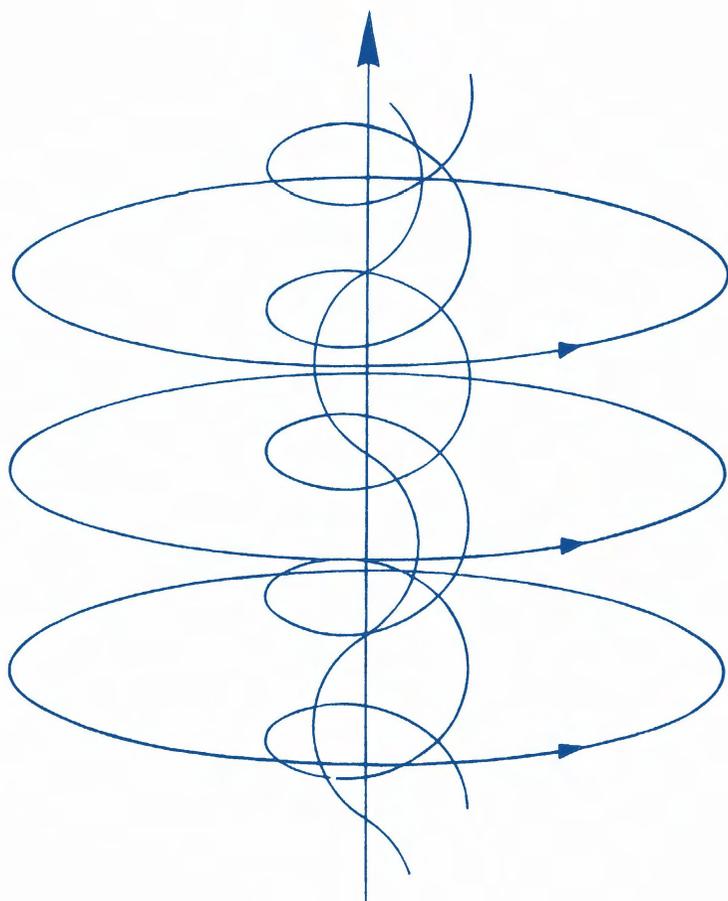


**Х. АЛЬВЕН**

# **КОСМИЧЕСКАЯ ПЛАЗМА**

---





# **COSMIC PLASMA**

by

**HANNES ALFVÉN**

University of California, San Diego, La Jolla, California

and

Royal Institute of Technology,  
Department of Plasma Physics,  
Stockholm, Sweden

D. Reidel Publishing Company  
Dordrecht: Holland/Boston: U.S.A.  
London: England

**Х. АЛЬВЕН**  
**КОСМИЧЕСКАЯ**  
**ПЛАЗМА**

**ПЕРЕВОД С АНГЛИЙСКОГО**

**канд. физ.-мат. наук**  
**Т. К. БРЕУС**

**под редакцией**  
**д-ра физ.-мат. наук**  
**А. А. ГАЛЕЕВА**

**МОСКВА «МИР» 1983**

**Альвен Х.** Космическая плазма: Пер. с англ. — М.: Мир, 1983. — 216 с., ил.

В монографии выдающегося шведского ученого, Нобелевского лауреата, на основе качественного анализа картины электрических токов рассматриваются процессы, протекающие в космической плазме в масштабах от планет до Метагалактики. Излагаются взгляды автора на эволюцию Солнечной системы и Вселенной в целом.

Для астрономов, геофизиков, специалистов по физике плазмы и магнито-гидродинамике, а также студентов и аспирантов соответствующих специальностей.

*Редакция литературы по космическим исследованиям,  
астрономии и геофизике*

## Предисловие редактора перевода

Имя выдающегося шведского физика и астрофизика, лауреата Нобелевской премии, иностранного члена АН СССР Ханнеса Альвена хорошо известно советским читателям. Его работы, которым присущи богатство идей и нетрадиционность подхода, неоднократно публиковались в русском переводе. Новая книга Х. Альвена посвящена физике космической плазмы, испытывающей в настоящее время бурное развитие, которому немало способствуют прямые измерения в межпланетном пространстве с помощью космических аппаратов, интенсивные исследования, связанные с проблемой термоядерного синтеза, а также успехи радиоастрономии.

Из обширной литературы по физике космической плазмы эта книга выделяется прежде всего оригинальностью подхода к излагаемому предмету. Вместо традиционного для космической электродинамики описания процессов, протекающих в плазме, с помощью картины магнитных полей автор использует альтернативный подход — описание с помощью картины токов. В ряде случаев такой подход оказывается более «прозрачным» и позволяет полнее и глубже проанализировать сложную взаимосвязь явлений, наблюдаемых в космической плазме. Кроме того, только на языке токов можно описать такие важные для космической плазмы эффекты, как образование и взрыв двойных электрических слоев, пинчевание распределенных токов в токовые нити и т. д.

Следует отметить, что отказ автора от традиционного описания на языке магнитных полей приводит его к неявному противопоставлению этих двух подходов (одинаково плодотворных при квалифицированном использовании) и критическому пересмотру некоторых концепций, на которых базируется современная физика космической плазмы. Прежде всего это касается понятия «вмороженности» магнитных силовых линий в плазму в приближении ее идеальной проводимости. В этом приближении конфигурация магнитного поля определяется движениями плазмы, и поэтому динамику последней можно иллюстрировать с помощью возникающей картины магнитных силовых линий. Учитывая наглядность такого представления, ряд явлений, обусловленных диссипативными процессами в плазме и нарушающих «вмороженность» магнитных силовых линий, обычно описывается в литературе с помощью понятий «аннигиляции» магнитного поля и пересоединения магнитных силовых линий. Однако с позиций своего нетрадиционного подхода автор считает неправомерным понятие пересоединения магнитных силовых линий, хотя оно позволило добиться определенного прогресса при анализе

взрывных процессов высвобождения энергии во время солнечных вспышек и магнитосферных суббурь.

Поскольку, как отмечается в книге, «в монографии такого объема невозможно провести строгое описание такой обширной и сложной области, как физика космической плазмы», автор не ставил своей целью последовательное изложение вопросов солнечной и магнитосферной физики и тем более астрофизических явлений, в которых важную роль играют электродинамические процессы. Он лишь стремился проиллюстрировать плодотворность подхода, который он и его школа разрабатывают уже не одно десятилетие. По многим вопросам, в особенности при оценке состояния современной космологии, автор стоит на точке зрения, отличной от общепринятой. Безусловно, знакомство с этим оригинальным подходом окажется очень полезным и поучительным для читателя. При переводе мы старались сохранить своеобразный стиль и терминологию автора.

Отказавшись от строгого описания современного аппарата теории космической плазмы, автор существенно упростил изложение, апеллируя в основном к качественным соображениям, которые поясняются отличными иллюстрациями. Это делает книгу доступной для широкого круга читателей. В то же время она будет полезна и интересна специалистам, которые смогут взглянуть на хорошо известные им явления с новой точки зрения.

*А. А. Галеев*

## Предисловие

Общее содержание и цель настоящей монографии подробно изложены в гл. I. Как сказано в разд. I.7, она написана по принципу: «когда строгость вступает в противоречие с простотой, предпочтение отдается простоте», т. е. она адресована довольно широкой аудитории. Большая часть этой книги будет понятна не только аспирантам, но и студентам старших курсов.

Эта монография является плодом многолетних дискуссий с целым рядом коллег, которым я хочу выразить свою большую признательность. В особенности это относится к специалистам из Стокгольма (Швеция) и Ла-Хольи (США). Из стокгольмской группы мне хотелось бы поблагодарить д-ра К.-Г. Фельтхаммара и многих его сотрудников, в том числе д-ров Л. Блока, П. Карлквиста, Л. Линдберга, М. Рааду, С. Торвена, М. Бабича и И. Акнеса, а также д-ров Б. Ленерта и Б. Бонневьера (все они из Королевского технологического института в Стокгольме). Из других коллег в Швеции я хочу принести благодарность д-ру Б. Лауренту (Стокгольмский университет), д-ру А. Элвиусу (обсерватория в Стокгольме) и д-ру Б. Хулдквисту (Кируна).

В Ла-Холье я хотел бы прежде всего поблагодарить д-ра Г. Аррениуса, который однажды пригласил меня в Ла-Холью, с чего и началась наша чрезвычайно интересная совместная работа, далее, д-ра В. Б. Томпсона, сделавшего много критических замечаний, и д-ра А. Мендеса, с которым я почти ежедневно беседовал в течение нескольких лет. У меня сложилось очень полезное сотрудничество со специалистами из группы д-ра К. Макилвейна, особенно с д-рами Э. Уипплом и В. Филлиусом, а также с д-рами М. Бербидж, Х. Смитом и А. Маршером.

Помимо американских коллег, работающих в Ла-Холье, я благодарен группе космических исследований из университета в Райсе (США), возглавляемой А. Деслером, группе д-ра Т. Кримиджиса из университета Джона Гопкинса, д-ру С.-И. Акасофу из университета штата Аляска, д-ру Г. Вокулеру и д-ру У. Хейкила из Техасского университета, а также д-ру Х. Арпу из Калифорнийского технологического института.

Я также обязан Д. Чемберлену, М. Маркони и Д. Кордова за помощь в подготовке рукописи и Д. Бонду и М. Малморт за редактирование. Большую помощь мне оказали Е. Флорман, К. Фосберг, К. Хамрин, С. Лиллискельд и К. Викбладх.

Работа субсидировалась НАСА и Национальным научным фондом США, а также Советом по естественнонаучным исследованиям Швеции.

Профессор К.-Г. Фельтхаммар любезно предоставил в мое распоряжение все возможности, которыми располагает его институт.

### I.1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ПОДХОДЫ К ФИЗИКЕ ПЛАЗМЫ

Физика плазмы развивалась по двум параллельным направлениям. К одному из них относятся начавшиеся примерно сто лет назад исследования в области, получившей общее название «электрические разряды в газах». Это направление было в основном экспериментальным и феноменологическим, и только со временем в нем наметились некоторые черты теоретического подхода. Большинство физиков-теоретиков смотрело на эту область исследований свысока, так как она выглядела чрезвычайно сложной и запутанной. В плазме наблюдались страты, двойные слои и целый набор колебаний и неустойчивостей. Электронная температура часто оказывалась на один или два порядка выше температуры нейтрального газа, а значение ионной температуры заключалось в интервале между электронной и газовой температурами. Короче говоря, это была область физики, не очень подходящая для применения математически элегантных теорий.

Другое направление развилось из хорошо разработанной кинетической теории обычных газов. Считалось, что эту теорию можно без особых усилий обобщить так, чтобы она включала в себя физику ионизованных газов. Появившиеся таким образом теории были математически изящными и претендовали на объяснение всех свойств плазмы, исходя из единых начальных принципов. На самом деле эти ожидания не оправдались. Из-за сложности проблемы приходилось использовать целый ряд приближений, которые не всегда были корректными. Теоретические исследования практически не соприкасались с экспериментальной физикой плазмы; все сложные и неясные явления, наблюдавшиеся в газовых разрядах, просто исключались из рассмотрения.

В физике космической плазмы экспериментальный подход начался с работ Биркеланда, который первым попытался связать физику лабораторной плазмы и физику космической плазмы. (Ни один из этих терминов не употреблялся в то время!) Биркеланд наблюдал полярные сияния и магнитные бури и попытался понять эти явления природы с помощью своих знаменитых опытов с тереллой [1]. Он обнаружил, что при погружении тереллы в плазму вокруг полюсов при определенных условиях возникают светящиеся кольца (рис. I.1). Биркеланд отождествил эти кольца с зонами полярных сияний. Как мы теперь знаем, этот вывод был абсолютно верным. Далее, он разработал модель полярных магнитных бурь, предположив, что электрический ток, вызывающий сияния, замыкается вертикальными токами (текущими вдоль магнитных силовых линий). Такое предположение было есте-

ственным, так как в эксперименте Биркеланда изучался электрический ток в «вакууме». Оно тоже оказалось верным в первом приближении (токовая система на самом деле сложнее, чем думал Биркеланд). Следовательно, хотя Биркеланд и не мог знать многого о структуре магнитосферы, его идеи оказали существенное влияние на современные исследования, особенно идея о важности связи между лабораторными экспериментами и астрофизикой [2, 3].

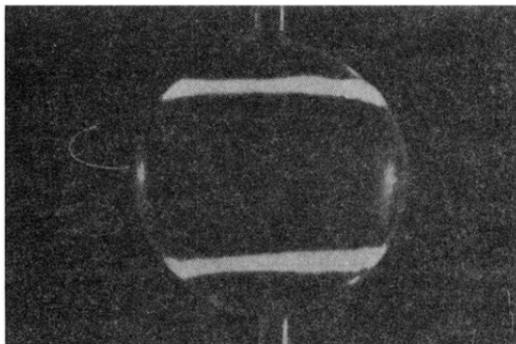


Рис. 1.1. Опыт Биркеланда с тереллой (в современном исполнении), демонстрирующий поведение плазмы, в которой находится намагниченное тело (при весьма общих условиях). Видно, что плазма проникает в зоны полярных сияний [6].

К сожалению, развитие этих идей не происходило гладко. Теория плазмы, которая в то время называлась ионизованным газом, разрабатывалась в отрыве от лабораторных плазменных экспериментов. Несмотря на это, а может быть, именно благодаря этому вера в теорию была настолько сильной, что ее стали непосредственно использовать в космической физике. Так появилась теория Чепмена — Ферраро (обзор этой теории дан в [4]), получившая настолько широкое признание, что подход Биркеланда был почти полностью предан забвению. В течение последующих 30—40 лет результаты Биркеланда не упоминались ни в учебниках, ни в обзорных статьях, а всеми попытками возродить и развить его идеи пренебрегали.

Однако триумф теоретического подхода, преобладавшего над экспериментальным, продолжался лишь до тех пор, пока от теории не требовались предсказания, подтверждаемые в экспериментах. Из теории тех времен следовало, что лабораторную плазму можно легко удерживать магнитным полем и нагревать до таких температур, когда становится возможным выделение термоядерной энергии. При попытках практического создания термоядерных реакторов сопоставление теории и действительности стало неизбежным. Результат этого сопоставления оказался катастрофическим. Хотя теория плазмы считалась общепризнанной, сама плазма не желала ей подчиняться. Более того, в плазме обнаружилось множество весьма важных эффектов, которые не вытекали из существовавшей теории. Постепенно стало очевидно, что нужно создавать новую теорию, но на этот раз такую, которая находится в тесном контакте с экспериментом.

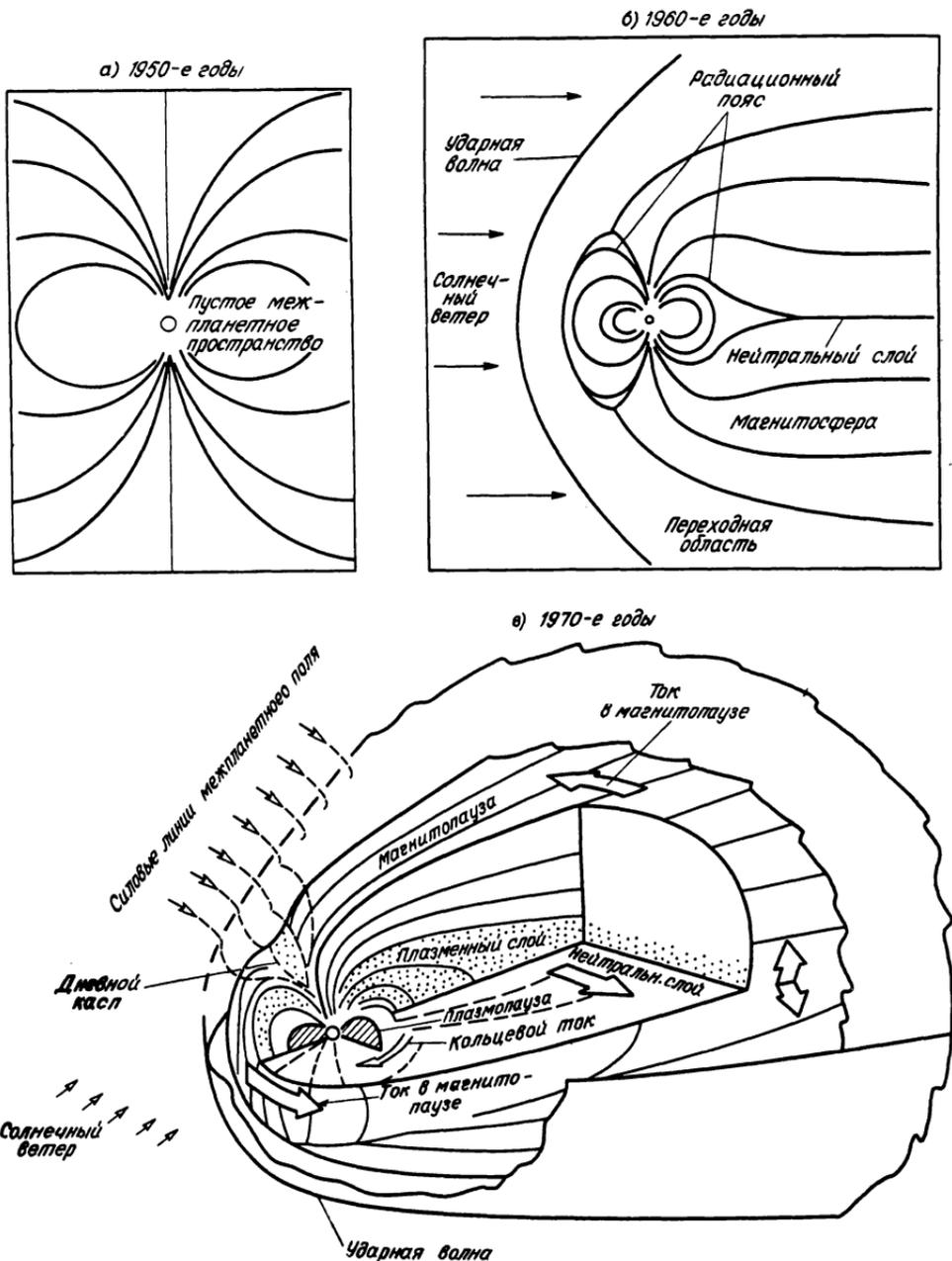


Рис. I.2. а) Вплоть до начала космической эры считалось общепринятым, что Земля окружена вакуумом, а ее дипольное поле не возмущено (за исключением периодов, когда происходят магнитные бури). б) С помощью первых измерений в космосе были обнаружены радиационные пояса, магнитопазе, нейтральный слой в хвосте и ударная волна. в) Новые измерения показали, что описание на языке магнитных полей становится все более сложным. Описание на языке электрических токов дает новую картину, изображенную на рис. III.14.

