ... дыры).] (Belinsky, Khalatnikov, and Lifshitz, 1970, 1982).
- 480 [Чарльз Мизнер ... *миксерными осцилляциями*.] (Misner, 1969).
- 481 [Когда же именно квантовая гравитация ... быстрее.] Впервые об этом сказал Уилер (Wheeler, 1960). Идея пришла к нему на основе его прежних работ о вакуумных флуктуациях геометрии пространства-времени (Wheeler, 1955, 1957).
- 481 Сноска 2: *Время Планка–Уилера* было введено с обсуждением его физического смысла в работах (Wheeler, 1955; 1957).
- 481 [Затем квантовая гравитация радикально ... вероятностную пену.] Впервые эта идея была высказана Уилером (Wheeler, 1960). Впоследствии она приобрела математическую форму и была выражена с помощью так называемого «уравнения Уилера–де Витта». См., например, обсуждение в книге (Hawking, 1987).
- 482 [Джон Уилер первым ввел понятие *квантовой пены*] (Wheeler, 1957; 1960).

ПРИМЕЧАНИЯ

- 483 [Ясный ответ ... де Виттом.] См., например, (Hawking, 1987; 1988).
- 483 [Приливные силы ... и постепенно исчезают.] Дорошкевич и Новиков (1978) показали, что сингулярность стареет. В работах (Poisson and Israel, 1990; Ori, 1991) рассмотрена детальная картина этого изменения с помощью идеализированных моделей; в (Ori, 1992) показано, что эти модели хорошо описывают поведение сингулярности в реальной черной дыре.
- 485 [В соответствии с этими расчетами, ... голые сингулярности.] Детали этого моделирования можно найти в работе (Shapiro and Teukolsky, 1991).
- 486–487 [Всего через четыре месяца ... крошечная голая сингулярность.] Свидетельства Хокинга было опубликовано в (Hawking, 1992a).

Глава 14

Общее замечание к главе 14. Рассказ об исторических событиях в этой главе основан почти полностью на моем собственном участии в них.

- 490 [Червоточины — это не просто плод воображения ... в 1916 г.] Людвиг Фламм (Ludwig Flamm, 1916) показал, что при соответствующем выборе топологии решение уравнения Эйнштейна, предложенное Шварцшильдом (Schwarzschild, 1916a), описывает пустую сферическую червоточину.
- 492 Рис. 14.2: (Kruskal, 1960).
- 495 [Мы писали медленно ... *American Journal of Physics*,] (Morris and Thorne, 1988).
- 496 [(основная тема книги Хокинга и Эллиса)] (Hawking and Ellis, 1973).
- 496 [Но 1974-й год ... *вакуумные флуктуации возле горизонта событий черной дыры являются экзотическими*.] Это был косвенный вывод, сделанный Хокингом из его открытия о том, что черные дыры должны испаряться. Доказательство было получено шесть лет спустя (Candelas, 1980).
- 497 [Ответ ... делает их экзотическими.] См. (Wald and Yurtsever, 1991) и другие цитируемые там ссылки.
- 500 [В 1955 г. Джон Уилер ... превращается в квантовую пену,] (Wheeler, 1955; 1957; 1960).
- 502 [В 1966 г. Роберт Герох ... назад во времени,] (Geroch, 1967). В работе (Friedman, Papastamatiou, Parker, and Zhang, 1988) приведен конкретный пример создания червоточины по плану, предложенному теоремой Героха.
- 504 Сноска 8: (van Stockum, 1937; Gödel, 1949; Tipler, 1976).
- 513 [Наша статья была напечатана,] (Morris, Thorne, and Yurtsever, 1988).
- 514 [и мы высказали эту гипотезу в нашей статье.] (Morris, Thorne, and Yurtsever, 1988).
- 515 Сноска 12: (Friedman and Morris, 1991).

- 516–517 [Фернандо Эчеверрия и Гуннар Клинкхаммер ... есть *две* такие траектории.] (Echeverria, Klinkhammer, and Thorne, 1991).
- 518–519 Врезка 14.2: (Echeverria, Klinkhammer, and Thorne, 1991).
- 519 [Через несколько месяцев Роберт Форвард ... нашел третью траекторию.] (Forward, 1992).
- 521 [Будут и сюрпризы ... сверхъестественного и парадоксального не ожидается.] Подробная и научно обоснованная дискуссия по поводу возникновения парадоксов в связи с машинами времени и червоточинами содержится в статье (Friedman et al., 1990).
- 521 [Журнал «Калифорния» ... на горе Паломар.] (Hall, 1989).
- 522 [За несколько лет до этого Хискок и Дебора Конковски ... сильно помогли.] (Hiscock and Konkowski, 1982).
- 524 [аналогичные вычисления Валерия Фролова ... наши результаты.] (Frolov, 1991).
- 526 [мы смогли внести изменения ... до ее публикации.] (Kim and Thorne, 1991).
- 526 [*гипотезы о защите хронологии.*] (Hawking, 1992b).
- 526 Сноска 14: (Gott, 1991).
- 526 [У меня *нет* ни малейшего желания ... законы квантовой гравитации.] Более подробно о причинах скептицизма, овладевшего мною в 1993 г. по поводу машин времени и об исследованиях, связанных с машинами времени, рассказано в книге (Thorne, 1993).

БИБЛИОГРАФИЯ

ЗАПИСАННЫЕ ИНТЕРВЬЮ

- Байм, Гордон.* 5 сентября 1985 г., Шампань/Урбана, Иллинойс.
- Белинский, Владимир.* 27 марта 1986 г., Москва, СССР.
- Брагинский, Владимир Борисович.* 20 декабря 1982 г., Москва, СССР; 27 марта 1986 г., Москва, СССР.
- Вайсс, Райнер.* 7 июля 1985 г., Падова, Италия.
- Ван Аллен, Джеймс.* 29 апреля 1975 г., Гринбелт, Мэриленд.
- Вебер, Джозеф.* 20 июля 1982 г., Колледж-Парк, Мэриленд.
- Волков, Джордж.* 11 сентября 1985 г., Ванкувер, Британская Колумбия.
- Гаррисон, Б. Кент.* 5 сентября 1985 г., Прово, Юта.
- Герох, Роберт.* 2 апреля 1982 г., Чикаго, Иллинойс.
- Гинзбург, Виталий Лазаревич.* Декабрь 1982 г., Москва, СССР; 3 февраля 1989 г., Пасадена, Калифорния.
- Гринштейн, Джесси Л.* 9 августа 1985 г., Пасадена, Калифорния.
- Гришук, Леонид П.* 26 марта 1986 г., Москва, СССР.
- Дамур, Тибо.* 26 июля 1986 г., Каргезе, Корсика.
- Де Витт, Брюс.* Декабрь 1980 г., Балтимор, Мэриленд.
- Детвейлер, Стивен.* Декабрь 1980 г., Балтимор, Мэриленд.
- Джиаккони, Роберт.* 29 апреля 1983 г., Гринбелт, Мэриленд.
- Драйвер, Рональд В.П.* 21 июня 1982 г., Лезуш, Франция.
- Зельдович, Яков Борисович.* 17 декабря 1982 г., Москва, СССР; 22 и 27 марта 1986 г., Москва, СССР.
- Израэль, Вернер.* Июнь 1982 г., Лезуш, Франция.
- Инстер, Джеймс Р.* Декабрь 1980 г., Балтимор, Мэриленд.
- Картер, Брэндон.* 6 июля 1983 г., Падова, Италия.
- Лифшиц, Евгений Михайлович.* Декабрь 1982 г., Москва, СССР.
- МакКаллум, Малькольм.* 30 августа 1982 г., Санта-Барбара, Калифорния.
- Мизнер, Чарльз В.* 10 мая 1981 г., Пасадена, Калифорния.
- Новиков, Игорь Дмитриевич.* Декабрь 1982 г., Москва, СССР; 28 марта 1986 г., Москва, СССР.
- Пенроуз, Роджер.* 7 июля 1985 г., Падова, Италия.
- Пресс, Уильям Х.* Декабрь 1980 г., Балтимор, Мэриленд.
- Прайс, Ричард.* Декабрь 1980 г., Балтимор, Мэриленд.
- Рис, Мартин.* Декабрь 1980 г., Балтимор, Мэриленд.
- Сандаж, Аллан.* 15 сентября 1985 г., Балтимор, Мэриленд.
- Сиам, Деннис.* 8 июля 1985 г., Падова, Италия.
- Сербер, Роберт.* 5 августа 1985 г., Нью-Йорк.
- Смарт, Ларри.* Декабрь 1980 г., Балтимор, Мэриленд.
- Тьюкольски, Саул А.* 27 января 1985 г., Итака, Нью-Йорк.
- Уилер, Джон.* Декабрь 1980 г., Балтимор, Мэриленд.
- Унру, Уильям.* Декабрь 1980 г., Балтимор, Мэриленд.
- Уолд, Роберт М.* Декабрь 1980 г., Балтимор, Мэриленд; 2 апреля 1982 г., Чикаго, Иллинойс.
- Финкельштейн, Дэвид.* 8 июля 1983 г., Падова, Италия.
- Форвард, Роберт.* 31 август 1982 г., Оксфорд, Калифорния.
- Фоулер, Уильям А.* 6 августа 1985 г., Пасадена, Калифорния.
- Халатников, Исаак Маркович.* 27 марта 1986 г., Москва, СССР.
- Хартли, Джеймс Б.* Декабрь 1980 г., Балтимор, Мэриленд; 2 апреля 1982, Чикаго, Иллинойс.
- Хокинг, Стивен В.* Июль 1980 г., Кембридж, Англия (не записано).
- Чандрасекар, Субраманьян.* 3 апреля 1982 г., Чикаго, Иллинойс.
- Эгген, Олин.* 13 сентября 1985 г., Пасадена, Калифорния.
- Эллис, Джордж.* Декабрь 1980 г., Балтимор, Мэриленд.
- Эрдли, Дуг М.* Декабрь 1980 г., Балтимор, Мэриленд.