Отмеченный «термоядерный кризис» практически не оказал никакого влияния на космическую физику. Старая теория продолжала развиваться, поскольку, как правило, в ней исследовались явления, происходящие в областях пространства, недоступных для экспериментальной проверки. Тот факт, что исходные предпосылки некоторых теоретических построений не подтвердились на эксперименте, не учитывался. Кое-кто даже заявлял, что этот факт не доказывает несостоятельность существующей теории применительно к космическому пространству! Была проделана огромная работа по развитию этой теории, которая превратилась в гигантское умозрительное построение без какого-либо экспериментального подтверждения.

Следующий пересмотр соотношения теории и действительности произошёл тогда, когда благодаря космическим аппаратам магнитосфера и межпланетное пространство стали доступны для физических приборов. Первые экспериментальные данные интерпретировались на основании либо старых теорий, либо новых, но построенных на прежних основных принципах. Однако с совершенствованием наблюдательной техники стало очевидно, что некоторые из этих теорий неверны. Оказалось, что поведение космической плазмы является столь же сложным, как и поведение лабораторной плазмы, и следует тем же основным закономерностям. В результате все теории, развивавшиеся в отрыве от эксперимента, были опровергнуты данными наблюдений. Рис. 1.2 иллюстрирует радикальное изменение наших представлений об околоземном космическом пространстве, происшедшее за несколько последних десятилетий.

В настоящее время наши знания о лабораторной плазме получены с помощью весьма изощренных «диагностических» методов, в которых используются магнитные и электрические зонды, усовершенствованное лазерное зондирование и др. Знания о магнитосферной плазме получены с помощью не менее изощренных методов «диагностики», основанных на локальных измерениях в космическом пространстве. Конечно, эти измерения относятся только к тем областям пространства, которые доступны для космических аппаратов. Поскольку возможность проведения локальных измерений в более удаленных областях пространства сомнительна, встает вопрос, до какой степени мы сможем разобраться в поведении плазмы, находящейся в этих областях. Большая часть этой книги посвящена указанному вопросу.

## **1.2. ПЛАЗМЕННЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ЛАБОРАТОРИИ И КОСМИЧЕСКОМ ПРОСТРАНСТВЕ**

Имеются веские основания считать, что в нескольких важных проявлениях основные свойства лабораторной плазмы и космической совпадают. Однако поскольку линейный масштаб лабораторных экспериментов составляет, скажем, 0,1 м, то при приложении результатов этих экспериментов к магнитосферам планет или к солнечной магнитосфере

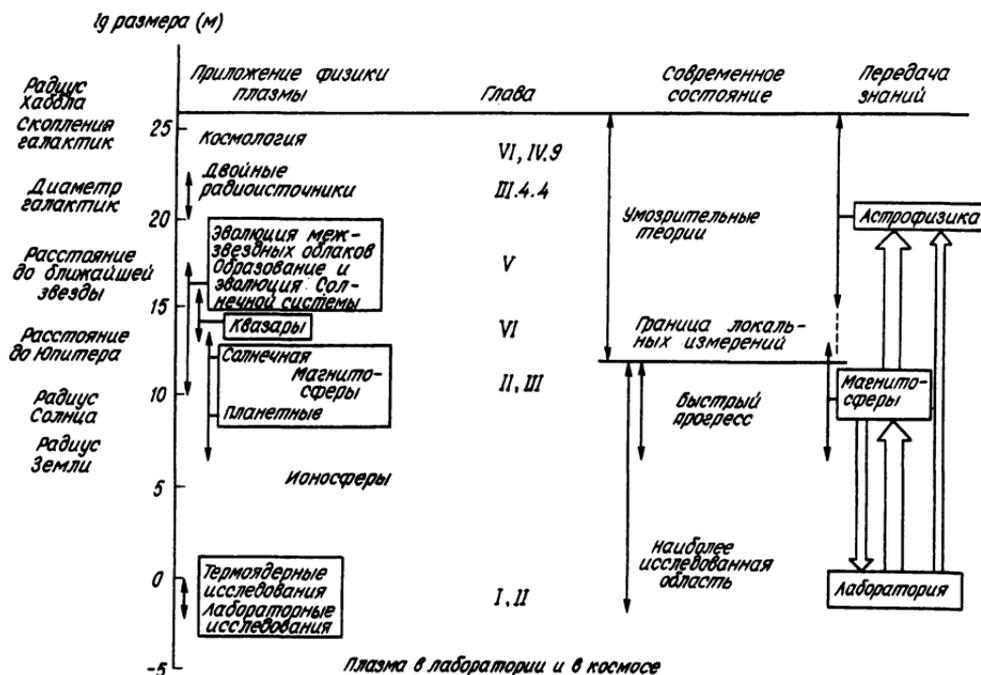


Рис. I.3. Плазма в лаборатории и в космосе. На диаграмме указаны области, представляющие интерес, и главы книги, где эти области рассматриваются. Отмечены также границы между областями, в которых возможны точные диагностические измерения, и теми областями, где такие измерения невозможны и исследования по необходимости носят умозрительный характер. В настоящее время осуществляется передача знаний, полученных в лаборатории, в область магнитосферных исследований, и наоборот. Аналогичным путем будут развиваться наши представления о более удаленных областях пространства.

(т. е. к гелиосфере или межпланетному пространству) необходимо вводить масштабный множитель порядка  $10^9 - 10^{12}$ . Если же мы хотим применить эти результаты к Галактике (включая исследование космологических проблем), мы должны ввести еще один множитель порядка  $10^9 - 10^{12}$  или больше. Часто переход от одной области к другой связан с большими трудностями, так как различные параметры плазмы подчиняются различным законам подобия.

На рис. I.3 перечислено несколько важных плазменных явлений. Возможно, что некоторые из них связаны между собой, однако для проверки этого следует вводить большой масштабный множитель. Следовательно, мы сможем достигнуть большего прогресса, если нам удастся применить знания, полученные при наблюдении лабораторной плазмы и магнитосферы, к более удаленным областям пространства. Ниже будет дан обзор проблем подобия.

### 1.2.1. Преобразования подобия

Развитие исследований по проблеме термоядерного синтеза привело к лучшему пониманию поведения лабораторной плазмы, и большая часть полученных здесь знаний может быть применена к космической плазме. Однако термоядерные исследования все больше концентрируются на тех проблемах, которые представляют технический интерес и не обязательно совпадают с проблемами, представляющими наибольший интерес в космической физике. Поэтому для сравнения поведения плазмы в различных режимах существенно проведение *лабораторных экспериментов, моделирующих космические явления*. Обзор таких экспериментов дан в [5–8]. В гл. II мы обсудим некоторые из этих экспериментов. Кроме того, в настоящее время стало возможным проводить эксперименты и в космическом пространстве.

Основные законы подобия найдены давно и суммированы, например, в книге [9] (более поздние результаты содержатся в обзоре [10]). Однако следует иметь в виду, что законы подобия зависят от математического формализма теории, который, возможно, применим лишь для пассивных плазменных областей (см. разд. II.9.1), поэтому вопрос о масштабном переходе от одной активной плазменной области к другой остается пока невыясненным.

До сих пор все гипотезы, которые высказывались перед первым запуском космического аппарата к какой-либо планете, как правило, не подтверждались. Конечно, эти гипотезы основывались на общепризнанных теориях подобия, и почти каждый новый запуск показывал, что наше понимание поведения космической плазмы пока еще совершенно недостаточно.

### 1.2.2. Модельные эксперименты

Первоначально считалось, что нетрудно придумать лабораторные эксперименты, в которых бы адекватно моделировались космические явления. Однако это оказалось возможным лишь в редких случаях, поскольку состояние плазмы определяется многими параметрами, которые зачастую подчиняются различным законам подобия. Проблема моделирования поведения космической плазмы с помощью лабораторных экспериментов весьма сложна. Существует два основных типа модельных экспериментов, которые оказались успешными.

Первый тип экспериментов заключается в *моделировании общей картины*. В этих экспериментах лабораторная установка обладает геометрической конфигурацией, моделирующей геометрию в космическом пространстве. (Опыт Биркеланда является примером таких экспериментов.) Однако необходимо помнить, что параметры лабораторной плазмы следует выбирать с помощью определенного критерия, чтобы лабораторная картина действительно соответствовала ситуации в космосе.

Второй тип экспериментов иногда называют «*моделированием процесса*». Это название означает, что в таких лабораторных экспериментах

исследуются основные законы поведения плазмы. Подобные эксперименты важны для построения общих теоретических основ физики плазмы. Результаты этих экспериментов показали, что многие выводы классической теории плазмы неверны, и еще раз подтвердили тот факт, что наука должна быть в основном эмпирической. Теория ценна только в том случае, если она развивается в контакте с действительностью.

Кроме лабораторных экспериментов широко используется *численное моделирование на ЭВМ*. Такое моделирование иногда способно заменить лабораторное. Однако оно никогда не сможет заменить моделирование процесса, так как в этом случае в вычислительную машину пришлось бы вводить все основные параметры плазмы, которые в свою очередь могут быть найдены только в эксперименте (в лаборатории или в космическом пространстве). Машина не может быть хорошим физиком, если таковым не является программист.

### **1.2.3. Сопоставление лабораторных и космических исследований**

По целому ряду причин осуществление лабораторных экспериментов проще локальных измерений в космосе. Обычно локальные измерения выполняются в точке пространства и в момент времени, определяемые орбитой аппарата, которая зачастую далека от оптимальной. Но и в рамках этих ограничений возможности измерений в космическом пространстве весьма ограничены. Проведение активных экспериментов в космосе является важным шагом к лучшему пониманию свойств реальной космической плазмы. Однако эти эксперименты были бы еще более плодотворными, если бы одновременно с ними проводились соответствующим образом разработанные лабораторные эксперименты.

Ценность лабораторных плазменных экспериментов состоит не только в моделировании. В прошлом в лаборатории без какой-либо связи с космическими исследованиями были обнаружены такие важные плазменные явления, как возникновение электрических полей вдоль магнитных силовых линий, электростатическое ускорение частиц в двойных слоях (II.6), волокнистая структура токов (II.4) и общая тенденция плазмы к неоднородности. Позднее эти явления стали использовать для интерпретации наблюдений в космосе. Можно надеяться, что в будущем космическая физика плазмы будет заимствовать у лабораторных плазменных экспериментов гораздо больше информации, чем в настоящее время.

## **1.3. ОПИСАНИЯ ПЛАЗМЫ С ПОМОЩЬЮ ПОЛЕЙ И ЧАСТИЦ**

Мы обсудили вопрос о том, как результаты, полученные в одной области, можно переносить в другую. Однако не менее важна проблема перевода описания плазменных явлений с языка магнитных полей на язык токов. Измерять магнитные поля в космическом пространстве от-

носителем просто, измерять же токи чрезвычайно сложно, а во многих случаях просто невозможно. Поэтому естественно представлять результаты исследования космического пространства (полученные с помощью космических аппаратов или астрофизических наблюдений) в виде карты распределения магнитного поля. Далее, в магнитной гидродинамике удобно исключать ток ( $\vec{i}$  — плотность тока), заменяя его выражением  $\text{rot } \vec{B}$ . Такая замена возможна при изучении целого ряда явлений (рис. 1.4).

### ПЕРЕВОДНАЯ ФОРМУЛА

$$\text{rot } \vec{B} = \mu_0 \vec{i}$$

#### ОПИСАНИЕ НА ЯЗЫКЕ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

Магнитные поля:

Измеряются довольно легко

Важны для понимания *анизотропных* свойств плазмы, включая *движение частиц высоких энергий*

Дают хорошее описание некоторых волн в плазме

#### ОПИСАНИЕ НА ЯЗЫКЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ТОКОВ

Электрические токи:

Непосредственные измерения затруднены, но

Существенны для понимания:

*Двойных слоев*

*Переноса энергии* из одной области в другую

*Токовых слоев*

*Ячеистой структуры* пространства

*Магнитных суббурь, солнечных вспышек*

Применяются в:

Пассивных плазменных  
областях

Активных плазменных  
областях

Дуализм в физике плазмы сходен с общим дуализмом поле — частица в физике. Описание на языке токов требует введения нового математического формализма, учитывающего *электрические цепи*, по которым протекают токи.

Рис. 1.4. Дуализм в физике плазмы.

Однако существует некоторый класс явлений, которые невозможно исследовать таким способом, и приходится вводить *явное выражение для плотности электрического тока*. Перевод описания плазменных явлений с языка магнитных полей на язык токов осуществляется с помощью первого уравнения Максвелла:

$$\text{rot } \vec{B} = \mu_0 \left( \vec{i} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right). \quad (1)$$

Обычно током смещения можно пренебречь. Тем не менее часто бывает удобно учитывать кинетическую энергию замагниченной плазмы введением проницаемости  $\varepsilon = \varepsilon_0 (1 + (c/V_A)^2)$ , где  $c$  — скорость света, а  $V_A$  — магнитогиродинамическая (альвеновская) скорость (см. [9], разд. 3.4.4). При таком определении ток смещения часто становится большим.

Как показано на рис. I.4, некоторые плазменные явления следует описывать на языке магнитных полей, другие же — на языке токов. Часто использование неподходящего языка при исследовании какого-либо явления приводит к неверным результатам. Более подробно эта проблема будет обсуждаться в гл. II.

К явлениям, которые невозможно понять без введения явного выражения для тока, относятся:

- А) Перенос энергии из одной области в другую (см. гл. II и III).
- Б) Образование двойных слоев (см. разд. II.6).
- В) Явления взрывного типа, например солнечные вспышки (разд. III.8), магнитные суббури (разд. III.5.1), а также, возможно, процесс «внутренней ионизации» в кометах [11, 12] и звездные вспышки.

Г) Нарушение изоротации Ферраро под действием двойных слоев (разд. III.3). Механизм установления «частичной коротации» существен для понимания некоторых свойств Солнечной системы (см. [13, гл. 17, 18]).

Д) Образование «волокон» в ионосферных полярных сияниях, солнечной атмосфере, туманностях и ионосфере Венеры (разд. II.4 и II.9.3).

Е) Образование токовых слоев, ответственных за «ячеистую структуру» космического пространства (разд. II.10 и гл. VI).

Исследования тех свойств плазмы, которые могут быть описаны на языке магнитных полей, были, как правило, успешными. Этого нельзя сказать, однако, о явлениях, которые невозможно понять с помощью такого подхода. В настоящей монографии будут в основном рассматриваться именно последние явления и будет сделана попытка описать свойства космической плазмы на языке частиц (электрических токов).

## I.4. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ КЛАССИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ

Классическая теория, основы которой были заложены Чепменом и Каулингом, оказалась подходящей для объяснений тех явлений, которые, согласно рис. I.4, описываются на языке магнитных полей. К этим явлениям относятся процессы распространения волн в плазме, а также движение заряженных частиц низкой энергии, включая отражение от магнитных зеркал. Однако реальная плазма обладает многими свойствами, которые нелегко описать с помощью классической теории. В то же время мы можем создать сильно нагретую плазму (например,

цеэиевую), которая будет абсолютно спокойной и хорошо описывается классической теорией (соответствующие ссылки можно найти, например, в книге [14]).

Однако, как только в этой спокойной плазме начинает течь *электрический ток*, сразу же обнаруживается целый ряд сложных явлений, для объяснения которых необходимо существенно модифицировать классическую теорию, а иногда и разрабатывать новую (см. гл. IV).

К наиболее важным из этих «аномальных» явлений относятся следующие:

а) Иногда плазма оказывается более «шумящей», чем это следует из теории.

б) *Распределение по энергиям* становится существенно *немаксвелловским*, появляется большой, а иногда и крайне большой избыток частиц чрезвычайно высоких энергий. Распределение по скоростям часто оказывается весьма анизотропным.

в) *Электронная температура* может на несколько порядков превосходить *ионную*, которая в свою очередь может оказаться существенно выше *температуры нейтрального газа*, последняя же может отличаться от температуры электродов и стенок разрядной трубки или от температуры пыли (в случае, если плазма «пыльная», см. разд. IV.7). Конечно, все эти эффекты можно учесть в классической теории, однако в астрофизике часто считают, что все перечисленные выше температуры *одинаковы*.

Далее, имеется обширный класс явлений, которые называются *плазменными «неустойчивостями»* [5]. Например:

г) При *достаточно большой плотности тока* плазма может *расслоиться на волокна* (разд. II.4).

д) Если плазма состоит из смеси газов, компоненты смеси часто *разделяются* (разд. IV.3).

е) Если *электронная скорость дрейфа* превосходит тепловую, могут возникнуть *двойные слои*. При определенных условиях эти слои могут *взрываться*, в результате чего генерируются мощные токовые импульсы, которые *ускоряют частицы плазмы* вплоть до энергий, сравнимых с энергией космических лучей (разд. II.6 и IV.10).

ж) При *плотностях тока*, превышающих определенное предельное значение, может произойти резкое увеличение удельного сопротивления плазмы на несколько порядков величины (так называемое *аномальное сопротивление*), объяснение этого явления до сих пор выглядит малоубедительным. (Иногда образование двойных слоев интерпретируют с помощью *аномального сопротивления*.)

з) Когда  $\beta$  (т. е. отношение давления газа к давлению магнитного поля) близко к единице, плазма может изменить свою геометрическую конфигурацию. Длинный список таких *неустойчивостей* включает *неустойчивость по отношению к изгибам* и *неустойчивость по отношению к перетяжкам*.

## 1.5. ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ. ВЛИЯНИЕ ВНЕШНЕЙ ЦЕПИ

При использовании классической теории или ее современной модификации граничные условия зачастую не принимаются во внимание. Так, при решении задач с переменными граничными условиями часто применяют либо модели безграничной плазмы, либо ограниченной плазмы, но со статическими граничными условиями. Это приводит, как правило, к абсолютно неверным результатам (примеры таких результатов даны в гл. III).

Во многих теориях считается само собой разумеющимся, что поведение плазмы определяется лишь локальными параметрами (например, концентрацией, температурой, магнитным полем). Однако такое утверждение тоже может привести к ошибочным результатам. Например, в случае плазмы, в которой  $\text{rot } \vec{B} \neq 0$  (т. е. при наличии в ней токов), поведение плазмы определяется не только локальными параметрами, но и параметрами *внешней цепи*, по которой замыкается ток  $I$  (разд. II.5). На рис. II.16 изображена простая цепь, состоящая из э. д. с.  $V_b$ , сопротивления  $R_0$  и индуктивности  $L$ . При изменении  $R_0$  и (или)  $L$  поведение плазмы резко меняется. От значения  $R_0$  зависит, будет ли плазма относительно устойчивой или в ней возникнут колебания. Если в плазме имеется двойной слой, то при его взрыве выделяется энергия цепи  $LI^2/2$ . Следовательно, мощность взрыва в плазме определяется в основном параметрами внешней цепи.