ССЫЛКИ

- Abramovici, A., Althouse, W. E., Drever, R. W. P., Gürsel, Y., Kawamura, S., Raab, F. J., Shoemaker, D., Sievers, L., Spero, R. E., Thorne, K. S., Vogt, R. E., Weiss, R., Whitcomb, S. E., and Zucker, M. E.* (1992). «LIGO: The Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory», *Science*, **256**, 325–335.
- Aleksandrov, A. D.* (1955). «The Space-Time of the Theory of Relativity», *Helvetica Physica Acta, Supplement*, **4**, 4.
- Aleksandrov, A. D.* (1959). «The Philosophical Implication and Significance of the Theory of Relativity», *Вопросы философии*, № 1, 67.
- Alfvén, H., and Herlofson, N.* (1950). «Cosmic Radiation and Radio Stars», *Physical Review*, **78**, 738.
- Anderson, W.* (1929). «Über die Grenzdichte der Materie und der Energie», *Zeitschrift für Physik*, **56**, 851.
- Baade, W.* (1952). «Report of the Commission on Extragalactic Nebulae», *Transactions of the International Astronomical Union*, **8**, 397.
- Baade, W., and Minkowski, R.* (1954). «Identification of the Radio Sources in Cassiopeia, Cygnus A, and Puppis», *Astrophysical Journal*, **119**, 206.
- Baade, W., and Zwicky, F.* (1934a). «Supernovae and Cosmic Rays», *Physical Review*, **45**, 138.
- Baade, W., and Zwicky, F.* (1934b). «On Super-Novae», *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **20**, 254.
- Bardeen, J. M.* (1970). «Kerr Metric Black Holes», *Nature*, **226**, 64.
- Bardeen, J. M., Carter, B., and Hawking, S. W.* (1973). «The Four Laws of Black Hole Mechanics», *Communications in Mathematical Physics*, **31**, 161.
- Bardeen, J. M., and Petterson, J. A.* (1975). «The Lense-Thirring Effect and Accretion Disks around Kerr Black Holes», *Astrophysical Journal (Letters)*, **195**, L65.
- Begelman, M. C., Blandford, R. D., and Rees, M. J.* (1984). «Theory of Extragalactic Radio Sources», *Reviews of Modern Physics*, **56**, 255.
- Bekenstein, J. D.* (1972). «Black Holes and the Second Law», *Lettere al Nuovo Cimento*, **4**, 737.
- Bekenstein, J. D.* (1973). «Black Holes and Entropy», *Physical Review D*, **7**, 2333.
- Bekenstein, J. D.* (1980). «Black Hole Thermodynamics», *Physics Today*, January 24.
- Belinsky, V. A., Khalatnikov, I. M., and Lifshitz, E. M.* (1970). «Oscillatory Approach to a Singular Point in the Relativistic Cosmology», *Advances in Physics*, **19**, 525.
- Belinsky, V. A., Khalatnikov, I. M., and Lifshitz, E. M.* (1982). «Solution of the Einstein Equations with a Time Singularity», *Advances in Physics*, **31**, 639.
- Bethe, H. A.* (1982). «Comments on the History of the H-Bomb» *Los Alamos Science*, Fall 1982, 43.
- Bethe, H. A.* (1990). «Sakharov's H-Bomb», *Bulletin of the Atomic Scientists*, October 1990. Reprinted in Drell and Kapitsa (1991), p. 149.
- Blair, D., ed.* (1991). *The Detection of Gravitational Waves* (Cambridge University Press, Cambridge, England).
- Blandford, R. D.* (1976). «Accretion Disc Electrodynamics – A Model for Double Radio Sources», *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **176**, 465.

БИБЛИОГРАФИЯ

- Blandford, R. D.** (1987). «Astrophysical Black Holes», in *300 Years of Gravitation*, edited by S. W. Hawking and W. Israel (Cambridge University Press, Cambridge, England), p. 277.
- Blandford, R. D., and Rees, M.** (1974). «A Twin-Exhaust Model for Double Radio Sources», *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **169**, 395.
- Blandford, R. D., and Znajek, R. L.** (1977). «Electromagnetic Extraction of Energy from Kerr Black Holes», *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **179**, 433.
- Bohr, N., and Wheeler, J. A.** (1939). «The Mechanism of Nuclear Fission», *Physical Review*, **56**, 426.
- Bolton, J. G., Stanley, G. J., and Slee, O. B.** (1949). «Positions of Three Discrete Sources of Galactic Radio-Frequency Radiation», *Nature*, **164**, 101.
- Boyer, R. H., and Lindquist, R. W.** (1967). «Maximal Analytic Extension of the Kerr Metric», *Journal of Mathematical Physics*, **8**, 265.
- Braginsky, V. B.** (1967). «Classical and Quantum Restrictions on the Detection of Weak Disturbances of a Macroscopic Oscillator», *Журнал экспериментальной и теоретической физики*, **53**, 1434. Английский перевод: *Soviet Physics — JETP*, **26**, 831 (1968).
- Braginsky, V. B.** (1977). «The Detection of Gravitational Waves and Quantum Nondisturbative Measurements», in *Topics in Theoretical and Experimental Gravitation Physics*, edited by V. de Sabbata and J. Weber (Plenum, London), p. 105.
- Braginsky, V. B., and Khalili, F. Ya.** (1992). *Quantum Measurements* (Cambridge University Press, Cambridge, England).
- Braginsky, V. B., Vorontsov, Yu. I., and Khalili, F. Ya.** (1978). «Optimal Quantum Measurements in Detectors of Gravitational Radiation», *Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики*, **27**, 296. Английский перевод: *JETP Letters*, **27**, 276 (1978).
- Braginsky, V. B., Vorontsov, Yu. I., and Thorne, K. S.** (1980). «Quantum Nondemolition Measurements», *Science*, **209**, 547.
- Brault, J. W.** (1962). «The Gravitational Redshift in the Solar Spectrum», unpublished doctoral dissertation, Princeton University; available from University Microfilms, Ann Arbor, Michigan.
- Brown, A. C., ed.** (1978). *DROPSHOT: The American Plan for World War III against Russia in 1957* (Dial Press/James Wade, New York).
- Bunting, G.** (1983). «Proof of the Uniqueness Conjecture for Black Holes», unpublished Ph. D. dissertation, Department of Mathematics, University of New England, Armidale, N.S.W. Australia.
- Burbidge, G. R.** (1959). «The Theoretical Explanation of Radio Emission», in *Paris Symposium on Radio Astronomy*, edited by R. N. Bracewell (Stanford University Press, Stanford, California).
- Candelas, P.** (1980). «Vacuum Polarization in Schwarzschild Spacetime», *Physical Review D*, **21**, 2185.
- Cannon, R. C., Eggleton, P. P., Żytkow, A. N., and Podsiadlowski, P.** (1992). «The Structure and Evolution of Thorne–Żytkow Objects», *Astrophysical Journal*, **386**, 206–214.
- Carter, B.** (1966). «Complete Analytic Extension of the Symmetry Axis of Kerr's Solution of Einstein's Equations», *Physical Review*, **141**, 1242.