«Внешняя цепь» играет важную роль не только в лабораторных экспериментах, но и в космосе. В последнем случае полный объем, содержащий токи, влияет на поведение плазмы в каждой точке пространства. Часто для учета граничных условий удобно использовать «эквивалентные цепи» (гл. II и III).

## 1.6. ПРОБЛЕМЫ КОСМОЛОГИИ И ПРОИСХОЖДЕНИЯ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

В гл. II, III, IV поведение плазмы исследуется на основе результатов как лабораторных экспериментов, так и локальных измерений в магнитосфере (включая гелиосферу). Мы надеемся, что именно таким способом можно получить наиболее полную информацию об основных свойствах космической плазмы. Нам никогда не удастся получить столь же надежные сведения о плазме в чрезвычайно удаленных областях пространства. Однако, как отмечалось в работе [16], изучив основные свойства плазмы с помощью лабораторных экспериментов и локальных измерений в космосе, можно с большей уверенностью приступить к решению астрофизических проблем применительно к удаленным областям пространства, а не использовать более или менее умозрительные теории (как это часто делается в настоящее время). Поэтому

исследование магнитосферы важно для пополнения наших знаний не только о ней самой, но и о более удаленных областях пространства.

В последних двух главах этот метод применяется для исследования некоторых важных проблем астрофизики. В гл. V рассматриваются происхождение и эволюция нашей Солнечной системы, а в гл. VI — эволюция и современное строение нашей Вселенной (*проблемы космологии*).

## 1.7. ЦЕЛИ ДАННОЙ МОНОГРАФИИ

Говоря об основных целях настоящей монографии, можно отметить следующее:

1) Большое внимание уделяется вопросу о том, какую информацию можно получить, проводя систематическое сопоставление результатов, относящихся к различным областям, занятым плазмой. Мы будем рассматривать области, занятые плазмой, линейные размеры которых изменяются от лабораторных до радиуса Хаббла (см. рис. I.3).

2) Традиционное описание плазмы на языке магнитных полей дополняется описанием на языке электрических токов (см. рис. I.4). Показано, что многие проблемы проще решить, используя дуалистический подход.

3) Проводится строгое различие между областями плазмы, доступными для локальных диагностических измерений, и недоступными областями (см. рис. I.3). В первом случае можно надеяться, что мы поймем плазменные явления достаточно хорошо и будем в состоянии выбрать оптимальную их интерпретацию, во втором же случае наши выводы, очевидно, будут в основном носить умозрительный характер.

4) Автор этой монографии придерживается той точки зрения, что в последнем случае предпочтение должно отдаваться теориям, основанным на фактах, добытых с помощью лабораторных экспериментов или локальных измерений в областях, доступных для космических аппаратов. Теории же, основанные на других теориях, дающих неверные результаты при применении их к областям, где возможны точные диагностические измерения, не заслуживают большого доверия.

Поскольку в монографии такого объема невозможно провести строгое описание такой обширной и сложной области, как физика космической плазмы, при изложении мы придерживались мнения, высказанного Кадомцевым [17]: «Когда строгость вступает в противоречие с простотой, предпочтение отдается простоте».

Также невозможно дать полный список ссылок на существующую обширную литературу, поэтому в монографии цитируются лишь некоторые типичные результаты. Более полный список можно, как правило, найти в имеющихся в книге ссылках.

# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТОКИ В КОСМИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЕ

## II.1. ДУАЛИЗМ В ФИЗИКЕ

С начала нашего столетия физика стала дуалистической в том смысле, что одни физические явления описываются на языке полей, в то время как другие — на языке частиц. В космической физике можно найти много примеров такого дуализма: распространение волн исследуется с помощью уравнений Максвелла, а заряд, оседающий на макрочастицу в космосе, находится из рассмотрения процессов столкновений фотонов и электронов с этой частицей. Существуют также явления, такие, как эффект Доплера, которые можно описать как на языке волн, так и на языке частиц.

Все это хорошо известно, но не все до конца осознают, насколько глубоко этот дуализм проник в физику космической плазмы. Из первого уравнения Максвелла, которое в случае плазмы можно записать в виде

$$\operatorname{rot} \vec{B} = \mu_0 \vec{i}' \quad (1)$$

(где  $\vec{i}' = \vec{i} + \partial \vec{D} / \partial t$ , а в дальнейшем штрих мы будем опускать; сравните это уравнение с I(1)), следует, что электромагнитные явления в космическом пространстве можно описывать либо на языке магнитного поля  $\vec{B}$ , либо на языке токов  $\vec{i}'$ . Поскольку магнитные поля легко измерять и, более того, математическое описание упрощается при исключении  $\vec{i}'$ , кажется очевидным, что следует использовать язык полей и исключать из уравнений токи  $\vec{i}'$ . Например, распространение волн в плазме, безусловно, связано с электрическими токами, но во многих случаях мы можем заменить их ротором магнитного поля и в дальнейшем не рассматривать. Однако при такой процедуре мы теряем корпускулярный аспект электрического тока, иными словами, мы не учитываем, что ток в космическом пространстве создается движущимися заряженными частицами с определенными массой, зарядом и скоростью, совокупность которых можно часто рассматривать как газ с определенной температурой. Некоторые из перечисленных свойств можно формально учесть, вводя в полевое описание такие интегральные константы, как диэлектрическая ( $\epsilon$ ) и магнитная ( $\mu$ ) проницаемости и проводимость  $\sigma$ , однако такой способ дает ограниченное и часто ошибочное представление о характере поведения частиц.

С другой стороны, при исследованиях электрических разрядов, которые начались примерно сто лет тому назад и прояснили некоторые существенные свойства плазмы, используется язык частиц (движение

электронов и ионов, образование электростатических двойных слоев, установление немаквелловского распределения по скоростям и т. д.). Сейчас очевидно, что некоторые из явлений, описывающихся на языке частиц, играют решающую роль в поведении космической плазмы и что пренебрежение корпускулярным аспектом не позволяет понять некоторые из наиболее важных явлений в физике космической плазмы.

Далее, описание на языке магнитных полей часто используется небрежно, без учета граничных условий. К плазме, находящейся в области конечных размеров, применяются модели безграничной плазмы, что приводит к ошибочным результатам. При описании на языке токов проще учесть граничные условия, вводя полную замкнутую *цепь*, по которой течет ток.

В дальнейшем мы будем различать плазменные явления, описывающиеся на языке магнитных полей, и явления, описывающиеся на языке частиц (или электрических токов) (см. рис. 1.4). Первые явления изучаются давно, а на вторые лишь недавно было обращено пристальное внимание.

## II.2. ПЛАЗМЕННЫЕ ЯВЛЕНИЯ, ОПИСЫВАЮЩИЕСЯ НА ЯЗЫКЕ ЧАСТИЦ

При описании на языке частиц мы можем получить уравнение движения пробной частицы, суммируя все силы, действующие на нее со стороны всех остальных частиц. В принципе мы можем вообще не использовать понятие поля. Однако удобнее ввести электрическое поле  $\vec{E}'$  с помощью соотношения

$$\vec{F} = \sum \vec{f} = e\vec{E}', \quad (2)$$

где  $\vec{F}$  — сумма всех сил  $\vec{f}$ , действующих на пробную частицу с зарядом  $e$  (мы пренебрегаем гравитационными силами и столкновениями).

Движение заряженной частицы можно полностью описать с помощью электрического поля  $\vec{E}$ . Магнитное поле не оказывает силового воздействия на неподвижную частицу. Однако, совершая релятивистское преобразование

$$\vec{E} = \vec{E}' - \vec{v} \times \vec{B} \quad (3)$$

от системы координат, движущейся со скоростью частицы  $\vec{v}$  относительно неподвижной системы, мы получим в последней другое электрическое поле  $\vec{E}$ . При расчетах удобно использовать неподвижную систему координат и описывать движение частицы скоростью  $\vec{v}$ . В этой системе сила, действующая на заряженную частицу, равна

$$\vec{f} = e(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}), \quad (4)$$

где  $\vec{B}$  определяется уравнением (1).

Следовательно, в системе координат, связанной с частицей, магнитное поле  $\vec{B}$  не оказывает на нее никакого влияния, но его удобно вводить для упрощения расчетов  $\vec{E}'$ . (Данное утверждение тривиально, однако его часто забывают.)

### II.3. МАГНИТНЫЕ СИЛОВЫЕ ЛИНИИ

По определению магнитная силовая линия есть линия, которая в каждой своей точке параллельна направлению магнитного поля. Если в токовой системе происходят изменения, форма магнитных силовых линий меняется, однако совершенно бессмысленно говорить о перемещении магнитных силовых линий. Понятие «вмороженных магнитных силовых линий» сыграло важную роль в развитии физики плазмы из-за того, что в некоторых случаях, но далеко не во всех, такое представление законно. В книге [4, разд. 5.4] перечислены те ограничения, которые нужно помнить при использовании этого понятия. Более того, введение понятия «вмороженных силовых линий» непедагогично. При его использовании может возникнуть ощущение, что вы разобрались в какой-то проблеме, хотя на самом деле ваши выводы будут ошибочны.

Одно из условий, обеспечивающих законность использования понятия «вмороженных силовых линий», состоит в том, что  $E_{\parallel} = 0$ . Это условие выполняется, если электрическая проводимость в направлении, параллельном магнитному полю, т. е.  $\sigma_{\parallel}$ , равна бесконечности. Если использовать классическую формулу (см., например, [4, с. 172 русского перевода])

$$\sigma_{\parallel} = \gamma \frac{e^2 n_e \lambda_e}{m_e v_e}, \quad (5)$$

то нетрудно показать, что в космических условиях значение  $\sigma_{\parallel}$  обычно настолько велико, что его можно считать бесконечно большим (здесь  $e$  и  $m_e$  — заряд и масса электрона,  $n_e$  — концентрация электронов,  $\lambda_e$  и  $v_e$  — средняя длина свободного пробега и тепловая скорость электронов и  $\gamma$  — постоянная порядка единицы). Однако следует помнить, что существует целый ряд явлений, к которым соотношение (5) неприменимо. Эти явления обнаруживаются при трактовке электрических токов на языке отдельных частиц.

1) Уравнение (5) получено при условии, что средняя длина свободного пробега электронов  $\lambda_e$  мала по сравнению с характерными расстояниями, на которых изменяются величины  $\vec{B}$ ,  $\vec{E}$  и т. д. Это условие часто нарушается в космической плазме, например во внешней магнитосфере и в межпланетном пространстве.

2) Когда скорость дрейфа электронов сравнивается со скоростью звука в ионизованной плазме, может возникнуть сильное взаимодействие, в результате которого энергия электронов будет трансформироваться в энергию звуковых волн, этот эффект приводит к явлению *аномального сопротивления*.

3) Если электрическое поле в плазме настолько велико, что электроны приобретают в нем больше энергии, чем теряют при столкновениях, то некоторые электроны (*убегающие электроны*) могут разгоняться до очень больших скоростей [1—3; 4, разд. 4.3.4].

4) Если распределение по скоростям в плазме отличается от максвелловского, градиент магнитного поля может привести к появлению продольной составляющей электрического поля  $E_{\parallel} \neq 0$ .

5) При протекании электрических токов в плазме могут возникнуть электростатические двойные слои, на которых наблюдается скачок напряжения  $\Delta V$  (см. разд. II.6).

Поскольку перечисленные выше явления, как правило, существуют в космической плазме низкой плотности (особенно в «бесстолкновительной плазме»), условие применимости понятия «вмороженности» очень часто нарушается. В частности, использование этого понятия в сочетании с идеей о «пересоединении магнитных силовых линий» («слиянии магнитных полей») приводило к серьезным ошибкам при интерпретации многих важных явлений (см. разд. II.3.3, II.5.3 и [4, разд. 5.4]).

### II.3.1. Описания магнитосферы на языках магнитных полей и электрических токов

Чтобы показать ненужность и ошибочность использования понятий «вмороженности» и «пересоединения» магнитных силовых линий, рассмотрим простейший случай течения плазмы в магнитосфере в стационарном состоянии. Этот пример проиллюстрирует также соотношение между описаниями на языке магнитных полей и языке частиц.

Стационарная магнитосфера обычно изображается в виде картины распределения магнитных силовых линий (рис. II.1). Используя уравнение (1), преобразуем эту картину в картину распределения токов и частиц (рис. II.2). Внутри Земли мы помещаем токнесущую катушку, при правильном выборе характеристик которой магнитное поле будет совпадать с магнитным полем Земли. Если считать, что поле Земли дипольное и обладает осевой симметрией, то катушка может состоять из одного очень маленького кругового витка, помещенного в центре Земли.

Аналогичным образом можно считать, что межпланетное магнитное поле генерируется токами, текущими по катушке очень больших размеров. Чтобы воспроизвести простейшее межпланетное поле, направленное к югу, достаточно выбрать катушку Гельмгольца, ось которой совпадает с осью Земли.

К этим двум катушкам следует добавить еще несколько катушек, генерирующих вторичные магнитные поля. В упрощенной модели [6] таковыми будут: двойная катушка, моделирующая токовую систему на магнитопаузе, двойная катушка, моделирующая токовую систему в хвосте магнитосферы, и набор катушек, соответствующих ионосферно-магнитосферной системе токов (см. рис. II.2, где последняя система изображена отдельно). Считая, что витки катушки состоят из очень тонких

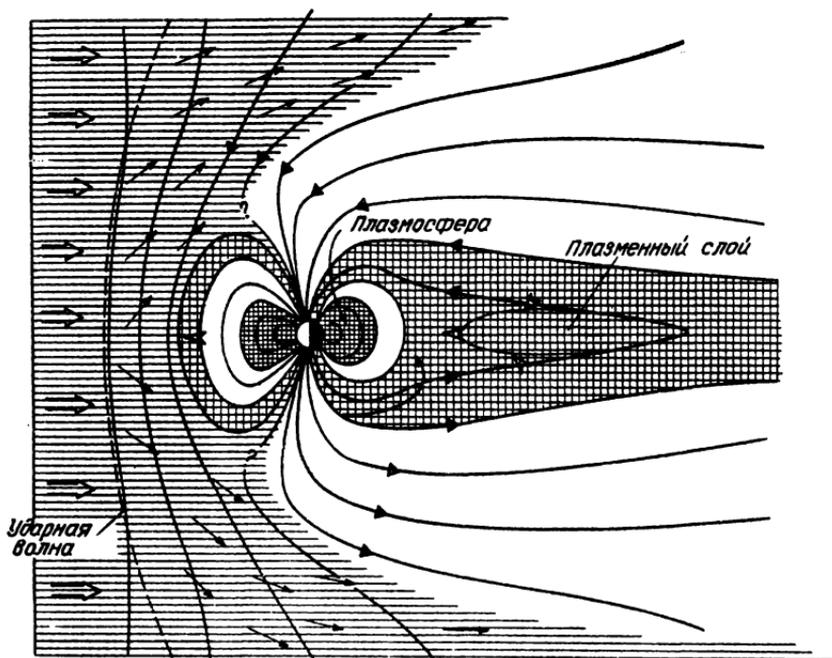


Рис. П.1. Стандартная модель солнечного ветра и магнитосферы [5].

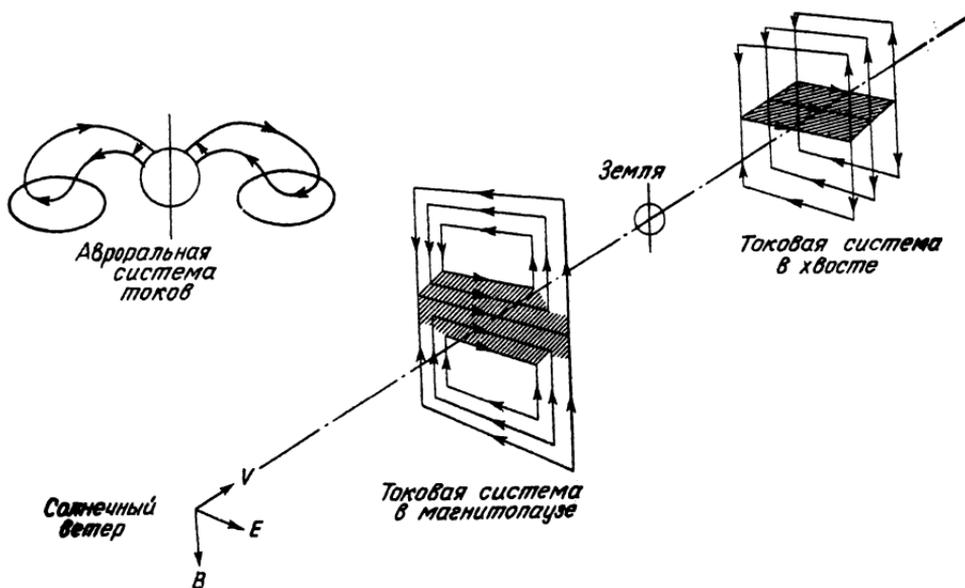


Рис. П.2. Упрощенная токовая система, дающая магнитное поле, изображенное на рис. П.1. Картина токов, текущих через зоны полярных сияний, увеличена и изображена отдельно.

электрически изолированных проводов, можно получить хорошее приближение токовой системы, которая на самом деле состоит из распределенных токов (токовая система, близкая к реальной, рассматривается в разд. III.6).

Далее мы моделируем электростатическое поле системой зарядов, расположенных в определенным образом подобранных точках пространства. Например, в простейшем случае  $\vec{v} = \text{const}$ ,  $\vec{B} = \text{const}$  межпланетное электрическое поле в системе координат, центр которой совпадает с центром Земли, выражается соотношением  $\vec{E} = -\vec{v} \times \vec{B}$ . Такое электрическое поле можно воспроизвести с помощью двух конденсаторных пластин, расположенных на большом расстоянии  $d$  друг от друга и заряженных до напряжения  $V = dE$ . Другие электрические поля, создаваемые пространственным зарядом, можно смоделировать таким же способом.

В стационарном состоянии, которое мы рассматриваем, и электрические, и магнитные поля статические. Мы можем изобразить магнитное поле картиной силовых линий (снова см. рис. II.1), но при этом следует помнить, что понятие магнитной силовой линии имеет максвелловский смысл, то есть это линия, в каждой точке совпадающая по направлению с магнитным полем. *Бессмысленно спрашивать, «движется» силовая линия или нет.* В нашей статической вакуумной модели эти линии естественно считать неподвижными относительно катушек, генерирующих магнитное поле, то есть относительно Земли.

### II.3.2. Движение частиц в магнитосфере

До сих пор в нашей модели отсутствовали подвижные заряженные частицы (вне проводов). В рамках этой вакуумной модели мы инжектируем теперь одну пробную заряженную частицу либо в межпланетное пространство, либо в ионосферу. Движение этой частицы полностью определяется электрическими и магнитными полями. Поскольку магнитное поле статическое, энергия частицы  $W$  дается выражением

$$W = W_0 + e \int \vec{E} ds, \quad (6)$$

где  $W_0$  — начальная энергия,  $ds$  — элемент длины,  $\vec{E}$  — электрическое поле неподвижных зарядов и  $e$  — заряд частицы.