- Carter, B.** (1968). «Global Structure of the Kerr Family of Gravitational Fields», *Physical Review*, **174**, 1559.
- Carter, B.** (1979). «The General Theory of the Mechanical, Electromagnetic and Thermodynamic Properties of Black Holes», in *General Relativity: An Einstein Centenary Survey*, edited by S. W. Hawking and W. Israel (Cambridge University Press, Cambridge, England), p. 294.
- Caves, C. M., Thorne, K. S., Drever, R. W. P., Sandberg, V. D., and Zimmermann, M.** (1980). «On the Measurement of a Weak Classical Force Coupled to a Quantum-Mechanical Oscillator. I. Issues of Principle», *Reviews of Modern Physics*, **52**, 341.
- Chandrasekhar, S.** (1931). «The Maximum Mass of Ideal White Dwarfs», *Astrophysical Journal*, **74**, 81.
- Chandrasekhar, S.** (1935). «The Highly Collapsed Configurations of a Stellar Mass (Second Paper)», *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **95**, 207.
- Chandrasekhar, S.** (1983a). *Eddington The Most Distinguished Astrophysicist of His Time* (Cambridge University Press, Cambridge, England).
- Chandrasekhar, S.** (1983b). *The Mathematical Theory of Black Holes* (Oxford University Press, New York).
- Chandrasekhar, S.** (1989). *Selected Papers of S. Chandrasekhar. Volume I: Stellar Structure and Stellar Atmospheres* (University of Chicago Press, Chicago).
- Chandrasekhar, S., and Hartle, J. M.** (1982). «On Crossing the Cauchy Horizon of a Reissner-Nordström Black Hole», *Proceedings of the Royal Society of London*, **A384**, 301.
- Christodoulou, D.** (1970). «Reversible and Irreversible Transformations in Black-Hole Physics», *Physical Review Letters*, **25**, 1596.
- Clark, R. W.** (1971). *Einstein: The Life and Times* (World Publishing Co., New York).
- Cohen, J. M., and Wald, R. M.** (1971). «Point Charge in the Vicinity of a Schwarzschild Black Hole», *Journal of Mathematical Physics*, **12**, 1845.
- Colgate, S. A., and Johnson, M. H.** (1960). «Hydrodynamic Origin of Cosmic Rays», *Physical Review Letters*, **5**, 235.
- Colgate, S. A., and White, R. H.** (1963). «Dynamics of a Supernova Explosion», *Bulletin of the American Physical Society*, **8**, 306.
- Colgate, S. A., and White, R. H.** (1966). «The Hydrodynamic Behavior of Supernova Explosions», *Astrophysical Journal*, **143**, 626.
- Collins, H. M.** (1975). «The Seven Sexes: A Study in the Sociology of a Phenomenon, or the Replication of Experiments in Physics», *Sociology*, **9**, 205.
- Collins, H. M.** (1981). «Son of Seven Sexes: The Social Destruction of a Physical Phenomenon», *Social Studies of Science* (SAGE, London and Beverly Hills), **11**, 33.
- Damour, T.** (1978). «Black-Hole Eddy Currents», *Physical Review D*, **18**, 3598.
- Davies, P. C. W.** (1975). «Scalar Particle Production in Schwarzschild and Rindler Metrics», *Journal of Physics A*, **8**, 609.
- de la Cruz, V., Chase, J. E., and Israel, W.** (1970). «Gravitational Collapse with Asymmetries», *Physical Review Letters*, **24**, 423.
- de Sabbata, V., and Weber, J., eds.** (1977). *Topics in Theoretical and Experimental Gravitation Physics* (Plenum, New York).
- DeWitt, C., and DeWitt, B. S., eds.** (1964). *Relativity, Groups, and Topology* (Gordon and Breach, New York).

БИБЛИОГРАФИЯ

- DeWitt, C., and DeWitt, B. S.*, eds. (1973). *Black Holes* (Gordon and Breach, New York).
- Doroshkevich, A. D., and Novikov, I. D.* (1978). «Space-Time and Physical Fields in Black Holes», *Zhurnal Eksperimentalnoi i Teoreticheskoi Fiziki*, **74**, 3. Английский перевод: *Soviet Physics — JETP*, **47**, 1 (1978).
- Doroshkevich, A. D., Zel'dovich, Ya. B., and Novikov, I. D.* (1965). «Gravitational Collapse of Nonsymmetric and Rotating Masses», *Журнал экспериментальной и теоретической физики*, **49**, 170. Английский перевод: *Soviet Physics — JETP*, **22**, 122 (1966).
- Drell, S., and Kapitsa, S.*, eds. (1991). *Sakharov Remembered: A Tribute by Friends and Colleagues* (American Institute of Physics, New York).
- Drever, R. W. P.* (1991). «Fabry—Perot Cavity Gravity-Wave Detectors», in *The Detection of Gravitational Waves*, edited by D. Blair (Cambridge University Press, Cambridge, England), p. 306.
- Dyson, F. J.* (1963). «Gravitational Machines», in *The Search for Extraterrestrial Life*, edited by A. G. W. Cameron (W. A. Benjamin, New York), p. 115.
- Echeverria, F., Klinkhammer, G., and Thorne, K. S.* (1991). «Billiard Balls in Worm-hole Spacetimes with Closed Timelike Curves. I. Classical Theory», *Physical Review D*, **44**, 1077.
- ECP-1: *Einstein, A.* (1987). *The Collected Papers of Albert Einstein*. Volume 1: *The Early Years, 1879-1902*, edited by John Stachel (Princeton University Press, Princeton, New Jersey). English translation by Anna Beck in a companion volume of the same title.
- ECP-2: *Einstein, A.* (1989). *The Collected Papers of Albert Einstein*. Volume 2: *The Swiss Years: Writings, 1900-1909*, edited by John Stachel (Princeton University Press, Princeton, New Jersey). English translation by Anna Beck in a companion volume of the same title.
- Eddington, A. S.* (1926). *The Internal Constitution of the Stars* (Cambridge University Press, Cambridge, England).
- Eddington, A. S.* (1935a). «Relativistic Degeneracy», *Observatory*, **58**, 37.
- Eddington, A. S.* (1935b). «On Relativistic Degeneracy», *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **95**, 194.
- Einstein, A.* (1911). «On the Influence of Gravity on the Propagation of Light», *Annalen der Physik*, **35**, 898.
- Einstein, A.* (1915). «The Field Equations for Gravitation», *Sitzungsberichte der Deutschen Akademie der Wissenschaften zu Berlin, Klasse für Mathematik, Physik, und Technik*, **1915**, 844.
- Einstein, A.* (1939). «On a Stationary System with Spherical Symmetry Consisting of Many Gravitating Masses», *Annals of Mathematics*, **40**, 922.
- Einstein, A.* (1949). «Autobiographical Notes», in *Albert Einstein: Philosopher-Scientist*, edited by Paul A. Schilpp (Library of Living Philosophers, Evanston, Illinois).
- Einstein, A., and Marie, M.* (1992). *Albert Einstein/Mileva Marié: The Love Letters*, edited by Jtirgen Renn and Robert Schulman (Princeton University Press, Princeton, New Jersey).
- Eisenstaedt, J.* (1982). «Histoire et Singularités de la Solution de Schwarzschild», *Archive for History of Exact Sciences*, **27**, 157.
- Eisenstaedt, J.* (1991). «De l'Influence de la Gravitation sur la Propagation de la Lumière en Théorie Newtonienne. L'Archéologie des Trous Noirs», *Archive for History of Exact Sciences*, **42**, 315.