В качестве следующего шага мы инжектируем большое число частиц солнечного ветра (и частиц ионосферы), которое, однако, по-прежнему составляет пренебрежимо малую долю  $\epsilon$  от числа частиц в реальном межпланетном пространстве. Если считать, что взаимными столкновениями частиц (а также столкновениями с элементами модели) можно пренебречь, то эти частицы будут вести себя как набор пробных частиц. При условии что наша модель построена верно, частицы увеличат пространственный заряд, соответствующий неподвижным зарядам модели, на относительную величину  $\epsilon$ , а их поток вблизи проводов увеличит магнитное поле на ту же самую относительную величину. Если теперь уменьшить все токи в катушках и все неподвижные заряды на эту вели-

чину  $\epsilon$ , то электрическое и магнитное поля примут значения, какими они обладали до ввода частиц. Следовательно, с помощью такого простого метода электромагнитные поля в стационарной магнитосфере можно полностью описать электрическими токами и зарядами. Такого рода модель исследуется в разд. III.6.

Будем теперь медленно увеличивать  $\epsilon$ , устремляя его к единице. Одновременно будем постепенно уменьшать до нуля токи в катушках и неподвижные заряды. Нетрудно сообразить, что такую процедуру можно осуществить таким образом, чтобы электрическое и магнитное поля оставались все время постоянными. Далее, мы можем убрать все элементы модели, но каждая частица будет продолжать двигаться и изменять свою энергию точно так же, как единственная пробная частица в вакуумной модели. Теперь наша модель описывает движение плазмы и изменение ее энергии в окружающем нас пространстве.

### **II.3.3. Выводы относительно «пересоединения магнитных силовых линий» и «слияния магнитных полей» в стационарной магнитосфере**

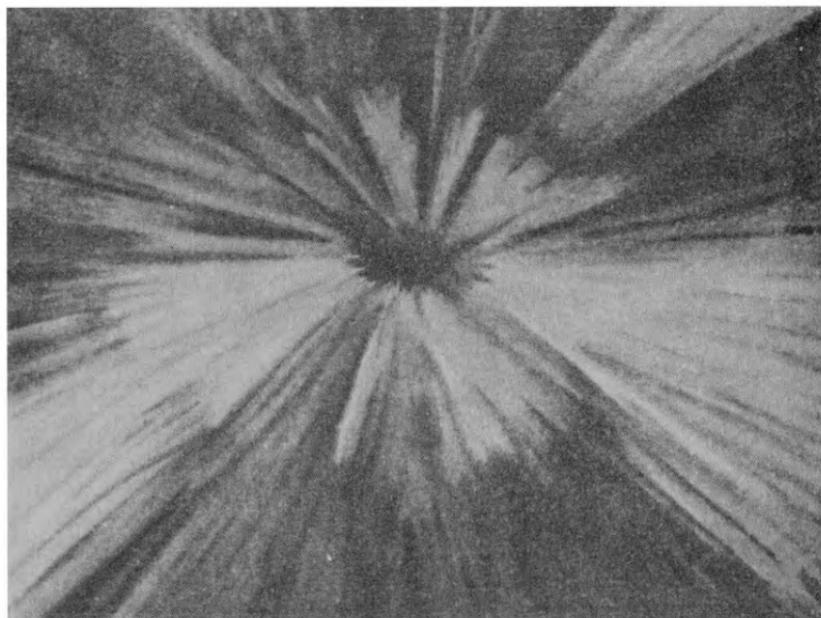
Наш мысленный эксперимент показывает, что введение в нашу модель одной частицы, небольшого количества частиц или даже всех частиц солнечного ветра не изменяет максвелловский смысл понятия магнитной силовой линии. Нет необходимости вводить такие понятия, как «вмороженные» силовые линии, движущиеся вместе с плазмой, тем более «пересоединение силовых линий» или «слияние магнитных полей». Магнитное поле все время остается статическим, и ни одна из силовых линий не «рассоединяется» и не «пересоединяется». Энергия заряженной частицы определяется соотношением (6). Не существует никакого явления «пересоединения силовых линий», способного передать энергию частице или высвободить энергию каким-либо другим образом. Другие аргументы против моделей пересоединения имеются в работе [7].

Если магнитное поле зависит от времени, то его геометрия вблизи нейтральных точек (точек, в которых  $\vec{B} = 0$ ) может изменяться таким образом, что это изменение будет напоминать рассоединение и пересоединение силовых линий. Может возникнуть соблазн использовать в этом случае обычную модель пересоединения силовых линий. Однако, как будет показано в разд. II.5, этого делать нельзя. Теория пересоединения силовых линий ошибочна и в этом случае.

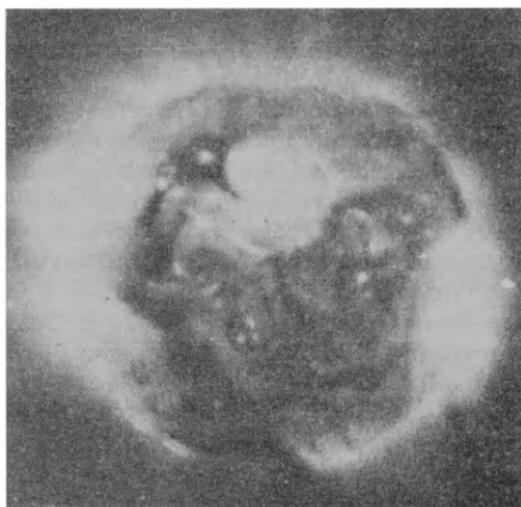
## **II.4. ВОЛОКНИСТЫЕ СТРУКТУРЫ**

### **II.4.1. Наблюдения волокнистых структур**

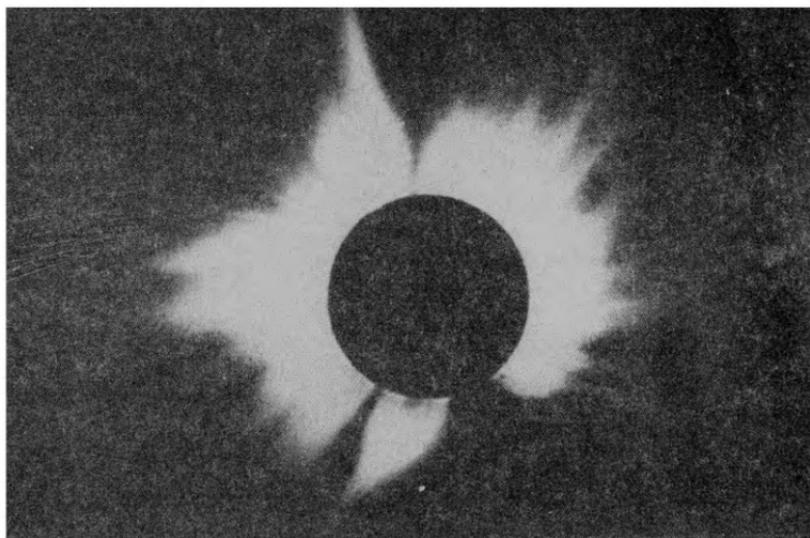
Волокнистые структуры часто наблюдаются в космической плазме. По-видимому, существует непрерывный переход от истинно волокнистых структур до слоистых, через объекты промежуточной структуры,



**Рис. П.3.** Лучи полярного сияния. Этот карандашный набросок Нансена (декабрь 1894 г.) дает лучшее представление о волокнистой структуре, чем фотографии, так как при фотографировании нужны выдержки, более продолжительные, чем времена флуктуаций в полярных лучах.



**Рис. П.4.** Фотография Солнца в мягких рентгеновских лучах, полученная с орбитальной станции «Скайлэб» (1973 г.). Виден целый ряд петель, которые отождествляются с областями повышенной плотности. Петлеобразные структуры могут быть образованы электрическими токами (фирма «Американ Сайенс Энжиниринг», США).



**Рис. П.5.** Солнечная корона (март 1970 г.). Волокнистая структура образована, по-видимому, электрическими токами. (Дж. Ньюкирк, Высокогорная обсерватория, США.)

имеющие эллиптическое поперечное сечение. Следовательно, с феноменологической точки зрения между волокнами и слоями нет принципиального различия.

В областях, доступных для локальных измерений, наблюдаются следующие волокнистые структуры, причем все они с той или иной степенью определенности связаны с электрическими токами.

а) В полярных сияниях очень часто наблюдаются *волокна*, параллельные магнитному полю (так называемые «лучи полярного сияния», см. рис. П.3). Они иногда бывают очень тонки и имеют толщину всего лишь около 100 м. Волокна возникают при условиях, которые указывают на их связь с *токами Биркеленда*. Однако прямые измерения до сих пор не выявили окончательно связь между наблюдаемыми структурами и электрическими токами. Это также относится и к таким очень тонким образованиям, как *дуги и драпьи полярных сияний*. Сама *авроральная электроструя* обладает волокнистой структурой, и, конечно, не возникает сомнений, что она несет электрический ток.

б) «Явления перевернутого V» и локальные измерения сильных электрических полей в магнитосфере (разд. П.7), особенно на высотах порядка одного радиуса Земли над ее поверхностью, свидетельствуют о наличии волокнистых структур. Эти структуры, которые часто обладают эллиптическими или слоистыми поперечными сечениями, создаются, по всей видимости, токами Биркеленда.



Рис. II.6. Комета Когоутека (январь 1974 г.). Согласно Мендису [8], волокнистая структура хвоста кометы связана с электрическими токами.

в) В ионосфере Венеры наблюдаются «магнитные жгуты», структура которых свидетельствует о том, что они обязаны своим существованием нитевидным токам. Их диаметр обычно порядка 20 км (разд. II.4.7).

В областях, недоступных для локальных измерений, также часто наблюдаются волокнистые структуры:

г) На Солнце: протуберанцы, спикулы, корональные лучи, полярные щеточки и т. д. (рис. II.4 и II.5). Во всех случаях имеются более или менее убедительные доводы, что эти волокнистые структуры создаются токами, текущими вдоль магнитных силовых линий.

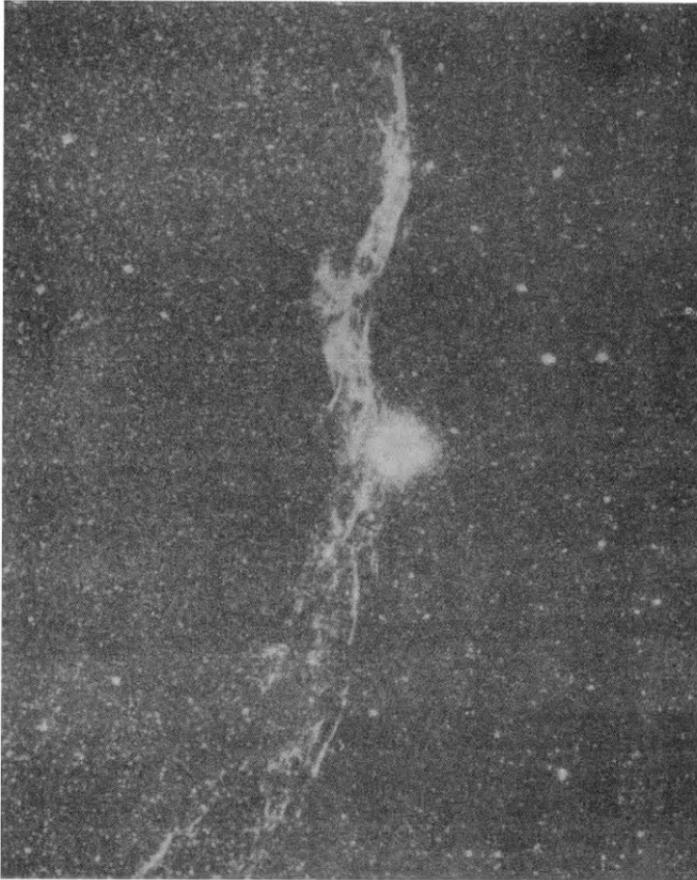
Интересно отметить тот факт, что применение метода усиления контрастности более отчетливо раскрывает волокнистость структур. (Конечно, следует всегда помнить, что при использовании этого метода могут возникнуть ложные структуры).

д) Хвосты комет часто обладают хорошо выраженной волокнистой структурой. Она естественно интерпретируется с помощью картины токов, текущих вдоль силовых линий [8] (рис. II.6).

е) В межзвездном пространстве наблюдается большое разнообразие волокнистых структур (рис. II.7 и II.8). Некоторые из них считаются связанными с фронтами ударных волн, образующихся при взрывах новых или сверхновых звезд. Поскольку в гидромагнитной ударной волне обязательно имеются электрические токи, интерпретация на языке ударных волн не противоречит интерпретации на языке электрических токов. Более того, тот факт, что волокна наблюдаются там, где мы ожидаем на-



**Рис. П.7.** Туманность Петля в созвездии Лебедя. Ее волокнистая структура, по-видимому, возникла в результате взрыва сверхновой.



**Рис. П.8.** Небольшой участок туманности Петля (Sky and Telescope, ноябрь, 1979).

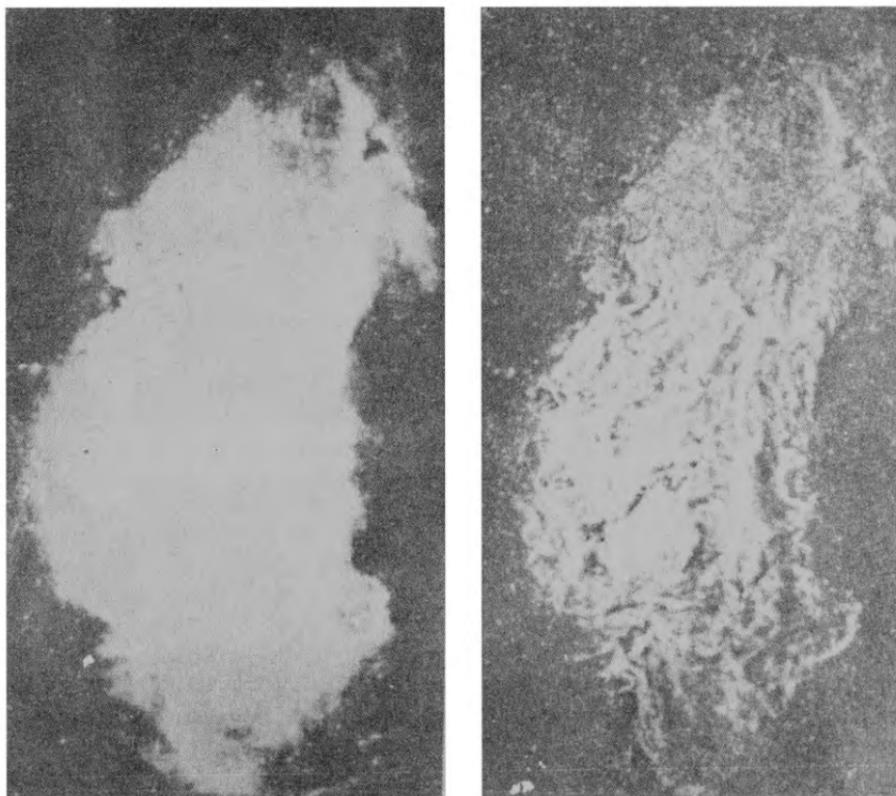


Рис. П.9. Волокнистые структуры встречаются в космическом пространстве чаще, чем обычно считают. Это иллюстрируется сравнением фотографии туманности Лагуна в созвездии Стрельца (слева) с той же фотографией, но обработанной методом повышения контрастности (справа) (Sky and Telescope, апрель, 1979).

йти фронты ударных волн, несущие токи, говорит в пользу токовой интерпретации.

ж) Межзвездные облака (или туманности), которые выглядят гладкими и довольно однородными на обычных снимках, часто обнаруживают волокнистую структуру после применения метода усиления контрастности (рис. П.9 и П.10). С точки зрения токовой интерпретации волокнистых структур указанный факт свидетельствует о том, что они состоят из токовых систем (такой же вывод следует и из других соображений, разд. V.3).

Кроме интерпретации волокнистых структур на языке электрических токов следует иметь в виду и другие возможные интерпретации. Было



Рис. II.10. Фотография туманности Ориона, обработанная методом повышения контрастности (Sky and Telescope, апрель, 1979).

высказано предположение, что волокнистость возникает вследствие гидродинамического течения со сдвигом. Например, если в стакан воды, которая находится в турбулентном движении, попадает капля чернил, эта капля, растекаясь в воде, часто образует тонкие волокна. Перистые облака являются другим примером волокнистой структуры.

Эти примеры относятся к явлениям, связанным с гидродинамическим движением в областях, где электромагнитные силы незначительны. Однако, во всех областях, где доминируют плазменные эффекты и возможны локальные измерения, по-видимому, нет ни одного примера подобных гидродинамических явлений. Ни одну из наблюдаемых во-

локнистых структур невозможно хоть с какой-то долей определенности объяснить этими явлениями, и в то же время для всех таких структур можно либо дать строгую интерпретацию, либо привести весьма разумное объяснение на языке электрических токов. В отношении структур, наблюдаемых вне области, доступной для космических аппаратов, нельзя с полной уверенностью решить, какая из интерпретаций верна. Однако, если следовать нашей руководящей идее, а именно пытаться объяснять явления, наблюдаемые в более удаленных областях пространства, с помощью механизмов, обнаруженных в более исследованных областях, то токовой интерпретации следует отдать предпочтение.

#### II.4.2. Сжимающийся разряд

Разряд может заполнять все пространство между электродами или может быть ограничен узким каналом. К первому случаю относится лабораторный тлеющий разряд низкого давления. Примерами второго случая могут служить дуги, искры, вспышки молний и «самосжатые разряды», изучаемые в термоядерных исследованиях.

В лабораторных разрядах, особенно при низкой степени ионизации, сжатие зачастую связано с «падающей характеристикой». Это означает, что электрическое поле, необходимое для поддержания разряда, является убывающей функцией плотности тока (разд. II.5). Если задан полный ток разряда, то при концентрации тока в узком канале напряженность электрического поля уменьшается по сравнению с напряженностью поля разряда, заполняющего все пространство. Нередко разряд развивается таким образом, что напряженность поля принимает минимальное значение.

На сжатие разряда оказывают влияние несколько различных факторов (см. книги [9, 10], которые, вероятно, остаются лучшим введением в эту область).

*Механизм теплового сжатия* действует в электрической дуге. Плазма дуги подчиняется довольно сложным закономерностям, действие которых состоит в том, что нагрев, обусловленный электрическим током, компенсирует тепловые потери, связанные главным образом с конвекцией и теплопроводностью, переносящими тепло к холодным периферийным областям. Как можно показать, в результате этого при атмосферном давлении разряды обычно сжимаются, тогда как при более низком давлении, например 1 мм рт. ст., сжатие разряда представляет собой довольно редкое явление.

Механизм теплового сжатия действует независимо от наличия магнитного поля. Однако *магнитные эффекты* сами по себе могут привести к явлениям сжатия различных типов.

Сжиматься могут токи, перпендикулярные полю  $B$ . Примерами таких явлений в ионосфере являются *экваториальные* и *авроральные электроструи*.

Однако в космической плазме наиболее важным механизмом сжатия, вероятно, является *электромагнитное притяжение параллельных*

токов. Одним из проявлений этого механизма служит *пинч-эффект*, который впервые был изучен Беннеттом еще в 1934 г. [11] и который позднее привлек внимание в связи с термоядерными исследованиями. Как мы увидим, явления такого типа должны осуществляться и в космических масштабах, где они приводят к формированию волокнистой структуры токов и магнитных полей или к образованию «магнитных жгутов». Этот эффект обычно сопровождается перераспределением вещества, и им можно объяснить то разнообразие *волокнистых структур*, которое, согласно наблюдениям, проявляет вещество в космическом пространстве (разд. II.4.1). Под действием такого же механизма может происходить откачка вещества из областей, расположенных вблизи «магнитных жгутов», в результате чего образуются чрезвычайно разреженные зоны (разд. II.4.6).

Явление электромагнитного притяжения, включая пинч-эффект, было тщательно изучено в лабораторных экспериментах. Так, действие магнитных ловушек, используемых для удержания термоядерной плазмы, основано на пинч-эффекте. Однако при исследовании космической плазмы об этом эффекте часто забывают. Например, образование и эволюцию межзвездных облаков обычно рассматривают без учета пинч-эффекта, хотя он играет в указанных процессах первостепенную роль (разд. IV.8 и V.4). В результате развитие этой области астрофизики, как и некоторых других ее областей зашло в тупик.

### II.4.3. Пинч-эффект. Соотношение Беннетта

Рассмотрим цилиндрический столб полностью ионизированной плазмы в аксиальном электрическом поле  $\vec{E}$ , которое создает аксиальный ток плотности  $\vec{i}$  (см. рис. II.11 и [4, разд. 5.5.2]). Аксиальный ток генерирует азимутальное магнитное поле. Собственное магнитное поле тока действует на него с силой  $\vec{i} \times \vec{B}$ , которая направлена по радиусу к центру и приводит к сжатию плазмы к оси (отсюда название «пинч-эффект», так как «pinch» означает «сжимать»). Если сжимающая электромагнитная сила уравновешена суммой  $p$  давлений электронов  $p_e$  и ионов  $p_i$ , то

$$\nabla p = \nabla(p_e + p_i) = \vec{i} \times \vec{B}. \quad (7)$$

Аксиальное электрическое поле перпендикулярно азимутальному магнитному полю, создаваемому аксиальным током. Тем не менее в состоянии равновесия плотность тока определяется выражением

$$\vec{i} = \sigma \vec{E}. \quad (8)$$

Это связано с тем, что в плазме, находящейся в стационарном состоянии, не может протекать радиальный ток Холла.

Используя уравнение Максвелла  $\text{rot } \vec{B} = \mu_0 \vec{i}$ , уравнение (7) и уравнение состояния для идеального газа, нетрудно получить соотношение

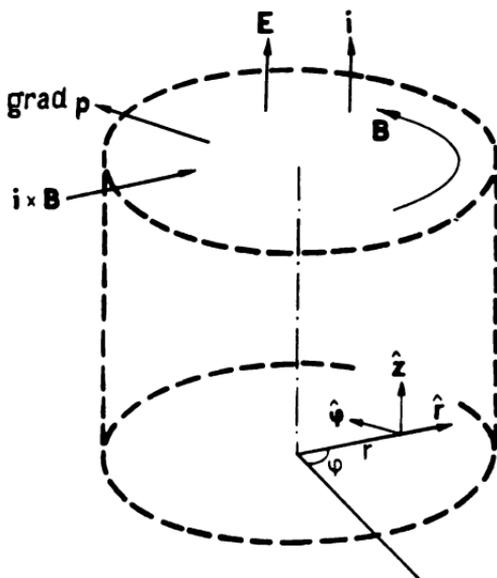


Рис. II.11. В стационарном пинче электромагнитная сила (сила притяжения между параллельными токами) уравновешивается градиентом плазменного давления.

Беннетта (подробный вывод дан в разд. IV.8)

$$2Nk(T_e + T_i) = \frac{\mu_0}{4\pi} I^2, \quad (9)$$

где  $N$  — число электронов на единицу длины столба,  $T_i$  и  $T_e$  — ионная и электронная температуры,  $I$  — полный ток в столбе и  $k$  — постоянная Больцмана.

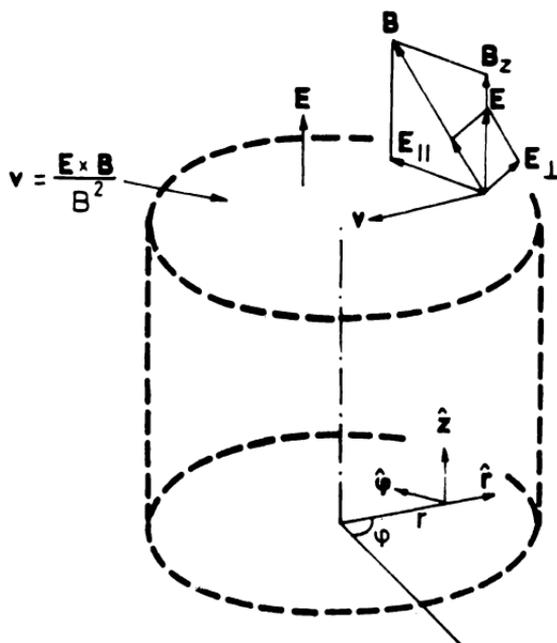
#### II.4.4. Нитевидные токи в бессилловых магнитных полях

В лабораторном пинче электрический ток может течь перпендикулярно собственному магнитному полю, поскольку электромагнитные силы уравновешены давлением плазмы и радиальное движение отсутствует. В космической плазме давление нередко оказывается пренебрежимо малым, и, следовательно, магнитное поле является бессилловым.

Рассмотрим плазму средней плотности, имеющую конфигурацию, представленную на рис. II.12. Электрическое поле однородно и направлено вдоль оси  $z$ . Магнитное поле, которое может вызываться токами, текущими в плазме, и за счет внешних источников, имеет  $\phi$ - и  $z$ -компоненты.

Под действием электрического и магнитного полей как электроны, так и ионы дрейфуют со скоростью

$$\vec{v} = (\vec{E} \times \vec{B})/B^2 \quad (10)$$



**Рис. II.12.** Когда давление пренебрежимо мало, плазма приобретает такую скорость дрейфа  $\vec{v}$ , что электрическое поле в движущейся плазме оказывается параллельным магнитному полю  $\vec{B}$ . В результате ток течет вдоль магнитных силовых линий.

таким образом, что вся плазма движется по радиусу к оси. В системе координат, движущейся вместе с плазмой, электрическое поле будет параллельно магнитному, и, следовательно, ток будет течь только вдоль магнитных силовых линий. Более того, поскольку магнитная сила равна  $\vec{j} \times \vec{B}$ , она обращается в нуль и магнитное поле оказывается бессильным.

В книге [4, разд. 5.5.3] показано, что ток в этой конфигурации сосредоточен внутри тонкого цилиндра и образует линейный ток. Там же показано, что аксиальное магнитное поле сосредоточено внутри того же цилиндра, так что на большом расстоянии от оси оно имеет практически только азимутальную компоненту (рис. II.13). Качественная картина магнитных силовых линий, показанная на рис. II.14, действительно напоминает «магнитные жгуты».

Здесь мы предполагали, что проводимость плазмы постоянна, однако в работе [12] показано, что аналогичные результаты получаются для бессильных полей при значительно более общих условиях.

Как было упомянуто выше, электрическое и магнитное поля вызывают дрейф частиц по направлению к оси, в результате которого происходит накопление вещества. Поэтому должна наблюдаться тенденция совмещению «магнитных жгутов» с волокнами вещества, имеющими

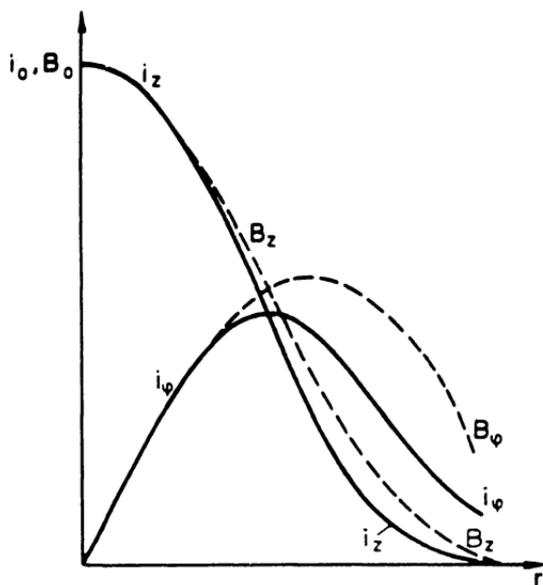


Рис. II.13. На рисунке  $i_\phi$  и  $i_z$  обозначены компоненты плотности тока,  $B_\phi$  и  $B_z$  — компоненты магнитного поля,  $i_0$  — амплитудное значение плотности тока, а  $B_0$  — максимальное значение магнитного поля (как  $i_0$ , так и  $B_0$  направлены вдоль оси  $z$ ).

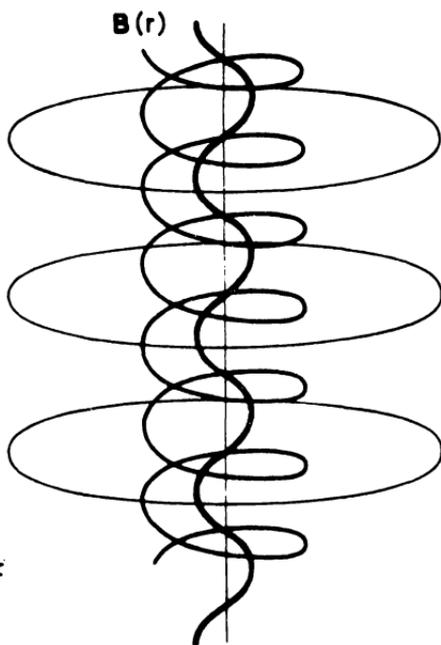


Рис. II.14. Магнитные силовые линии на различных расстояниях от оси в магнитном жгуте.

более высокую плотность, чем окружающая среда. Космические «магнитные жгуты» сами по себе не наблюдаются, но связанные с ними волокна конденсированного вещества можно наблюдать по излучению, которое они испускают и поглощают. Электрический ток в «магнитном жгуте» теряет энергию, поэтому можно было бы ожидать, что температура в жгуте выше температуры окружающей среды. Однако такое заключение не всегда верно, так как при увеличении плотности становится существенным эффект радиационного охлаждения, и в результате температура в жгуте может оказаться меньше температуры окружающей среды. В качестве примера можно привести солнечные протуберанцы, температура которых значительно ниже температуры окружающей короны, поскольку их плотность, а следовательно, и радиационные потери существенно больше, чем в окружающей среде. Таким образом, рассмотренный механизм сжатия объясняет волокнистую структуру, которая, как было показано в разд. II.4.1, весьма распространена в космической плазме (волокнистые межзвездные облака, корональные волокна, протуберанцы и т. д.). Как отмечалось в разд. II.4.2, пренебрежение эффектом

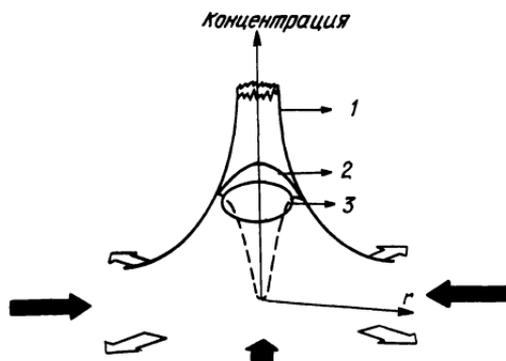


Рис. II.15. Качественная (трехмерная) картина распределения концентрации частиц плазмы для трех случаев. 1 – рекомбинация отсутствует, 2 – рекомбинация происходит при  $T = \text{const}$  и 3 – рекомбинация происходит при возрастании температуры от оси  $dT/dr > 0$ . Черными стрелками показан дрейф плазмы

со скоростью  $\frac{\vec{E} \times \vec{B}}{B^2}$ , светлыми – диффузия нейтрального газа.

электромагнитного притяжения привело к тому, что в некоторых областях астрофизики исследования базируются на теориях, которые не верны в своей основе.

#### II.4.5. Теория «магнитных жгутов»

В работе [13] была проанализирована структура нитевидных токов, или «магнитных жгутов», собирающих ионизованный газ из окружающей среды (рис. II.15). Было рассчитано результирующее стационарное состояние, которое устанавливается, когда дрейф ионов и электронов в направлении оси жгута компенсируется рекомбинацией и последующей диффузией нейтрального газа наружу. Как правило, равновесная плотность плазмы оказывается максимальной на оси. Однако при некоторых условиях волокна могут принимать форму полого цилиндра, в котором ионная плотность минимальна на оси. Магнитные жгуты наблюдались при прямых измерениях в ионосфере Венеры (см. разд. III.5.3).

В случае частично ионизованной газовой смеси наличие температурного градиента приведет к тому, что радиальный дрейф будет зависеть от потенциала ионизации, в результате чего элементы с меньшим потенциалом ионизации перенесутся ближе к оси. Можно ожидать, что различные элементы распределятся по цилиндрическим оболочкам, радиусы которых увеличиваются с ростом потенциала ионизации.

Вообще, протекание тока в частично ионизованном газе способно, по всей видимости, вызывать разделение элементов в широком диапазоне параметров плазмы (см. разд. IV.3).

### II.4.6. «Ионные насосы»

Дрейф ионизованного вещества из окружающей среды внутрь «магнитного жгута» означает, что последний действует подобно *ионному насосу*, откачивающему плазму из окружающей среды. В результате могут возникать области исключительно низкой плотности. Возможно, что «корональные дыры» образуются под действием именно такого механизма.

### II.4.7. «Магнитные жгуты» в ионосфере Венеры

В работе [14] приводятся результаты прямых измерений токовой системы в ионосфере Венеры. Были обнаружены «магнитные жгуты», сходные с теми, которые обсуждались в разд. II.4.5. Из измерений следует, что в спокойных условиях «магнитные жгуты» повсеместно наблюдаются в дневной ионосфере. Их диаметры порядка 15–20 км. Измерения показывают, что градиент газокINETического давления в них мал, т. е. член  $\vec{v} \times \vec{B}$  должен быть небольшим. Наблюдаемую структуру магнитного поля можно сравнить с теоретической для «магнитного жгута». Удовлетворительное согласие между ними вполне очевидно.

Этот факт является первым убедительным экспериментальным доказательством правильности теоретических моделей нитевидных токов, образующих «магнитные жгуты». Дальнейшее изучение свойств «магнитных жгутов» в ионосфере Венеры крайне необходимо, поскольку эти свойства определяют структуру электрических токов в космической плазме. Следует также продолжать поиск подобных структур в других областях пространства.

## II.5. ЛОКАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ПЛАЗМЫ И ЭКВИВАЛЕНТНЫЕ ЦЕПИ

Рассмотрим плазму в разрядной трубке, в которой ток  $I$  создается внешним источником напряжения с э. д. с.  $V_b$  и протекает по цепи с сопротивлением  $R_0$  и индуктивностью  $L$  (рис. II.16). Напряжение на электродах трубки  $V(I)$  зависит от тока  $I$  и таких параметров плазмы, как плотность, величина магнитного поля, температура и т. д., которые в свою очередь являются сложными функциями  $I$ . Будем считать, что в первом приближении  $V(I) = V_0 + R(I - I_0)$ , где  $I_0$  и  $R$  — постоянные, а  $V_0$  — напряжение на электродах при  $I = I_0$ . Тогда уравнение цепи можно записать в виде

$$L \frac{dI}{dt} = V_b - V_0 - (R + R_0)(I - I_0). \quad (11)$$

При  $R + R_0 = 0$  плазма будет находиться в равновесии и  $V_0 = V_b$ . Если  $R + R_0 > 0$  и  $V_0 = V_b$ , ток будет уменьшаться до тех пор, пока не на-

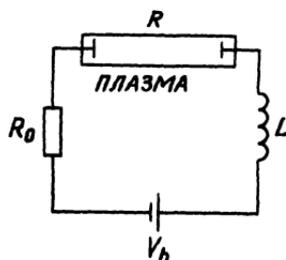


Рис. II.16. Цепь с плазменной трубкой. Поведение плазмы зависит от параметров цепи. Если плазма обладает отрицательным сопротивлением  $R$ , она будет колебаться при  $R_0 + R < 0$ . Следовательно, изменяя  $R_0$ , мы можем управлять колебаниями. Далее, индуктивность  $L$  определяет частоту колебаний и полное выделение энергии при запираании тока, текущего через плазму. Таким образом, даже если нам известны все параметры плазмы (температура, давление, намагниченность и т. д.) в трубке, мы не можем предсказать ее поведение, если не знаем параметры цепи, частью которой является плазменная трубка.

ступит равновесие. Если же  $R + R_0 < 0$  (что часто бывает, так как величина  $R$  может быть отрицательной), равновесие невозможно. При этом в плазме возникают колебания с частотой  $f$  или же ток в ней спадет до нуля с определенной постоянной времени. В последнем случае разряд в трубке либо будет периодически зажигаться, либо погаснет (см. разд. II.6.1 и II.6.5).

Таким образом, поведение плазмы зависит от внешней цепи. При уменьшении  $R_0$  устойчивый плазменный разряд может стать неустойчивым. Частота колебаний изменяется с изменением  $R_0$  или  $L$ , и, конечно, разрядный ток существенно зависит от  $V_b$ .

В случае неустойчивости, приводящей к запираанию трубки, следует иметь в виду, что любая электрическая цепь способна к взрыву в том смысле, что при размыкании тока в месте размыкания выделяется энергия, накопленная в индуктивности:

$$W_L = \frac{1}{2} LI^2. \quad (12)$$

Это явление хорошо известно в технике мощных передающих линий: размыкание тока обязательно сопровождается взрывом, энергия которого должна поглощаться в размыкателе.