- Epstein, R., and Clark, J. P. A.* (1979). «Discussion Session II: Sources of Gravitational Radiation», in *Sources of Gravitational Radiation*, edited by L. Smarr (Cambridge University Press, Cambridge, England), p. 477.
- Feynman, R. P.* (1965). *The Character of Physical Law* (British Broadcasting Corporation, London; paperback edition: MIT Press, Cambridge, Massachusetts).
- Finkelstein, D.* (1958). «Past-Future Asymmetry of the Gravitational Field of a Point Particle», *Physical Review*, **110**, 965.
- Finkelstein, D.* (1993). «Misner, Kinks, and Black Holes», in *Directions in General Relativity. Volume 1: Papers in Honor of Charles Misner*, edited by B. L. Hu, M. P. Ryan Jr., and C. V. Vishveshwara (Cambridge University Press, Cambridge, England), p. 99.
- Flamm, L.* (1916). «Beitrage zur Einsteinschen Gravitationstheorie», *Physik Zeitschrift*, **17**, 448.
- Forward, R. L.* (1992). *Timemaster* (Tor Books, New York).
- Fowler, R. H.* (1926). «On Dense Matter», *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **87**, 114.
- Frank, P.* (1947). *Einstein: His Life and Times* (Alfred A. Knopf, New York).
- Friedman, H.* (1972). «Rocket Astronomy», *Annals of the New York Academy of Sciences*, **198**, 267.
- Friedman, J., and Morris, M. S.* (1991). «The Cauchy Problem for the Scalar Wave Equation Is Well Defined on a Class of Spacetimes with Closed Timelike Curves», *Physical Review Letters*, **66**, 401.
- Friedman, J., Morris, M. S., Novikov, I. D., Echeverria, F., Klinkhammer, G., Thorne, K. S., and Yurtsever, U.* (1990). «Cauchy Problem in Spacetimes with Closed Timelike Curves», *Physical Review D*, **42**, 1915.
- Friedman, J., Papastamatiou, N., Parker, L., and Zhang, H.* (1988). «Non-orientable Foam and an Effective Planck Mass for Point-like Fermions», *Nuclear Physics*, **B309**, 533; appendix.
- Frolov, V. P.* (1991). «Vacuum Polarization in a Locally Static Multiply Connected Spacetime and a Time-Machine Problem», *Physical Review D*, **43**, 3878.
- Gamow, G.* (1937). *Structure of Atomic Nuclei and Nuclear Transformations* (Clarendon Press, Oxford, England), pp. 234–238.
- Gamow, G.* (1970). *My World Line* (Viking Press, New York).
- Geroch, R. P.* (1967). «Topology in General Relativity», *Journal of Mathematical Physics*, **8**, 782.
- Gertsenshtein, M. E., and Pustovoit, V. I.* (1962). «On the Detection of Low-Frequency Gravitational Waves», *Журнал экспериментальной и теоретической физики*, **43**, 605. Английский перевод: *Soviet Physics — JETP*, **16**, 433 (1963).
- Giacconi, R., and Gursky, H., eds.* (1974). *X-Ray Astronomy* (Reidel, Dordrecht, Holland).
- Giacconi, R., Gursky, H., Paolini, F. R., and Rossi, B. B.* (1962). «Evidence for X-Rays from Sources Outside the Solar System», *Physical Review Letters*, **9**, 439.
- Gibbons, G.* (1979). «The Man Who Invented Black Holes», *New Scientist*, **28**, 1101 (29 June).
- Gibbons, G. W., and Hawking, S. W.* (1977). «Action Integrals and Partition Functions in Quantum Gravity», *Physical Review D*, **15**, 2752.

БИБЛИОГРАФИЯ

- Giffard, R.** (1976). «Ultimate Sensitivity Limit of a Resonant Gravitational Wave Antenna Using a Linear Motion Detector», *Physical Review D*, **14**, 2478.
- Ginzburg, V. L.** (1951). «Cosmic Rays as the Source of Galactic Radio Waves», *Доклады академии наук СССР*, **76**, 377.
- Ginzburg, V. L.** (1964). «The Magnetic Fields of Collapsing Masses and the Nature of Superstars», *Доклады академии наук СССР*, **156**, 43. Английский перевод: *Soviet Physics—Doklady*, **9**, 329 (1964).
- Ginzburg, V. L.** (1984). «Some Remarks on the History of the Development of Radio Astronomy», in *The Early Years of Radio Astronomy*, edited by W. J. Sullivan (Cambridge University Press, Cambridge, England).
- Ginzburg, V. L.** (1990). Частное сообщение К. С. Торну.
- Ginzburg, V. L., and Ozernoy, L. M.** (1964). «On Gravitational Collapse of Magnetic Stars», *Журнал экспериментальной и теоретической физики*, **47**, 1030. Английский перевод: *Soviet Physics — JETP*, **20**, 689 (1965).
- Gleick, J.** (1987). *Chaos: Making a New Science* (Viking/Penguin, New York).
- Gödel, K.** (1949). «An Example of a New Type of Cosmological Solution of Einstein's Field Equations of Gravitation», *Reviews of Modern Physics*, **21**, 447.
- Golovin, I. N.** (1973). *И. В. Курчатов* (Атомиздат, Москва), 2-е издание. An English translation of the earlier and less complete first edition was published as *Academician Igor Kurchatov* (Mir Publishers, Moscow, 1969; also, Selbstverlag Press, Bloomington, Indiana, 1968).
- Goodchild, P.** (1980). *J Robert Oppenheimer, Shatterer of Worlds* (British Broadcasting Corporation, London).
- Gorelik, G. E.** (1991). « 'Моя антисоветская деятельность ...' Один год в жизни Л. Д. Ландау », *Природа*, № 11, с. 93.
- Gott, J. R.** (1991). «Closed Timelike Curves Produced by Pairs of Moving Cosmic Strings: Exact Solutions», *Physical Review Letters*, **66**, 1126.
- Graves, J. C., and Brill, D. R.** (1960). «Oscillatory Character of the Reissner—Nordstrom Metric for an Ideal Charged Wormhole», *Physical Review*, **120**, 1507.
- Greenstein, J. L.** (1963). «Red-shift of the Unusual Radio Source: 3C48», *Nature*, **197**, 1041.
- Greenstein, J. L.** (1982). Oral history interview by Rachel Prud'homme, February and March 1982, Archives, California Institute of Technology.
- Greenstein, J. L., Oke, J. B., and Shipman, H.** (1985). «On the Redshift of Sirius B», *Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society*, **26**, 279.
- Grishchuk, L. P., Petrov, A. N., and Popova, A. D.** (1984). «Exact Theory of the Einstein Gravitational Field in an Arbitrary Background Space-Time», *Communications in Mathematical Physics*, **94**, 379.
- Hall, S. S.** (1989). «The Man Who Invented Time Travel: The Astounding World of Kip Thorne», *California*, October, p. 68.
- Hanni, R. S., and Ruffini, R.** (1973). «Lines of Force of a Point Charge Near a Schwarzschild Black Hole», *Physical Review D*, **8**, 3259.
- Harrison, B. K., Thorne, K. S., Wakano, M., and Wheeler, J. A.** (1965). *Gravitation Theory and Gravitational Collapse* (University of Chicago Press, Chicago).
- Harrison, B. K., Wakano, M., and Wheeler, J. A.** (1958). «Matter—Energy at High Density: End Point of Thermonuclear Evolution», in *La Structure et l'Evolution de l'Univers*, Onzième Conseil de Physique Solvay (Stoops, Brussels), p. 124.