Если размыкание тока происходит под действием плазменной неустойчивости, индуктивная энергия цепи  $W_L$  выделяется в плазме. Это выделение энергии происходит в форме взрыва, который может оказаться чрезвычайно мощным, если энергия  $W_L$  велика. Как мы увидим позже, запираание тока в плазме часто происходит из-за того, что двойной слой становится неустойчивым.

### II.5.1. Граничные условия

Рассмотрим объем  $V$ , ограниченный замкнутой поверхностью  $S$ . Свойства плазмы внутри поверхности  $S$  зависят от граничных условий. Так, изменяя ток через  $S$ , можно изменить поведение плазмы. Как было показано в предыдущем разделе, свойства плазмы определяются всей цепью, по которой течет ток. Это означает, что описание плазмы внутри поверхности с помощью параметров, относящихся только к объему  $V$ , справедливо лишь в том случае, когда  $\vec{i}=0$  в каждой точке поверхности  $S$ .

Следовательно, даже если нам известны все параметры плазмы (плотность, температура и намагниченность) в каждой точке внутри  $S$ , мы можем теоретически описать свойства плазмы только тогда, когда отсутствуют токи, пересекающие поверхность. Поэтому все краевые задачи следует анализировать особенно осторожно.

### II.5.2. «Невидимая» передача энергии

Описание на языке токов показывает, что может существовать «невидимая» передача энергии. В качестве примера рассмотрим передачу энергии в электрической цепи, эквивалентной авроральной токовой системе (рис. II.17). Здесь происходит передача энергии от движущегося плазменного облака  $C$  в область  $D$ , где она выделяется, посредством электрических токов, текущих вдоль силовых линий  $B_1$  и  $B_2$ ; между  $B_1$  и  $B_2$  существует разность потенциалов (см. разд. III.2): Как ток, так и разность потенциалов чрезвычайно трудно обнаружить даже с помощью прямых локальных измерений, а с большого расстояния наблюдать их практически невозможно. При наблюдении с большого расстояния мы видим, что энергия в области  $C$  уменьшается (например, движение облака замедляется), а в области  $D$  энергия выделяется (например, в форме излучения из этой области). Таким образом, налицо механизм «невидимой» передачи энергии на большие расстояния. Возможно, что такой механизм работает в двойных источниках радиоизлучения (разд. III.4.4).

«Невидимый» механизм передачи энергии характерен для многих электрических цепей. Например, когда мы наблюдаем Землю со спутника или самолета, мы легко различаем уличные огни, в которых происходит выделение электрической энергии, а также можем разглядеть гидроэлектростанции, генерирующие эту энергию, но вряд ли мы увидим, как она передается. Во многих важных случаях механизм передачи энергии в космической физике очень сходен с соответствующим механизмом в электротехнике.

### II.5.3. Теории «слияния магнитных полей»

Мы установили, что плазменные явления внутри ограниченного объема можно описать только в том случае, когда отсутствует ток,

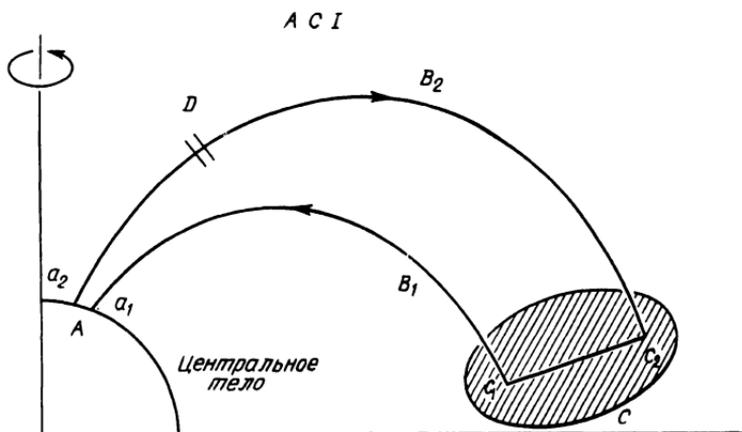


Рис. II.17. Авроральная цепь (вид со стороны Солнца). Центральное тело (Земля и ионосфера) обладает дипольным полем.  $B_1$  и  $B_2$  — магнитные силовые линии тела,  $C$  — плазменное облако в экваториальной плоскости, движущееся в направлении Солнца (на нас) и генерирующее электродвижущую силу

$V = \int_{C_1}^{C_2} \vec{v} \times \vec{B} \cdot d\vec{s}$ , которая поддерживает ток в цепи  $C_1, a_1, a_2, C_2, C_1$ . В двойном

слое  $D$  с падением напряжения  $V_D$  выделяется мощность  $P = IV_D$ , которая затрачивается на ускорение электронов, вызывающих сияния. Энергия передается из области  $C$  в область  $D$  не с помощью частиц высоких энергий или волн и не в результате магнитного слияния или пересоединения силовых линий. Такой перенос связан со свойствами электрической цепи (его можно описать с помощью вектора Пойнтинга).

пересекающий поверхность, ограничивающую этот объем. На языке магнитных полей это означает, что мы можем описать плазменные явления внутри ограниченного объема только тогда, когда нормальная составляющая  $\text{rot } \vec{B}$  обращается в нуль во всех точках поверхности.

Все теории «слияния магнитных полей» (или «пересоединения магнитных силовых линий»), не удовлетворяющие этому критерию, ошибочны и не заслуживают никакого внимания. Это не означает, что все работы, в которых используется термин «слияние магнитных полей», не представляют никакого интереса, так как имеется целый ряд прекрасных работ (например, [15]), в которых этот термин является просто синонимом «ускорения токовым слоем».

## II.6. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДВОЙНЫЕ СЛОИ

### II.6.1. Общие свойства двойных слоев

В плазме низкой плотности в сгущениях локализованного пространственного заряда могут возникать большие гадения напряжения на расстояниях порядка нескольких десятков дебаевских радиусов. Такие

области получили название *электрических двойных слоев*. Электрический двойной слой соответствует простейшему распределению пространственного заряда, создающему падение напряжения внутри слоя и исчезающее малое электрическое поле на каждой стороне слоя (рис. П.19). В лаборатории двойные слои изучаются уже в течение полувека, однако их значение в космической физике начали признавать лишь совсем недавно. Рядом исследований было подтверждено существование двойных слоев при различных условиях как в лабораторных установках, так и в магнитосфере [16–20]. Последние обзоры явлений, связанных с двойными слоями и представляющих интерес для исследований космической плазмы, включают в себя два общих обзора [21–22], а также отдельные обзоры экспериментальных наблюдений [23–24] и теории [25].

Образование двойных слоев может происходить различным образом. Как правило, плазма отделяется от стенок и электродов двойным слоем, который в этом случае часто называется просто *слоем*. Кроме того, если, например, электронная температура различна в двух областях плазмы, температура между этими областями не всегда изменяется плавно. Чаще всего плазма разбивается на две (или более) однородные области, разделенные одним (или несколькими) двойным слоем.

При низких плотностях тока тепловое движение электронов накладывается на их относительно медленное упорядоченное движение. Если плотность тока возрастает, так что скорость упорядоченного движения сравнивается с тепловой, как правило, образуется двойной слой. Это происходит вследствие неустойчивости типа двухпучковой, которая возникает из-за того, что упорядоченное движение электронов сходно с движением электронного пучка.

Двойные слои, образующиеся в незамагниченной плазме, широко исследовались в лаборатории. Было не ясно, можно ли применять результаты этих исследований к космическим условиям, так как в лабораторных экспериментах существенно влияние стенок разрядной камеры. В недавних экспериментах [26–28] двойные слои были изучены и в замагниченной плазме. Плазма изолировалась от стенок сосуда с помощью магнитных полей, так что влияние стенок в этих экспериментах незначительно. Было обнаружено, что в такой замагниченной плазме вдали от стенок также образуются двойные слои. Это существенно для вопроса о применимости результатов лабораторных измерений к космической плазме. Однако в большинстве лабораторных экспериментов магнитное поле достигало лишь таких значений, при которых не ионный ларморовский радиус, а только электронный оказывался мал по сравнению с размерами сосуда. Поэтому применимость результатов этих исследований к космической плазме нельзя считать окончательно установленной, так как в космосе, как правило, ионный ларморовский радиус мал по сравнению с характерной длиной.

Обычно двойные слои являются источниками *шума*, иными словами, в них происходят колебания в широком диапазоне частот. Часто амплитуда шума бывает малой по сравнению с падением напряжения на

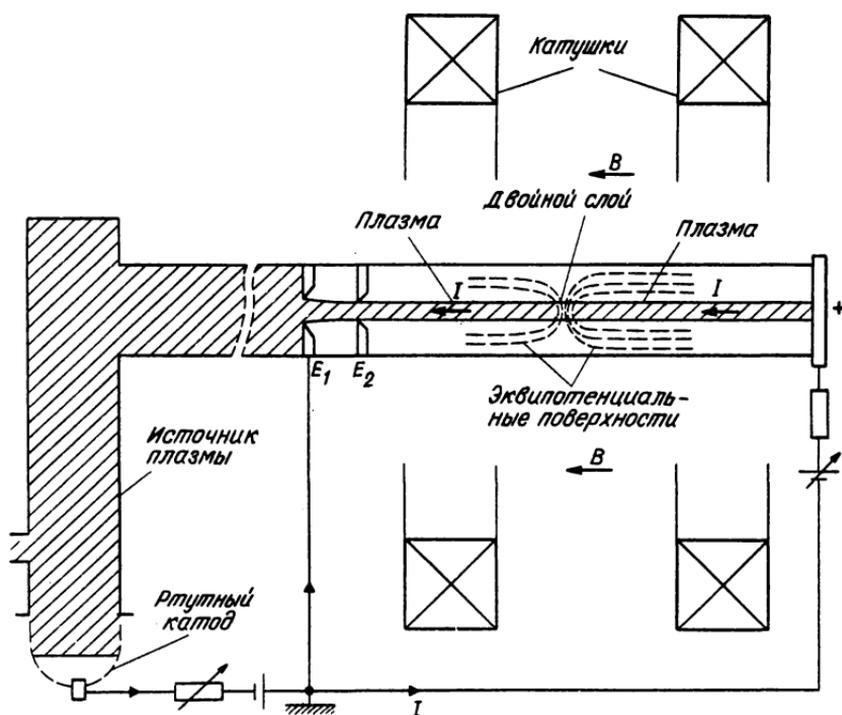


Рис. II.18. Столб ртутной плазмы, созданной с помощью электрического разряда, вытягивается и, стабилизированный магнитным полем, достигает анода. Как только ток превосходит определенное критическое значение, в токонесящем плазменном столбе образуется двойной слой [32].

двойном слое: в этом случае напряжение можно считать (почти) статическим. Такие двойные слои были недавно тщательно исследованы в работе [29]. Однако двойной слой может оказаться и неустойчивым, что приводит к его взрыву, т. е. к резкому увеличению падения напряжения на несколько порядков величины. В работе [30] был предложен возможный механизм такого явления. Характер взрыва в основном определяется индуктивностью  $L$  и сопротивлением  $R$  цепи, по которой течет ток. (Взрывающиеся двойные слои были впервые обнаружены и изучены в ртутных выпрямителях, используемых в прямоточных передающих линиях большой мощности.) Вероятно, этот механизм играет определяющую роль в солнечных вспышках, магнитных суббурях и других аналогичных явлениях.

Во время взрыва напряжение на слое определяется в основном членом  $-L di/dt$ , который может превосходить нормальное напряжение на двойном слое  $V_D$  на несколько порядков величины. Процесс взрыва обычно продолжается до тех пор, пока ток  $I$  не обращается в нуль. При этом энергия  $LI_0^2/2$  ( $I_0$  — ток в начале взрыва) выделяется в двойном слое — в основном в форме кинетической энергии ионов и электронов.

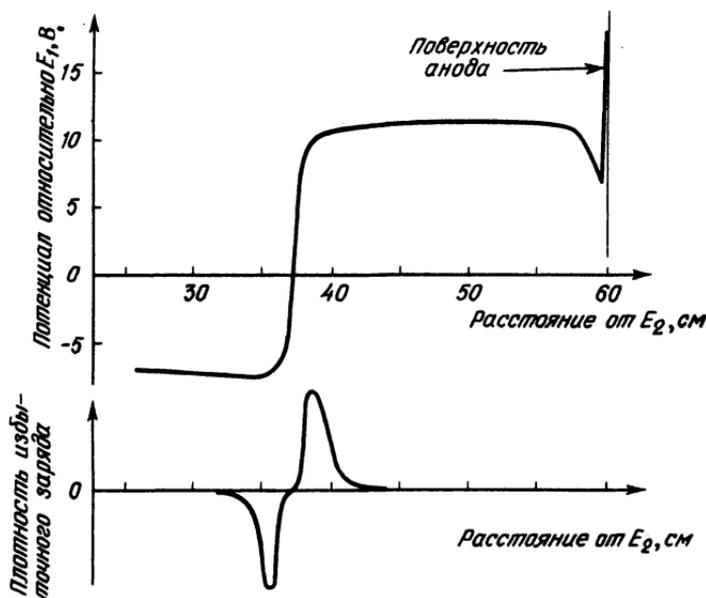


Рис. П.19. Профиль потенциала вдоль оси симметрии (верхняя кривая), свидетельствующий о наличии двойного слоя. Распределение избыточного заряда (нижняя кривая) показывает, почему такая конфигурация называется двойным слоем [32].

Эта энергия затем превращается в тепло и энергию излучения по мере взаимодействия электронов и ионов с окружающим веществом.

Электроны и ионы ускоряются в двойных слоях. Можно ожидать, что в мощных двойных слоях, образовавшихся в холодной плазме, отношение ионного тока  $i_i$  к электронному  $i_e$  определяется из выражения

$$\frac{i_i}{i_e} = \left( \frac{m_e}{m_i} \right)^{1/2}. \quad (13)$$

Однако во многих случаях это соотношение не выполняется [31].

Измерения, выполненные в двойных слоях в замагниченной лабораторной плазме [27, 32], показали, что эквипотенциальные поверхности, которые в самом слое расположены по нормали к магнитному полю, на границе плазмы изгибаются и становятся параллельными магнитному полю. В результате плазма по обеим сторонам слоя оказывается окруженной областями с сильным радиальным электрическим полем и нормальным к нему магнитным полем. Это радиальное поле направлено к оси на стороне слоя с меньшим потенциалом и от оси на стороне с большим потенциалом. Получающаяся конфигурация напоминает два «кабеля», соединенных двойным слоем.

На рис. П.18 в качестве иллюстрации лабораторных исследований двойных слоев приведена схема установки из работы [32]. На рис. П.19

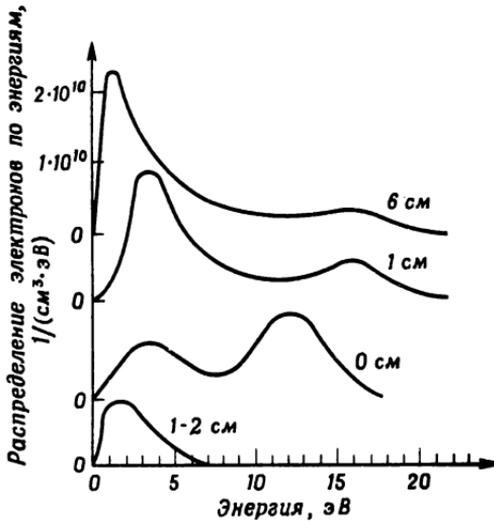


Рис. II.20. Распределение электронов по энергиям вблизи двойного слоя (указаны расстояния от слоя). На катодной стороне слоя распределение почти максвелловское, с максимумом при 2 эВ (самая нижняя кривая). На анодной стороне слоя с  $V_D = 10$  В этот максимум сдвигается до 12 эВ. В то же время появляется максимум при более низких энергиях (вторая кривая снизу). С удалением от слоя высота максимума при низких энергиях возрастает, а максимум при высоких энергиях сглаживается (две верхние кривые). (Разрядный ток 0,9 А, давление в катодном сосуде 0,87 мм рт. ст.)

представлен профиль потенциала на двойном слое, полученный в этом эксперименте. Распределение электронов по энергиям изображено на рис. II.20 [33]. На катодной стороне двойного слоя электроны обладают максвелловским распределением с максимумом при  $E = 2$  эВ, на анодной же стороне, как следствие ускорения частиц в двойном слое, в распределении появляются два максимума при  $E = 3$  эВ и  $E = 12$  эВ. На больших расстояниях от двойного слоя максимум при  $E = 3$  эВ становится преобладающим. Недавнее исследование [29], проведенное в трубке гораздо больших размеров, подтвердило эти результаты и дало более подробную картину распределения по энергиям.

Эти эксперименты показали, что образование двойных слоев в лабораторных условиях есть чисто электростатическое явление, не связанное с наличием магнитного поля, которое существенно лишь для удержания плазмы. Поэтому мы не можем описать поведение двойного слоя на языке магнитных полей. Двойные слои наблюдаются при таких слабых токах, что их собственным магнитным полем можно пренебречь (при этом даже ларморовский радиус для электронов велик по сравнению с линейными размерами области, занятой плазмой).

Напряжение на двойном слое  $V_D$  в десятки раз превышает напряже-

Таблица II.1

В таблице собраны результаты некоторых лабораторных экспериментов. Приведены измеренные значения степени ионизации  $N_i$ , напряжения на слое  $V_D$ , величины  $eV_D/kT_e$  ( $T_e$  — электронная температура на стороне слоя с меньшим потенциалом), дебаевской длины  $\lambda_D$  и толщины слоя  $L$ . В качестве меры пространственного заряда внутри слоя была выбрана величина  $(\lambda_D/L) (eV_D/kT_e)^{1/2}$ . Типичное значение плотности пространственного заряда в слое равно  $\pm 4\gamma^2 en$ , если концентрации  $n$  на обеих сторонах слоя равны между собой [34, 23].

Эксперимент	$N_i$ , %	$V_D$ , В	$\frac{eV_D}{kT_e}$	$\lambda_D$ , $10^{-3}$ м	$L$ , $10^{-3}$ м	$\frac{\lambda_D}{L} \left( \frac{eV_D}{kT_e} \right)^{1/2}$
[16, 27, 39]	0,01	14	14	1,5	150	0,04
[26]	100	10 <sup>4</sup>			40	
	(вначале)					
[20]	0,01	16	4,5	1,5	35	0,09
[33]	1	200	20	0,05	<5	>0,03
[28]	0,01	25	12	0,35	12	0,1
[18]	100		50	$\frac{L}{\lambda_D} = 40$		0,17
[32]	0,1	18	9	0,2	20	0,02

ние  $kT_e/e$ , соответствующее температуре  $T_e$ . Как показано в табл. II.1, где приведены некоторые экспериментальные результаты, отношение  $eV_D/kT_e$  изменяется от 4,5 до 20, а толщина двойного слоя превышает дебаевский радиус в 10–25 раз.