- Hartle, J. B., and Sabbadini, A. G.** (1977). «The Equation of State and Bounds on the Mass of Nonrotating Neutron Stars», *Astrophysical Journal*, **213**, 831.
- Hawking, S. W.** (1971a). «Gravitationally Collapsed Objects of Very Low Mass», *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **152**, 75.
- Hawking, S. W.** (1971b). «Gravitational Radiation from Colliding Black Holes», *Physical Review Letters*, **26**, 1344.
- Hawking, S. W.** (1972). «Black Holes in General Relativity», *Communications in Mathematical Physics*, **25**, 152.
- Hawking, S. W.** (1973). «The Event Horizon», in *Black Holes*, edited by C. DeWitt and B. S. DeWitt (Gordon and Breach, New York), p. 1.
- Hawking, S. W.** (1974). «Black Hole Explosions?», *Nature*, **248**, 30.
- Hawking, S. W.** (1975). «Particle Creation by Black Holes», *Communications in Mathematical Physics*, **43**, 199.
- Hawking, S. W.** (1976). «Black Holes and Thermodynamics», *Physical Review D*, **13**, 191.
- Hawking, S. W.** (1987). «Quantum Cosmology», in *300 Years of Gravitation*, edited by S. W. Hawking and W. Israel (Cambridge University Press, Cambridge, England), p. 631.
- Hawking, S. W.** (1988). *A Brief History of Time* (Bantam Books, Toronto, New York).
- Hawking, S. W.** (1992a). «The Chronology Protection Conjecture», *Physical Review D*, **46**, 603.
- Hawking, S. W.** (1992b). «Evaporation of Two-Dimensional Black Holes», *Physical Review Letters*, **69**, 406.
- Hawking, S. W., and Ellis, G. F. R.** (1973). *The Large Scale Structure of Space-Time* (Cambridge University Press, Cambridge, England).
- Hawking, S. W., and Hartle, J. B.** (1972). «Energy and Angular Momentum Flow into a Black Hole», *Communications in Mathematical Physics*, **27**, 283.
- Hawking, S. W., and Penrose, R.** (1970). «The Singularities of Gravitational Collapse and Cosmology», *Proceedings of the Royal Society of London*, **A314**, 529.
- Hey, J. S.** (1973). *The Evolution of Radio Astronomy* (Neale Watson Academic Publications, Inc., New York).
- Hirsh, R. F.** (1979). «Science, Technology, and Public Policy: The Case of X-Ray Astronomy, 1959 to 1972», unpublished Ph.D. dissertation, University of Wisconsin—Madison; available from University Microfilms, Ann Arbor, Michigan.
- Hiscock, W. A., and Konkowski, D. A.** (1982). «Quantum Vacuum Energy in Taub—NUT (Newman—Unti—Tamburino)—Type Cosmologies», *Physical Review D*, **6**, 1225.
- Hoffman, B.** (1972). In collaboration with H. Dukas, *Albert Einstein: Creator and Rebel* (Viking, New York).
- Imshennik, V. S., and Nadezhin, D. K.** (1964). «Gas Dynamical Model of a Type II Supernova Outburst», *Астрономический журнал*, **41**, 829. Английский перевод: *Soviet Astronomy—AJ*, **8**, 664 (1965).
- Israel, W.** (1967). «Event Horizons in Static Vacuum Spacetimes», *Physical Review*, **164**, 1776.
- Israel, W.** (1986). «Third Law of Black Hole Dynamics—A Formulation and Proof», *Physical Review Letters*, **57**, 397.

БИБЛИОГРАФИЯ

- Israel, W.* (1987). «Dark Stars: The Evolution of an Idea», in *300 Years of Gravitation*, edited by S. W. Hawking and W. Israel (Cambridge University Press, Cambridge, England), p. 199.
- Israel, W.* (1990). Letter to K. S. Thorne, dated 28 May 1990, commenting on the semifinal draft of this book.
- Jansky, K.* (1932). «Directional Studies of Atmospherics at High Frequencies», *Proceedings of the Institute of Radio Engineers*, **20**, 1920.
- Jennison, R. C., and Das Gupta, M. K.* (1953). «Fine Structure of the Extra-terrestrial Radio Source Cygnus 1», *Nature*, **172**, 996.
- Kellermann, K., and Sheets, B.* (1983). *Serendipitous Discoveries in Radio Astronomy* (National Radio Astronomy Observatory, Green Bank, West Virginia).
- Kerr, R. P.* (1963). «Gravitational Field of a Spinning Mass as an Example of Algebraically Special Metrics», *Physical Review Letters*, **11**, 237.
- Keves, D. J.* (1971). *The Physicists* (Random House, New York).
- Khalatnikov, I. M.*, ed. (1988). *Воспоминания о Л. Д. Ландау* (Наука, Москва). English translation: *Landau, the Physicist and the Man: Recollections of L. D. Landau* (Pergamon Press, Oxford, England, 1989).
- Khalatnikov, I. M., and Lifshitz, E. M.* (1970). «The General Cosmological Solution of the Gravitational Equations with a Singularity in Time», *Physical Review Letters*, **24**, 76.
- Kiepenheuer, K. O.* (1950). «Cosmic Rays as the Source of General Galactic Radio Emission», *Physical Review*, **79**, 738.
- Kim, S.-W., and Thorne, K. S.* (1991). «Do Vacuum Fluctuations Prevent the Creation of Closed Timelike Curves?» *Physical Review D*, **43**, 3939.
- Klauder, J. R.*, ed. (1972). *Magic without Magic: John Archibald Wheeler* (W. H. Freeman, San Francisco).
- Kruskal, M. D.* (1960). «Minimal Extension of the Schwarzschild Metric», *Physical Review*, **119**, 1743.
- Kuhn, T.* (1962). *The Structure of Scientific Revolutions* (University of Chicago Press, Chicago).
- Landau, L. D.* (1932). «On the Theory of Stars», *Physikalische Zeitschrift Sowjetunion*, **1**, 285.
- Landau, L. D.* (1938). «Origin of Stellar Energy», *Nature*, **141**, 333.
- Landau, L. D., and Lifshitz, E. M.* (1962). *Теория поля* (Государственное издательство физико-математической литературы, Москва), Раздел 108. English translation: *The Classical Theory of Fields* (Pergamon Press, Oxford, England, 1962), Section 110.
- Laplace, P. S.* (1796). *Exposition du Système du Monde*. Volume II: *Des Mouvements Réels des Corps Célestes* (Paris). Published in English as *The System of the World* (W. Flint, London, 1809).
- Laplace, P. S.* (1799). «Proof of the Theorem, that the Attractive Force of a Heavenly Body Could Be So Large, that Light Could Not Flow Out of It», *Allgemeine Geographische Ephemeriden*, verfasst von Einer Gesellschaft Gelehrten. 8vo Weimer, IV, Bd I St. Английский перевод: Appendix A of Hawking and Ellis (1973).
- Lifshitz, E. M., and Khalatnikov, I. M.* (1960). «On the Singularities of Cosmological Solutions of the Gravitational Equations. I.» *Журнал экспериментальной и теоретической физики*, **32**, 133.

- мической физики, 39, 149. Английский перевод: *Soviet Physics — JETP*, 12, 108 and 558 (1961).
- Lifshitz, E. M., and Khalatnikov, I. M.** (1963). «Investigations in Relativistic Cosmology», *Advances in Physics*, 12, 185.
- Livanova, A.** (1980). *Landau: A Great Physicist and Teacher* (Pergamon Press, Oxford, England).
- Longair, M. S., Ryle, M., and Scheuer, P. A. G.** (1973). «Models of Extended Radio Sources», *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 164, 243.
- Lorentz, H. A., Einstein, A., Minkowski, H., and Weyl, H.** (1923). *The Principle of Relativity: A Collection of Original Memoirs on the Special and General Theory of Relativity* (Dover, New York).
- Lynden-Bell, D.** (1969). «Galactic Nuclei as Collapsed Old Quasars», *Nature*, 223, 690.
- Lynden-Bell, D.** (1978). «Gravity Power», *Physica Scripta*, 17, 185.
- Mazur, P.** (1982). «Proof of Uniqueness of the Kerr—Newman Black Hole Solution», *Journal of Physics A*, 15, 3173.
- May, M. M., and White, R. H.** (1965). «Hydrodynamical Calculation of General Relativistic Collapse», *Bulletin of the American Physical Society*, 10, 15.
- May, M. M., and White, R. H.** (1966). «Hydrodynamic Calculations of General Relativistic Collapse», *Physical Review*, 141, 1232.
- Medvedev, Z. A.** (1978). *Soviet Science* (W. W. Norton, New York).
- Medvedev, Z. A.** (1979). *Nuclear Disaster in the Urals* (W. W. Norton, New York).
- Michell, J.** (1784). «On the Means of Discovering the Distance, Magnitude, Etc., of the Fixed Stars, in Consequence of the Diminution of Their Light, in Case Such a Diminution Should Be Found to Take Place in Any of Them, and Such Other Data Should Be Procured from Observations, as Would Be Further Necessary for That Purpose», in *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 74, 35; presented to the Royal Society on 27 November 1783.
- Michelson, P. F., and Taber, R. C.** (1984). «Can a Resonant-Mass Gravitational-Wave Detector Have Wideband Sensitivity?» *Physical Review D*, 29, 2149.
- Misner, C. W.** (1969). «Mixmaster Universe», *Physical Review Letters*, 22, 1071.
- Misner, C. W., Thorne, K. S., and Wheeler, J. A.** (1973). *Gravitation* (W. H. Freeman, San Francisco).
- Mitton, S., and Ryle, M.** (1969). «High Resolution Observations of Cygnus A at 2.7 GHz and 5 GHz», *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 146, 221.
- Morris, M. S., and Thorne, K. S.** (1988). «Wormholes in Spacetime and Their Use for Interstellar Travel: A Tool for Teaching General Relativity», *American Journal of Physics*, 56, 595.
- Morris, M. S., Thorne, K. S., and Yurtsever, U.** (1988). «Wormholes, Time Machines, and the Weak Energy Condition», *Physical Review Letters*, 61, 1446.
- Moss, G. E., Miller, L. R., and Forward, R. L.** (1971). «Photon Noise Limited Laser Transducer for Gravitational Antenna», *Applied Optics*, 10, 2495.
- MTW: Misner, Thorne, and Wheeler (1973).
- Newman, E. T., Couch, E., Chinnapared, K., Exton, A., Prakash, A., and Torrence, R.** (1965). «Metric of a Rotating, Charged Mass», *Journal of Mathematical Physics*, 6, 918.

БИБЛИОГРАФИЯ

- Novikov, I. D. (1963). «The Evolution of the Semi-Closed World», *Астрономический журнал*, **40**, 772. Английский перевод: *Soviet Astronomy—AJ*, **7**, 587 (1964).
- Novikov, I. D. (1966). «Change of Relativistic Collapse into Anticollapse and Kinematics of a Charged Sphere», *Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики*, **3**, 223. Английский перевод: *JETP Letters*, **3**, 142 (1966).
- Novikov, I. D. (1969). «Metric Perturbations When Crossing the Schwarzschild Sphere», *Журнал экспериментальной и теоретической физики*, **57**, 949. Английский перевод: *Soviet Physics — JETP*, **30**, 518 (1970).
- Novikov, I. D., Polnarev, A. G., Starobinsky, A. A., and Zel'dovich, Ya. B. (1979). «Primordial Black Holes», *Astronomy and Astrophysics*, **80**, 104.
- Novikov, I. D., and Zel'dovich, Ya. B. (1966). «Physics of Relativistic Collapse», *Supplemento al Nuovo Cimento*, **4**, 810; Addendum 2.
- Oppenheimer, J. R., and Serber, R. (1938). «On the Stability of Stellar Neutron Cores», *Physical Review*, **54**, 608.
- Oppenheimer, J. R., and Snyder, H. (1939). «On Continued Gravitational Contraction», *Physical Review*, **56**, 455.
- Oppenheimer, J. R., and Volkoff, G. (1939). «On Massive Neutron Cores», *Physical Review*, **54**, 540.
- Ori, A. (1991). «The Inner Structure of a Charged Black Hole: An Exact Mass Inflation Solution», *Physical Review Letters*, **67**, 789.
- Ori, A. (1992). «Structure of the Singularity Inside a Realistic Rotating Black Hole», *Physical Review Letters*, **68**, 2117.
- Page, D. N. (1976). «Particle Emission Rates from a Black Hole», *Physical Review D*, **13**, 198, and **14**, 3260.
- Page, D. N., and Hawking, S. W. (1975). «Gamma Rays from Primordial Black Holes», *Astrophysical Journal*, **206**, 1.
- Pagels, H. (1982). *The Cosmic Code* (Simon and Schuster, New York).
- Pais, A. (1982). «Subtle Is the Lord ...» *The Science and the Life of Albert Einstein* (Oxford University Press, Oxford, England).
- Penrose, R. (1965). «Gravitational Collapse and Spacetime Singularities», *Physical Review Letters*, **14**, 57.
- Penrose, R. (1968). «The Structure of Spacetime», in *Battelle Rencontres: 1967 Lectures in Mathematics and Physics*, edited by C. M. DeWitt and J. A. Wheeler (Benjamin, New York), p. 565.
- Penrose, R. (1969). «Gravitational Collapse: The Role of General Relativity», *Rivista Nuovo Cimento*, **1**, 252.
- Penrose, R. (1989). *The Emperor's New Mind* (Oxford University Press, New York), pp. 419–421.
- Phinney, E. S. (1989). «Manifestations of a Massive Black Hole in the Galactic Center», in *The Center of the Galaxy: Proceedings of IAU Symposium 136*, edited by M. Morris (Reidel, Dordrecht, Holland), p. 543.
- Pimenov, R. I. (1968). *Пространства кинематического типа [Математические семинары]*, т. 6 (Математический институт им. В. А. Стеклова, Ленинград). English translation: *Kinematic Spaces* (Consultants Bureau, New York, 1970).
- Podurets, M. A. (1964). «The Collapse of a Star with Back Pressure Taken Into Account», *Доклады академии наук*, **154**, 300. Английский перевод: *Soviet Physics—Doklady*, **9**, 1 (1964).