Часто, но далеко не всегда формирование двойных слоев связано с высокочастотными колебаниями. Природа и роль этих колебаний до конца пока еще не выяснены. Одно из следствий высокочастотных колебаний состоит в том, что они вносят определенный разброс в распределение по энергиям частиц, ускоренных в двойном слое.

### II.6.2. Двойные слои в магнитосфере

Из наблюдений следует, что зоны полярных сияний часто бомбардируются почти монохроматическим потоком электронов с энергией, равной, например, 3 кэВ. Было показано, что электроны ускоряются до таких энергий в довольно узкой области, расположенной над ионосферой на высоте порядка одного радиуса Земли  $R_\oplus$ . Требуемое падение напряжения может быть создано либо под действием эффекта магнитных зеркал [4, разд. 5.1.3], либо несколькими двойными слоями. Оба эти явления вызываются токами, текущими *вверх* вдоль магнитных силовых линий и переносящими электроны из магнитосферы вниз в ионосферу. Эффект магнитного зеркала обусловлен отражением магнитосферных

электронов в сильно возрастающем к полюсам магнитном поле. Если приток электронов недостаточен для обеспечения нужного тока в цепи, требуется относительно большое электрическое поле. Согласно работе [35], эффекты двойного слоя и магнитного зеркала действуют одновременно: эффект магнитного зеркала приводит, как правило, к образованию одного или нескольких двойных слоев, обеспечивающих нужное полное падение напряжения.

### II.6.3. Выделение энергии в двойных слоях

Если двойной слой формируется при значении тока  $I$ , то в нем за единицу времени выделяется энергия

$$P = IV_D. \quad (14)$$

Эта энергия в основном расходуется на ускорение заряженных частиц. Малая ее часть превращается в энергию шума. Конечно, ускоренные частицы, взаимодействуя с плазмой, порождают вторичные эффекты, так что энергия двойного слоя в конечном итоге диссипируется в виде тепла и излучения. Следует еще раз напомнить, что *нельзя считать, будто частицы получают энергию за счет «слияния магнитных полей» или «пересоединения магнитных силовых линий»* или же за счет любого другого механизма, связанного с изменением магнитного поля в ускоряющей области (разд. II.3.5, II.5.3). Магнитное поле в окрестности двойного слоя во время взрывного переходного периода остается практически постоянным и не может быть источником требуемой энергии (конечно, вторичные эффекты взрыва также приводят к изменению магнитного поля).

### II.6.4. Взрывающиеся двойные слои

Мы уже знаем, что характер плазменных явлений существенно зависит от *свойств всей электрической цепи*. Хорошо известно, что любая электрическая цепь, содержащая индуктивность, способна к *взрыву*. Если такую цепь разомкнуть, то в месте размыкания выделяется энергия магнитного поля:

$$W_L = \frac{1}{2} LI^2. \quad (15)$$

С другой стороны, также хорошо известно из многолетней практики лабораторных плазменных экспериментов, что двойные электрические слои определенных типов неустойчивы в том смысле, что в них может происходить неожиданное запираание тока. В результате энергия  $W_L$  выделяется в двойном слое и происходит взрыв. Существуют и другие плазменные неустойчивости, приводящие к запираанию тока, а следовательно, к взрыву [36].

Имеются веские основания предполагать, что многие взрывные явления, наблюдающиеся в космической физике, связаны со взрывами

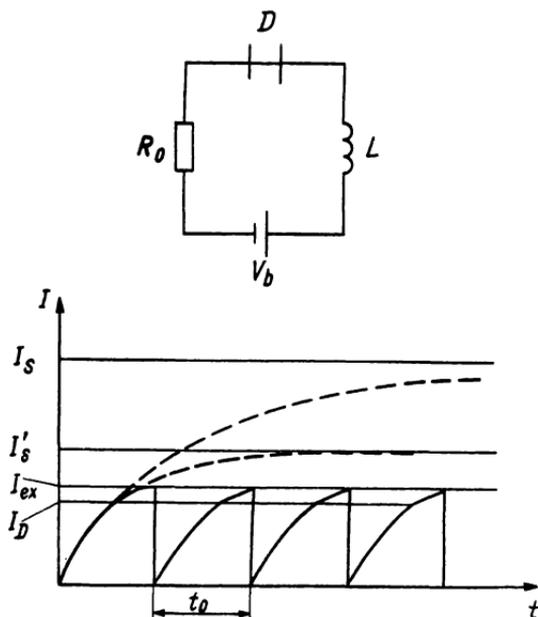


Рис. П.21. Цепь, содержащая взрывающийся двойной слой. При определенных условиях могут возникнуть регулярные колебания.

в двойных слоях (см. [30, 37–40]). К таким явлениям относятся магнитные суббури, солнечные вспышки и аналогичные явления во «вспыхивающих звездах». Явление «складывающегося зонга», наблюдаемое в кометах, позволило предположить [41, 8], что спорадическое увеличение ионизации в атмосфере кометы («кометное сияние») происходит под действием аналогичного процесса.

### П.6.5. Цепь, содержащая двойной слой

Рассмотрим цепь, состоящую из э. д. с.  $V_b$ , индуктивности  $L$ , сопротивления  $R_0$  и двойного слоя  $D$  (рис. П.21). Предположим, что двойной слой образуется, как только ток  $I$  достигает значения  $I_D$ , и что падение напряжения на слое  $V_D$  остается неизменным вплоть до момента, когда ток становится равным  $I_{ex}$ , при котором цепь размыкается и происходит взрыв.

После замыкания цепи ток нарастает со скоростью

$$\frac{dI}{dt} = \frac{V_b - R_0 I}{L}. \quad (16)$$

Если двойной слой не образуется, ток со временем достигает своего значения насыщения

$$I_s = V_b / R_0. \quad (17)$$

В противном случае при  $I_D < I_s$  скорость нарастания тока после образования двойного слоя ( $I > I_D$ ) определяется выражением

$$\frac{dI}{dt} = \frac{V_b - V_D - R_0 I}{L}. \quad (18)$$

В этом случае ток стремится к значению насыщения

$$I'_s = (V_b - V_D)/R_0. \quad (19)$$

Если  $I_{ex} < I'_s$ , в двойном слое произойдет взрыв, прежде чем ток достигнет насыщения.

Если цепь способна каким-то образом снова замкнуться, то описанный процесс будет периодически повторяться с периодом  $t_0$  (рис. II.21). В космической физике часто наблюдаются периодически повторяющиеся явления (магнитные суббури, солнечное мерцание, иногда солнечные вспышки). Возможно, что повторяемость всех перечисленных явлений связана со свойствами описанной простой цепи. Энергия, выделяющаяся при взрыве, черпается из кинетической энергии движения плазмы.

## II.7. «КАБЛИРОВАНИЕ» ТОКОВ, ТЕКУЩИХ ВДОЛЬ МАГНИТНЫХ СИЛОВЫХ ЛИНИЙ

Открытие Л. Франком «явлений перевернутого V» показало, что электрические токи в космическом пространстве часто текут по «кабелям» (рис. II.22).

Из наблюдений «явлений перевернутого V» следует, что формирование «кабелей» происходит довольно часто, в нижней магнитосфере (вплоть до высот порядка радиуса Земли). На больших высотах они наблюдаются реже, однако это может быть связано со свойствами измерительной техники. В работе [43] представлены результаты прямых измерений сильных электрических полей. Кроме электрических полей, параллельных магнитному полю, были обнаружены сильные поля, перпендикулярные магнитному полю. На рис. II.22 изображена картина эквипотенциальных поверхностей. Сильные электрические поля были обнаружены также при измерениях со спутников [44, 45] и ракет [46].

В экспериментах с бариевым облаком [47–48, 34], проведенных на высотах порядка радиуса Земли, были зафиксированы ускоряющие области, подобные описанной выше.

Если потенциал токонесящей магнитной силовой трубки совпадает с потенциалом окружающей среды ниже двойного слоя, выше слоя должен существовать поперечный градиент потенциала. Этот градиент вызывает вращение плазмы (которое ни в коем случае нельзя представлять как вращение магнитных силовых линий!) вокруг токонесящей силовой трубки. Таким образом, *нитевидный ток оказывается электрически изолированным от окружающей среды подобно току в электриче-*

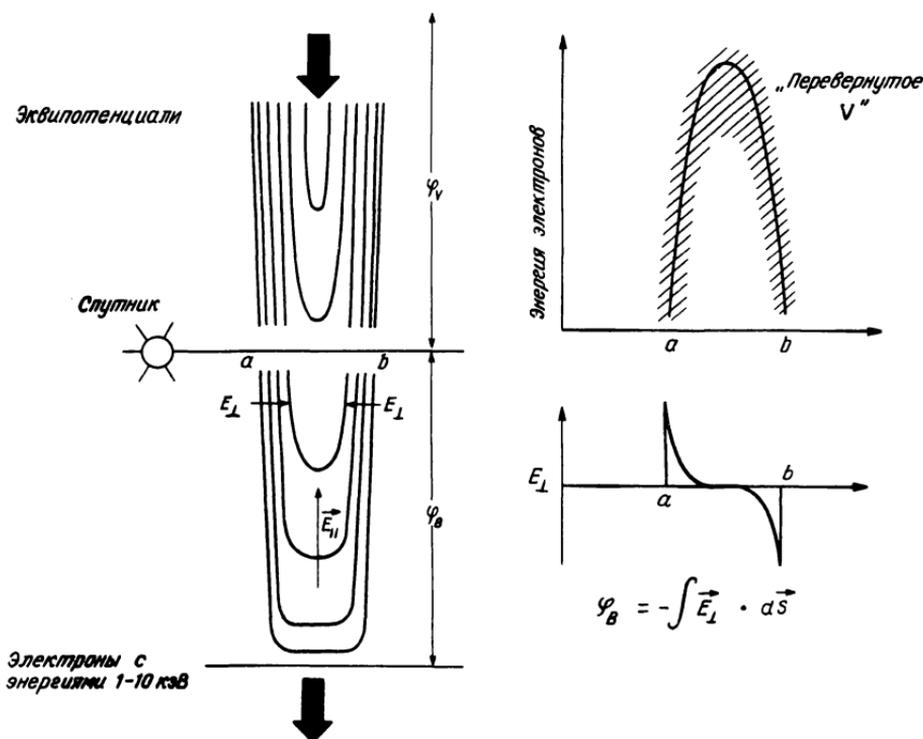


Рис. П.22. Явление «перевернутого V». Справа: наблюдаемое «явление перевернутого V». Слева: распределение электростатического потенциала [42]. Магнитное поле направлено вертикально. Токонесущая силовая трубка «изолирована» от окружающей плазмы тонкой цилиндрической оболочкой вращающейся плазмы, в которой наводится разность потенциалов, равная разности потенциалов в слое. Полезно сравнить картину эквипотенциальных поверхностей с аналогичной картиной на рис. П.18. Обе картины иллюстрируют образование «кабелей» в плазме.

ском кабеле, проложенном, например, в океане и проводящем электрический ток по металлическому проводу с низким сопротивлением. Провод изолируется от проводящей воды пластмассовой цилиндрической оболочкой, в которой электрическое поле сходно с радиальным электрическим полем вблизи тока в магнитосфере, текущего вдоль магнитного поля.

Подобно тому как два мощных передающих кабеля соединяют генератор с «потребителем», пара плазменных кабелей тоже может соединять «генератор» с «потребителем». В качестве «генератора» часто выступает движущаяся плазма, скорость которой обладает компонентой, перпендикулярной магнитному полю  $\vec{B}$ ; такая плазма генерирует э. д. с.

$$V_b = \int \vec{v} \times \vec{B} d\vec{s}, \quad (20)$$

где интеграл берется вдоль линии, соединяющей концы двух «кабелей». «Потребителем» может быть двойной слой, в котором происходит ускорение частиц, вызывающих в дальнейшем световое или синхротронное излучение. В качестве «потребителя» может также служить «двигатель», приводящий в движение плазму в отдаленных областях. Например, в цепи, эквивалентной авроральной токовой системе, «генератором» является солнечный ветер, а «потребителем» — двойные слои, ускоряющие до высоких энергий частицы, которые вызывают свечение ночного неба в зоне полярных сияний, и (или) «двигатель», вызывающий дрейф частиц в магнитосфере в направлении на Солнце (см. рис. II.17 и ссылку [24] к гл. 3).

Существование плазменных конфигураций, подобных кабелям, побудило нас обратиться к электрическим схемам, воспроизводящим электромагнитные явления в космическом пространстве, и обсуждать эти явления на языке электротехники. Такой метод будет в дальнейшем широко использоваться, особенно в гл. III. Совершенно очевидно, что его следует рассматривать в качестве первого приближения при решении сложных проблем. Нужно быть крайне осторожным при определении пределов его применимости.

## II.8. РАСШИРЯЮЩАЯСЯ ЦЕПЬ

Существует и другая возможность для диссипации энергии цепи  $LI^2/2$ . Если по электрической цепи течет ток, на него действует электродинамическая сила со стороны собственного магнитного поля, стремящаяся растянуть токовый контур. В космической плазме эта сила обычно уравнивается другими силами (например, другими электродинамическими силами, тяготением, газовым давлением). Если ток превосходит определенное критическое значение, растягивающая сила становится настолько большой, что баланс сил нарушается и токовый контур может разорваться. Примером такого явления служат поднимающиеся протуберанцы. В этом случае часть энергии цепи превращается в их кинетическую энергию.

## II.9. РАЗЛИЧНЫЕ ТИПЫ ПЛАЗМЕННЫХ ОБЛАСТЕЙ

На основании всего изложенного выше в настоящей главе можно сделать следующий вывод: по крайней мере в космической плазме низкой плотности имеются, по-видимому, три типа областей.

### II.9.1. «Пассивные» плазменные области

В таких областях могут распространяться различные плазменные волны и частицы высоких энергий. В них могут существовать переходные токи; текущие перпендикулярно магнитному полю и изменяющие со-

стояние движения плазмы, но не обязательно связанные с сильными электрическими полями и токами, параллельными магнитному полю. Космическое пространство заполнено в основном плазмой такого типа.

Если в какой-то области первоначально однородной плазмы происходит такое изменение ее параметров, что они начинают превосходить определенные критические значения, в плазме очень часто образуются поверхности разрыва. Иными словами, свойства плазмы таковы, что в ней вместо области с плавным измерением параметров обычно образуется поверхность разрыва, разделяющая две однородные плазменные области. Иногда в результате такой эволюции образуются двойные слои, на которых происходит скачок потенциала, а иногда — *токовые слои*, разделяющие области с различными намагниченностями, температурами и плотностями.

### II.9.2. «Активные» плазменные области

Таким образом, помимо пассивных плазменных областей существуют также активные области, в которых протекают нитевидные и слоистые токи [6]. Поскольку активная плазма образует резкую границу между различными областями пассивной плазмы и участвует в передаче энергии между этими областями, изучение ее свойств чрезвычайно важно для понимания общего поведения космической плазмы. Это утверждение остается в силе даже в том случае, когда полный объем, занятый активной плазмой, мал, как это часто имеет место. Эти два различных типа активной плазмы мы будем называть *плазменными кабелями* и *токовыми слоями*.

### II.9.3. Плазменные кабели

Плазменные кабели — это, по-видимому, достаточно устойчивые образования, изучение структуры которых важно для понимания плазменных явлений. (Конечно, их внутреннее строение должно описываться классической теорией.) Плазменные кабели представляют собой либо волокна, либо «сплюснутые волокна» (слои конечной ширины). В них текут электрические токи, параллельные магнитному полю, и именно это определяет свойства кабелей. Кабели часто оказываются эффективными передатчиками электромагнитной энергии из одной области в другую. Они погружены в пассивную плазму, свойства которой существенно одинаковы по всем направлениям от кабеля. Они «изолированы» от окружающей среды тонкой цилиндрической электростатической оболочкой (двойным слоем), которая ослабляет взаимодействие тока с окружающей средой. В магнитосфере и в верхней ионосфере плотность внутри кабеля бывает меньше плотности окружающей плазмы [49]. В других случаях плотность внутри кабеля может существенно превосходить плотность окружающей среды, так как наружная плазма засасывается внутрь кабеля. Если такое засасывание происходит по-разному для различных химических элементов, то химический состав

вещества внутри кабеля может отличаться от состава в окружающей среде [13, 50]. Кроме цилиндрических электростатических оболочек могут существовать продольные *двойные слои*, в которых существенная часть передаваемой кабелем энергии превращается в кинетическую энергию частиц. Двойные слои иногда взрываются, в результате чего появляются частицы чрезвычайно высоких энергий. Токи в кабелях могут размыкаться и начинать течь по другой цепи [40, 51]. Помимо лаборатории такие плазменные кабели (или указания на их существование) были обнаружены в нескольких областях космического пространства:

а) *Авроральная токовая система* состоит из плазменных кабелей волокнистой или (более часто) слоистой структуры (возможно, ассоциирующихся с лучами полярных сияний). «Явления перевернутого V», по-видимому, возникают благодаря существованию кабелей [21]. По кабелям передается энергия из экваториальной области в зону полярных сияний, а наличие двойных слоев, по-видимому, является причиной некоторых типов оптических сияний (рис. III.2).

б) *Солнечные протуберанцы*. Электродвижущая сила возникает благодаря движениям в фотосфере при наличии фотосферных магнитных полей. Протуберанцы, как правило, обладают волокнистой структурой, но иногда бывают слоистыми (спокойные протуберанцы). Часто образуются двойные слои, при взрыве которых наблюдаются солнечные вспышки. В *спикулах*, по-видимому, происходят те же явления, но в меньших масштабах (разд. III.8).

в) *Корональные лучи и полярные щеточки*. Поскольку мы ожидаем, что полярные и экваториальные области Солнца связаны посредством глобальной гелиосферной системы токов, данные явления, по-видимому, аналогичны солнечным протуберанцам. Основное различие между ними состоит в том, что протуберанцы входят в фотосферную цепь, а корональные лучи и щеточки — в глобальную гелиосферную.

г) Происхождение волокнистых структур в *хвостах комет* (см. [8] и рис. II.6) и в *межзвездных туманностях* (рис. II.7 — II.10) можно объяснить аналогичным образом. Вероятно, что *звездные вспышки* происходят под действием того же механизма, что и солнечные. Было также высказано предположение, что передача энергии *двойным источникам радиоизлучения* от галактики, которая обычно находится посередине между ними, происходит по описанным выше плазменным кабелям (разд. III.4.4).

#### II.9.4. Проекция активных и пассивных плазменных областей на ионосферу

Существенное различие между активными и пассивными областями плазмы наглядно проявляется в ионосфере. Зоны полярных сияний являются областями ионосферы, которые с помощью магнитного поля связаны с областью активной плазмы, расположенной в магнитосфере. Остальная часть ионосферы связана с областями пассивной плазмы и, следовательно, получает очень мало энергии с больших высот.