- Poisson, E., and Israel, W.* (1990). «Internal Structure of Black Holes», *Physical Review D*, **41**, 1796.
- Press, W. H.* (1971). «Long Wave Trains of Gravitational Waves from a Vibrating Black Hole», *Astrophysical Journal Letters*, **170**, 105.
- Press, W. H., and Teukolsky, S. A.* (1973). «Perturbations of a Rotating Black Hole. II. Dynamical Stability of the Kerr Metric», *Astrophysical Journal*, **185**, 649.
- Price, R. H.* (1972). «Nonspherical Perturbations of Relativistic Gravitational Collapse», *Physical Review D*, **5**, 2419 and 2439.
- Price, R. H., and Thorne, K. S.* (1988). «The Membrane Paradigm for Black Holes», *Scientific American*, **258** (No. 4), 69.
- Rabi, I. I., Serber, R., Weisskopf, V. F., Pais, A., and Seaborg, G. T.* (1969). *Oppenheimer* (Scribners, New York).
- Reber, G.* (1940). «Cosmic Static», *Astrophysical Journal*, **91**, 621.
- Reber, G.* (1944). «Cosmic Static», *Astrophysical Journal*, **100**, 279.
- Reber, G.* (1958). «Early Radio Astronomy at Wheaton, Illinois», *Proceedings of the Institute of Radio Engineers*, **46**, 15.
- Rees, M.* (1971). «New Interpretation of Extragalactic Radio Sources», *Nature*, **229**, 312 and 510.
- Renn, I., and Schulman, R.* (1992). Introduction to *Albert Einstein/Mileva Marić: The Love Letters*, edited by Jürgen Renn and Robert Schulman (Princeton University Press, Princeton, New Jersey).
- Rhodes, R.* (1986). *The Making of the Atomic Bomb* (Simon and Schuster, New York).
- Ritus, V. I.* (1990). «Если не я, то кто?» *Природа*, № 8. Английский перевод: Drell and Kapitsa, eds. (1991).
- Robinson, I., Schild, A., and Schucking, E. L., eds.* (1965). *Quasi-Stellar Sources and Gravitational Collapse* (University of Chicago Press, Chicago).
- Romanov, Yu. A.* (1990). «Отец советской водородной бомбы», *Природа*, № 8. Английский перевод: Drell and Kapitsa, eds. (1991).
- Royal, D.* (1969). *The Story of J. Robert Oppenheimer* (St. Martin's Press, New York).
- Sagan, C.* (1985). *Contact* (Simon and Schuster, New York).
- Sakharov, A.* (1990). *Memoirs* (Alfred A. Knopf, New York).
- Salpeter, E. E.* (1964). «Accretion of Interstellar Matter by Massive Objects», *Astrophysical Journal*, **140**, 796.
- Schaffer, S.* (1979). «John Michell and Black Holes», *Journal for the History of Astronomy*, **10**, 42.
- Schmidt, M.* (1963). «3C273: A Star-like Object with Large Red-shift», *Nature*, **197**, 1040.
- Schwarzschild, K.* (1916a). «Über das Gravitationsfeld eines Massenpunktes nach der Einsteinschen Theorie», *Sitzungsberichte der Deutschen Akademie der Wissenschaften zu Berlin, Klasse für Mathematik, Physik, und Technik*, **1916**, 189.
- Schwarzschild, K.* (1916b). «Über das Gravitationsfeld einer Kugel aus inkompressibler Flüssigkeit nach der Einsteinschen Theorie», *Sitzungsberichte der Deutschen Akademie der Wissenschaften zu Berlin, Klasse für Mathematik, Physik, und Technik*, **1916**, 424.
- Seelig, C.* (1956). *Albert Einstein: A Documentary Biography* (Staples Press, London), p. 104.

- Serber, R.** (1969). «The Early Years», in Rabi et al. (1969); also published in *Physics Today*, October 1967, p. 35.
- Shapiro, S. L., and Teukolsky, S. A.** (1983). *Black Holes, White Dwarfs, and Neutron Stars* (Wiley, New York).
- Shapiro, S. L., and Teukolsky, S. A.** (1991). «Formation of Naked Singularities – The Violation of Cosmic Censorship», *Physical Review Letters*, **66**, 994.
- Smart, W. M.** (1953). *Celestial Mechanics* (Longmans, Green and Co., London), Section 19.03.
- Smith, A. K., and Weiner, C.** (1980). *Robert Oppenheimer: Letters and Recollections* (Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts).
- Smith, H. J.** (1965). «Light Variations of 3C273», in *Quasi-Stellar Sources and Gravitational Collapse*, edited by I. Robinson, A. Schild, and E. L. Schucking (University of Chicago Press, Chicago), p. 221.
- Solvay (1958). Onzième Conseil de Physique Solvay, *La Structure et l'Evolution de l'Univers* (Editions R. Stoops, Brussels).
- Stoner, E. C.** (1930). «The Equilibrium of Dense Stars», *Philosophical Magazine*, **9**, 944.
- Struve, O., and Zeberg, V.** (1962). *Astronomy of the 20th Century* (Macmillan, New York).
- Sullivan, W. J., ed.** (1982). *Classics in Radio Astronomy* (Reidel, Dordrecht, Holland).
- Sullivan, W. J., ed.** (1984). *The Early Years of Radio Astronomy* (Cambridge University Press, Cambridge, England).
- Sunyaev, R. A.** (1972). «Variability of X-Rays from Black Holes with Accretion Disks», *Астрономический журнал*, **49**, 1153. Английский перевод: *Soviet Astronomy—AJ*, **16**, 941 (1973).
- Taylor, E. F., and Wheeler, J. A.** (1992). *Spacetime Physics: Introduction to Special Relativity* (W. H. Freeman, San Francisco).
- Teller, E.** (1955). «The Work of Many People», *Science*, **121**, 268.
- Teukolsky, S. A.** (1972). «Rotating Black Holes: Separable Wave Equations for Gravitational and Electromagnetic Perturbations», *Physical Review Letters*, **29**, 1115.
- Thorne, K. S.** (1967). «Gravitational Collapse», *Scientific American*, **217** (No. 5), 96.
- Thorne, K. S.** (1972). «Nonspherical Gravitational Collapse—A Short Review», in *Magic without Magic: John Archibald Wheeler*, edited by J. R. Klauder (W. H. Freeman, San Francisco), p. 231.
- Thorne, K. S.** (1974). «The Search for Black Holes», *Scientific American*, **231** (No. 6), 32.
- Thorne, K. S.** (1987). «Gravitational Radiation», in *300 Years of Gravitation*, edited by S. W. Hawking and W. Israel (Cambridge University Press, Cambridge, England), p. 330.
- Thorne, K. S.** (1991). «An American's Glimpses of Sakharov», *Прупода*, № 5; на русском. Английский перевод: Drell and Kapitsa, eds. (1991), p. 74.
- Thorne, K. S.** (1993). «Closed Timelike Curves», in *General Relativity and Gravitation 1992*, edited by R. J. Gleiser, C. N. Kozameh, and D. M. Moreschi (Institute of Physics Publishing, Bristol, England), p. 295.
- Thorne, K. S., Drever, R. W. P., Caves, C. M., Zimmermann, M., and Sandberg, V. D.** (1978). «Quantum Nondemolition Measurements of Harmonic Oscillators», *Physical Review Letters*, **40**, 667.

- Thorne, K. S., Price, R. H., and Macdonald, D. A.*, eds. (1986). *Black Holes: The Membrane Paradigm* (Yale University Press, New Haven, Connecticut).
- Thorne, K. S., and Zurek, W.* (1986). «John Archibald Wheeler: A Few Highlights of His Contributions to Physics», *Foundations of Physics*, **16**, 79.
- Thorne, K. S., and Żytkow, A. N.* (1977). «Stars with Degenerate Neutron Cores. I. Structure of Equilibrium Models», *Astrophysical Journal*, **212**, 832.
- Tipler, F. J.* (1976). «Causality Violation in Asymptotically Flat Space-Times», *Physical Review Letters*, **37**, 879.
- Tolman, R. C.* (1939). «Static Solutions of Einstein's Field Equations for Spheres of Fluid», *Physical Review*, **55**, 364.
- Tolman, R. C.* (1948). The Richard Chace Tolman Papers, archived in the California Institute of Technology Archives.
- Trimble, V. L., and Thorne, K. S.* (1969). «Spectroscopic Binaries and Collapsed Stars», *Astrophysical Journal*, **56**, 1013.
- Uhuru (1981). «Proceedings of the Uhuru Memorial Symposium: The Past, Present, and Future of X-Ray Astronomy», *Journal of the Washington Academy of Sciences*, **71** (No. 1).
- Unruh, W. G.* (1976). «Notes on Black-Hole Evaporation», *Physical Review D*, **14**, 870.
- Unruh, W. G., and Wald, R. M.* (1982). «Acceleration Radiation and the Generalized Second Law of Thermodynamics», *Physical Review D*, **25**, 942.
- Unruh, W. G., and Wald, R. M.* (1984). «What Happens When an Accelerating Observer Detects a Rindler Particle», *Physical Review D*, **29**, 1047.
- USAEC [United States Atomic Energy Commission] (1954). *In the Matter of J. Robert Oppenheimer; Transcript of Hearing before Personnel Security Board, Washington, D.C., April 12, 1954, through May 6, 1954* (U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.).
- van Stockum, W. J.* (1937). «The Gravitational Field of a Distribution of Particles Rotating about an Axis of Symmetry», *Proceedings of the Royal Society of Edinburgh*, **57**, 135.
- Wald, R. M.* (1977). «The Back Reaction Effect in Particle Creation in Curved Space-time», *Communications in Mathematical Physics*, **54**, 1.
- Wald, R. M., and Yurtsever, U.* (1991). «General Proof of the Averaged Null Energy Condition for a Massless Scalar Field in Two-Dimensional Curved Space-time», *Physical Review D*, **44**, 403.
- Wali, K. C.* (1991). *Chandra: A Biography of S. Chandrasekhar* (University of Chicago Press, Chicago).
- Washington (1954). «Washington Conference on Radio Astronomy — 1954», *Journal of Geophysical Research*, **59**, 1–204.
- Weber, J.* (1955). «Amplification of Microwave Radiation by Substances Not in Thermal Equilibrium», *Transactions of the IEEE, PG Electron Devices* — **3**, 1 (June).
- Weber, J.* (1960). «Detection and Generation of Gravitational Waves», *Physical Review*, **117**, 506.
- Weber, J.* (1961). *General Relativity and Gravitational Waves* (Wiley — Interscience, New York).
- Weber, J.* (1964). Unpublished research notebooks; also documented in Robert Forward's unpublished Personal Journal No. C1358, page 66, 15 September 1964.

БИБЛИОГРАФИЯ

- Weber, J. (1969). «Evidence for Discovery of Gravitational Radiation», *Physical Review Letters*, **22**, 1320.
- Weiss, R. (1972). «Electromagnetically Coupled Broadband Gravitational Antenna», *Quarterly Progress Report of the Research Laboratory of Electronics, M.I.T.*, **105**, 54.
- Wheeler, J. A. (1955). «Geons», *Physical Review*, **97**, 511. Reprinted in Wheeler (1962), p. 131.
- Wheeler, J. A. (1957). «On the Nature of Quantum Geometrodynamics», *Annals of Physics*, **2**, 604.
- Wheeler, J. A. (1960). «Neutrinos, Gravitation and Geometry», in *Proceedings of the International School of Physics, «Enrico Fermi», Course XI* (Zanichelli, Bologna). Reprinted in Wheeler (1962), p. 1.
- Wheeler, J. A. (1962). *Geometrodynamics* (Academic Press, New York).
- Wheeler, J. A. (1964a). «The Superdense Star and the Critical Nucleon Number», in *Gravitation and Relativity*, edited by H. Y. Chiu and W. F. Hoffman (Benjamin, New York), p. 10.
- Wheeler, J. A. (1964b). «Geometrodynamics and the Issue of the Final State», in *Relativity, Groups, and Topology*, edited by C. DeWitt and B. S. DeWitt (Gordon and Breach, New York), p. 315.
- Wheeler, J. A. (1968). «Our Universe: The Known and the Unknown», *American Scientist*, **56**, 1.
- Wheeler, J. A. (1979). «Some Men and Moments in the History of Nuclear Physics: The Interplay of Colleagues and Motivations», in *Nuclear Physics in Retrospect*, edited by Roger H. Stuewer (University of Minnesota, Minneapolis).
- Wheeler, J. A. (1985). Письмо К. С. Торну, датированное 3 декабря.
- Wheeler, J. A. (1988). Тетради, в которых Уилер записывал свои исследования и идеи в процессе развития, ныне хранятся в библиотеке Американского философского общества в Филадельфии, Пенсильвания.
- Wheeler, J. A. (1990). *A Journey into Gravity and Spacetime* (Scientific American Library, New York).
- Whipple, F. L., and Greenstein, J. L. (1937). «On the Origin of Interstellar Radio Disturbances», *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **23**, 177.
- White, T. H. (1939). *The Once and Future King* (Collins, London), Chapter 13 of Part I, «The Sword in the Stone.»
- Will, C. M. (1986). *Was Einstein Right?* (Basic Books, New York).
- York, H. (1976). *The Advisors: Oppenheimer, Teller and the Superbomb* (W. H. Freeman, San Francisco).
- Zel'dovich, Ya. B. (1962). «Semi-closed Worlds in the General Theory of Relativity», *Журнал экспериментальной и теоретической физики*, **43**, 1037. Английский перевод: *Soviet Physics — JETP*, **16**, 732 (1963).
- Zel'dovich, Ya. B. (1964). «The Fate of a Star and the Evolution of Gravitational Energy upon Accretion», *Доклады академии наук СССР*, **155**, 67. Английский перевод: *Soviet Physics — Doklady*, **9**, 195 (1964).
- Zel'dovich, Ya. B. (1971). «The Generation of Waves by a Rotating Body», *Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики*, **14**, 270. Английский перевод: *JETP Letters*, **14**, 180 (1971).
- Zel'dovich, Ya. B. (1985). *Избранные труды. Частицы, ядра, Вселенная* (Наука, Москва); на русском. English translation: *Selected Works of Yakov Borisovich Zel'dovich*.

Volume II: *Particles, Nuclei, and the Universe* (Princeton University Press, Princeton, 1993).

Zel'dovich, Ya. B., and Guseinov, O. Kh. (1965). «Collapsed Stars in Binaries», *Astrophysical Journal*, **144**, 840.

Zel'dovich, Ya. B., and Khariton, Yu. B. (1939). «On the Issue of a Chain Reaction Based on an Isotope of Uranium», *Журнал экспериментальной и теоретической физики*, **9**, 1425; см. также следующие статьи тех же авторов в этом же журнале, **10**, 29 (1940) и **10**, 477 (1940). Перепечатаны как первые три статьи в т. II избранных трудов Зельдовича (1985).

Zel'dovich, Ya. B., and Novikov, I. D. (1964). «Relativistic Astrophysics, Part I», *Успехи физических наук*, **84**, 877. Английский перевод: *Soviet Physics — Uspekhi*, **7**, 763 (1965).

Zel'dovich, Ya. B., and Novikov, I. D. (1965). «Relativistic Astrophysics, Part II», *Успехи физических наук*, **86**, 447. Английский перевод: *Soviet Physics — Uspekhi*, **8**, 522 (1966).

Zel'dovich, Ya. B., and Starobinsky, A. A. (1971). «Particle Production and Vacuum Polarization in an Anisotropic Gravitational Field», *Журнал экспериментальной и теоретической физики*, **61**, 2161. Английский перевод: *Soviet Physics — JETP*, **34**, 1159 (1972).

Znajek, R. (1978). «The Electric and Magnetic Conductivity of a Kerr Hole», *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **185**, 833.

Zwicky, F. (1935). «Stellar Guests», *Scientific Monthly*, **40**, 461.

Zwicky, F. (1939). «On the Theory and Observation of Highly Collapsed Stars», *Physical Review*, **55**, 726.

Научно-популярное издание

Кип С. ТОРН

**Черные дыры и складки времени
Дерзкое наследие Эйнштейна**

Перевод с английского
доктор физико-математических наук *М.Л. Городецкий*

Титульный редактор перевода
член-корреспондент РАН *В.Б. Брагинский*

Редактор *Л.А. Панюшкина*
Оригинал-макет и оформление *М.Н. Грищук*

ИД № 01389 от 30.03.2000
Гигиеническое заключение № 77.99.10.953.Д.005466.07.03 от 25.07.2003

Подписано в печать 20.01.2007
Формат 70х100/16. Печать офсетная
Усл. п. л. 38,5. Уч.-изд. л. 58,3. Тираж 700 экз.
Заказ № 2796.

Охраняется законом РФ об авторском праве.
Воспроизведение всей книги или любой ее части
запрещается без письменного разрешения издателя.
Юридическое обслуживание — «Славянский центр правовой поддержки»

Издательство физико-математической литературы
123182 Москва, ул. Щукинская, 12, к. 1
Отпечатано с готовых диапозитивов
ПФ «Полиграфист»
160001 г. Вологда, ул. Челюскинцев, 3