Очень соблазнительно связать различные типы полярных сияний с различными структурами активной плазмы в магнитосфере: лучи полярных сияний — с волокнами, дуги — со слоями и драпри — с возмущенными слоями. Однако в переходной области между магнитосферой и ионосферой наблюдается несколько довольно сложных для понимания явлений. Кроме того, в верхней ионосфере существуют горизонтальные токи, которые тоже могут вызывать свечение. Поэтому связь между структурами активной плазмы в магнитосфере и визуально наблюдаемыми полярными сияниями не так проста. Наконец, следует отметить, что волокна хорошо наблюдаются на больших расстояниях, в то время как слои лучше наблюдать с помощью космических аппаратов.

### II.9.5. Граничные токовые слои

Кроме токового слоя, описанного выше, существует совершенно другой тип токового слоя, который образует граничную поверхность между двумя областями плазмы с резко различающимися параметрами. Основное различие между ними состоит в том, что в «кабелях», которые мы рассматривали выше, протекают настолько слабые токи, что их собственные магнитные поля пренебрежимо малы по сравнению с внешним полем, в то время как в граничных токовых слоях токи достаточно велики и их магнитные поля существенно искажают внешнее поле. В магнитосфере Земли наблюдаются три таких слоя [52, 53]:

а) *Магнитопауза* — очень тонкий токовый слой (толщиной порядка нескольких циклотронных радиусов), разделяющий две плазменные области, в которых магнитные поля нередко направлены в противоположные стороны (на север и юг). Различия других параметров плазмы (давления, плотности) возможны, но не обязательны.

Очень часто при прохождении космического аппарата вблизи магнитопаузы наблюдается несколько разрывов магнитного поля. Обычно считают, что эти данные свидетельствуют о быстром движении магнитопаузы к Земле и наружу. Однако эти данные можно также интерпретировать, предполагая наличие «складок» в токовом слое магнитопаузы. Действительно, известно, что драпри в полярных сияниях часто имеют складчатую форму (в виде буквы S). Если продолжить образование складки, то слой может стать тройным. Кроме того, известно, что граничный токовый слой в гелиосфере имеет волнистую структуру. Поэтому вполне возможно, что магнитосферный токовый слой тоже складчатый, так что космический аппарат, пересекая магнитопаузу, трижды проходит через него. Модель складчатого токового слоя рассматривается в работе [54]. Тем не менее интерпретация, включающая быстрое движение магнитопаузы, все-таки кажется более предпочтительной.

б) *Нейтральный слой в хвосте магнитосферы* также разделяет две плазменные области, в которых магнитные поля направлены в противоположные стороны (к Земле и от Земли). Остальные параметры, как

правило, являются аналогичными. Кроме того, на эти магнитные поля часто накладывается небольшая составляющая, направленная на север.

в) Наконец, перед лобовой частью магнитопаузы наблюдается *токовый слой*, разделяющий область с очень слабым магнитным полем в солнечном ветре и область с гораздо более сильным (в три раза или более) полем, расположенную между токовым слоем и магнитопаузой. Обычно этот токовый слой называют «*фронтом ударной волны*». В нем происходит преобразование большей части кинетической энергии солнечного ветра в энергию электромагнитного поля (разд. III.6).

В *гелиосфере* имеется очень протяженный токовый слой, расположенный в *экваториальной* плоскости, в котором наблюдаются колебания в направлении юг — север и который отделяет область с магнитным полем, направленным к Солнцу, от области, в которой магнитное поле направлено наружу (рис. III.7 и [6, 55]). Токовые слои, сходные со слоями в хвосте магнитосферы Земли и гелиосфере, были обнаружены как в магнитосфере Юпитера, так и в магнитосферах других планет. Кроме того, теоретические работы позволяют предположить, что они существуют и в хвостах комет. Недавно токовый слой был обнаружен в ночной ионосфере Венеры [56].

В токовом слое, расположенном в хвосте земной магнитосферы, по-видимому, могут формироваться взрывающиеся двойные слои [57], которые вызывают магнитные суббури. Обладают ли подобным свойством другие токовые слои, пока неизвестно. Для каждого из перечисленных токовых слоев создан целый ряд теорий, но единая теория, объясняющая все эти чрезвычайно важные явления, к сожалению, пока отсутствует.

Многие считают, что открытие этих токовых слоев (вначале Кахиллом была обнаружена магнитопауза) является наиболее сенсационным из всех открытий в космических исследованиях (хотя существование таких слоев было до некоторой степени предсказано ранее [58, 59]). Наиболее поразительным считается тот факт, что токовые слои оказались удивительно долгоживущими (можно сказать, устойчивыми) образованиями. Существование таких слоев изменяет наши взгляды на структуру космической плазмы [60]. Поскольку такие слои, скорее всего, существуют и в тех областях пространства, где еще не проводились прямые измерения с помощью космических аппаратов, мы вынуждены коренным образом изменить наше представление о структуре космического пространства. Наличие таких граничных токовых слоев свидетельствует о том, что космическое пространство (как межзвездное, так и межгалактическое) везде имеет *ячеистую структуру*. Следствия из этого вывода будут обсуждены в следующем разделе.

## II.10. ЯЧЕИСТАЯ СТРУКТУРА ПРОСТРАНСТВА

Как было показано в предыдущих разделах, в космическом пространстве обнаружен целый ряд поверхностей, разделяющих области с различными намагниченностями, плотностями, температурами, рас-

пределениями электронов по скоростям и даже химическими составами. К ним относятся, например, магнитопауза и слои в хвосте магнитосферы, слой в экваториальной плоскости гелиосферы, слои в магнитосфере Юпитера и, возможно, в хвостах комет.

Эти слои образуются поверхностными электрическими токами. Иногда они бывают очень тонкими (с толщиной порядка десяти ларморовских радиусов). Их почти невозможно обнаружить с далекого расстояния. Приборы на космическом аппарате обычно не обнаруживают такой слой, пока аппарат не пересекает его.

Поскольку космическая плазма вряд ли содержит слои только в тех областях, которые доступны для измерений с помощью космических аппаратов, вполне разумно заключить, что все космическое пространство обладает *ячеистой структурой*, хотя наблюдать эту структуру можно лишь тогда, когда космический аппарат пересекает «стенку ячейки» (токовый слой). Это означает, что мы не можем надеяться на непосредственное обнаружение этих «стенок» в отдаленных областях. Вряд ли мы узнаем также размеры ячеек в этих областях. Конечно, обоснование далеко идущих выводов о существовании структуры, которую невозможно обнаружить прямыми измерениями, является малоприятным занятием. Однако его альтернатива состоит в высказывании далеко идущих заключений, исходящих из *предположения*, что свойства плазмы в отдаленных областях резко отличаются от свойств плазмы, находящейся вблизи нас. Безусловно, что такое занятие еще более неприятное, чем наша неспособность обнаружить «стенки» удаленных от нас «ячеек». Таким образом, тщательный пересмотр наших представлений о свойствах межзвездного (и межгалактического) пространства является неизбежным следствием последних открытий в магнитосфере. Как будет показано в разд. IV.9 и гл. VI, это заключение должно изменить также и наш подход к космологическим проблемам.

## II.11. ТОНКАЯ СТРУКТУРА АКТИВНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ОБЛАСТЕЙ

Экспериментальные данные о толщине активных плазменных областей весьма противоречивы. Протяженность зоны полярных сияний составляет несколько градусов (т. е. порядка  $10^5$  м). Однако толщина дуги или луча в полярных сияниях обычно порядка  $10^3$  м, а иногда и меньше. Из данных измерений в магнитопаузе, как правило, следует, что толщина этого токового слоя на несколько порядков величины превышает ионный циклотронный радиус. Однако имеется также много измерений, дающих значение толщины, равное всего лишь нескольким циклотронным радиусам. Возможная интерпретация этих противоречивых результатов состоит в том, что активные плазменные области обладают *тонкой структурой* с линейными размерами элементов порядка нескольких циклотронных радиусов, причем эти элементы определяют фундаментальные свойства активной плазмы.

Хотя считается, что диаметр солнечных протуберанцев порядка  $10^6 - 10^7$  м, имеется много наблюдений, свидетельствующих об их тонкой волокнистой структуре. Из этих наблюдений следует, что протуберанец надо рассматривать как «жгут», состоящий из множества тонких «проводов». Вполне вероятно, что даже наиболее мелкая волокнистая структура на Солнце (порядка  $10^5$  м) сама состоит из еще более тонких волокон, которые по размерам аналогичны структурам, наблюдаемым в ионосфере ( $\sim 10^3$  м).

Вряд ли мы сможем глубже понять свойства плазмы до тех пор, пока не изучим ее тонкую структуру. Поэтому исследование активных плазменных областей на основе сформулированных нами ранее принципов, которое вполне может оказаться существенным шагом вперед, не следует рассматривать как окончательный шаг.

Недавно с помощью искусственного спутника Венеры («Пионер-Венера») было сделано важное открытие мелкомасштабных токовых жгутов (диаметром порядка  $10^4$  м) [61, 14]. Оказалось, что в ионосфере Венеры имеется множество скрученных магнитных волокон, сходных с теми, которые недавно исследовались теоретически в работе [13]. Они отличаются от лучей полярных сияний в ионосфере Земли тем, что сжаты магнитными силами. Возможно, что в этом случае наблюдается та давно искомая волокнистая структура, которая должна быть основной в протуберанцах, корональных лучах и, возможно, в хвостах комет и вообще в космической плазме.

Мы описали здесь три характерные плазменные области: область пассивной плазмы, которая, по-видимому, наиболее типична для магнитосфер планет и Солнца; плазменные кабели, обнаруженные в зонах полярных сияний, и граничные токовые слои, из которых наиболее изучена магнитопауза. Тем не менее вполне возможно, что имеются и другие плазменные области с промежуточными свойствами.

Для выяснения этого вопроса требуется дополнительное тщательное исследование.

# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ

## III.1. ВАЖНОЕ ЗНАЧЕНИЕ ТОКОВЫХ МОДЕЛЕЙ

Как было показано в гл. II, очень полезно переводить традиционное полевое описание плазменных явлений в космосе на язык токов. Это дает более глубокое понимание упомянутых явлений по следующим причинам:

1) Введение эквивалентных токовых цепей демонстрирует важность учета граничных условий, о которых раньше часто забывали.

2) Изучение электродвижущих сил, вызывающих токи, и областей, где выделяется энергия, значительно облегчает понимание механизма передачи энергии из одной области в другую.

3) Некоторые важные явления, вызванные токами, очень трудно понять без перехода на язык токов.

Так, например, простым переводом полевого описания гелиосферы на язык токов можно показать, что в ней должны существовать токи, текущие вдоль оси Солнца (результат, не следующий непосредственно из полевого описания), и что появление корональных лучей и полярных щеточек скорее всего связано с нитевидными токами (разд. III.4). Мы также совершим аналогичный перевод полевого описания магнитосферы на язык токов (разд. III.6), что позволит нам разобратся в механизме передачи энергии от солнечного ветра к магнитосфере. Таким же способом можно объяснить передачу энергии фотосферной активности солнечному ветру (разд. III.9). Это позволит понять всю совокупность последовательных процессов, обеспечивающих передачу энергии от Солнца к магнитосфере и ионосфере (разд. III.10).

### III.1.1. Описание на языке частиц

Мы будем использовать не гидродинамическое описание, а исключительно *описание на языке частиц* (см. гл. II). Если пренебречь столкновениями, силами гравитации и радиационным давлением, то изменение состояния движения частицы полностью определяется электродинамической силой  $\vec{F}_E = e(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$ , действующей на частицу. Следовательно, если поток частиц налетает на препятствие, он отклоняется только под действием силы  $\vec{F}_E$ . Другими словами, *влияние препятствия определяется только электрическим и магнитным полями, которые это препятствие создает*. Смысл этого утверждения будет пояснен на примерах, приведенных в разд. III.1.3

Далее, поскольку формула Спитцера для проводимости получена предположении малости средней длины свободного пробега, она здесь

неприменима. Если вдоль линии, параллельной магнитному полю или вдоль нейтральной линии приложить разность потенциалов, то потечет ток. Однако сила тока и напряжение не будут связаны законом Ома [1]. Более существенны падения напряжения, возникающие на двойных слоях и связанные с эффектом магнитных зеркал. Далее, в плазме, как правило, возбуждаются неустойчивости различных типов, и она обычно «шумит». Это не означает, что она находится в турбулентном состоянии (разд. IV.4). Неряшливое использование термина «турбулентность» привело (и продолжает приводить) к большой путанице. При движении космического аппарата в плазме часто регистрируются быстрые флуктуации, однако иногда они связаны с волокнистой структурой плазмы, а иногда — с волнами различных типов. Нет никаких определенных указаний на то, что в любом месте космического пространства существенна (крупномасштабная) турбулентность в правильном понимании этого термина. Это очень важно, поскольку действительно турбулентное движение вызывает перемешивание, а в космической плазме не наблюдаются явления, в которых такое перемешивание играет существенную роль. Более того, часто происходит не перемешивание, а разделение элементов (разд. IV.3).

### III.1.2. Различные типы электрических токов

Представляют интерес три различных типа электрических токов:

- а) токи  $i_{\parallel}$ , текущие вдоль магнитного поля  $\vec{B}$ ;
- б) токи  $i_{\perp}$ , текущие вдоль нейтральных линий или поверхностей, на которых  $\vec{B} = 0$ ;
- в) дрейфовые токи  $i_{\perp}$ , текущие поперек поля  $\vec{B}$ .

#### а) Токи, текущие параллельно магнитному полю

Одно из свойств таких токов в плазме низкой плотности состоит в том, что они не подчиняются закону Ома. Они могут создавать двойные слои, на которых возникают большие падения напряжения и в которых генерируются шумы (разд. II.6). Свойства этих токов были в основном изучены в лабораторных экспериментах. Однако исследование магнитосферы показало, что они играют определяющую роль и в поведении космической плазмы. Механизм таких токов весьма сложен, и описывающие их современные теории носят в основном полумпирический характер.

Другая важная черта токов, текущих параллельно магнитному полю, состоит в том, что они нередко имеют волокнистое строение. Разумно предположить, что наблюдаемые в космическом пространстве волокнистые структуры образованы именно такими токами (разд. II.4).

#### б) Токи, текущие вдоль нейтральных линий или поверхностей

Имеется целый ряд теоретических исследований, посвященных токам, текущим вдоль нейтральных линий (или поверхностей), однако, поскольку такие токи гораздо меньше изучены в лаборатории, не ясно, на-

сколько эти исследования соответствуют действительности. В некоторых отношениях эти токи сходны с токами, текущими вдоль магнитных силовых линий. Как и последние, токи, текущие вдоль нейтральных линий, способны, по всей видимости, создавать взрывающиеся двойные слои. Такой вывод, вероятно, согласуется с результатами экспериментов, описанных в работе [2] (хотя интерпретация, предложенная в этой работе, и отличается от нашей).

в) Дрейфовые токи

Поперечный дрейф заряженной частицы определяется уравнением для ведущего центра [3, стр. 42]:

$$\dot{u}_\perp = (\vec{F}_E + \vec{F}_B + \vec{F}_g + \vec{F}_i + \vec{F}_0) \times \vec{B}/qB^2. \quad (1)$$

Дрейфовое движение состоит из следующих компонент, соответствующих каждому слагаемому в уравнении (1):

дрейф в электрическом поле:	$\vec{F}_E = q\vec{E}$ ,
дрейф в неоднородном магнитном поле:	$\vec{F}_B = -\mu \text{grad } B$ ,
гравитационный дрейф:	$\vec{F}_g = -m\vec{g}$ ,
инерционный дрейф:	$\vec{F}_i = -m \frac{d\vec{u}}{dt}$ ,

где  $m$  — масса частицы,  $\mu = P_\perp^2/2\gamma mB$  — магнитный момент (в нерелятивистском приближении  $\mu = mv_\perp^2/2B$ ) и  $\vec{g}$  — напряженность гравитационного поля. Наконец,  $\vec{F}_0$  характеризует другие силы, связанные, например, с давлением излучения или со столкновениями. «Поперечная» кинетическая энергия  $mv_\perp^2/2$  может характеризовать «поперечную температуру».

Все эти дрейфовые составляющие, за исключением дрейфа в электрическом поле, зависят от знака заряда, поэтому они вызывают электрические токи. Гравитационный дрейф зависит от  $m$ , поэтому он может вызывать химическое разделение атомов с различными массами. Это относится и к инерционному дрейфу. Дрейф в неоднородном магнитном поле также может приводить к разделению различных сортов ионов, если их поперечные температуры различны.

Инерционный дрейф важен потому, что с его помощью происходит преобразование кинетической энергии в энергию электромагнитного поля и наоборот. Если положить в первом приближении температуру плазмы равной нулю (член  $\vec{F}_B$  в этом случае также обратится в нуль), плотность тока  $\vec{i}$ , соответствующего инерционному дрейфу, будет определяться выражением

$$\vec{i} = \sum qn\vec{u} = \sum \frac{nmB}{B^2} \times \frac{d\vec{u}}{dt}, \quad (2)$$

где  $n$  — концентрация частиц,  $m$  — масса частицы и суммирование про-

водится по различным сортам ионизованных частиц. Этот «инерционный ток» течет поперек магнитного поля  $\vec{B}$ . Это означает, что он оказывает силовое воздействие, отнесенное к единице объема, равное

$$\vec{f}_i = \vec{r}_i \times \vec{B} = \rho \frac{d\vec{u}}{dt} \quad (3)$$

(где  $\rho = nm$  — плотность плазмы), которое необходимо для создания ускорения плазмы  $d\vec{u}/dt$ .

### III.1.3. Передача энергии между электрической цепью и движущейся плазмой

Для изучения механизма превращения кинетической энергии  $W_k = Mu^2/2$  плазмы в энергию электромагнитного поля электрической цепи, которую мы будем называть энергией цепи  $W_e$ , рассмотрим три следующих простых случая.

#### Модель (а)

Тонкий слой плазмы толщиной  $\Delta x$  ускоряется в конденсаторе  $A$ , называемом плазменной пушкой, который находится в однородном магнитном поле  $\vec{B}$ , достаточно сильном, чтобы приближение ведущих центров можно было считать справедливым (рис. III.1а). Расстояние между пластинами конденсатора равно  $\Delta y$ , а ширина этих пластин в направлении магнитного поля —  $\Delta z$ . Длина конденсатора в направлении оси  $x$  достаточно велика, чтобы плазма успевала достигать своей предельной скорости в пушке. После ускорения плазменный слой попадает сначала в дрейфовую трубку, где не происходит никакого обмена энергией, а затем в другой конденсатор, который называется замедляющей областью  $D$ .

Пушка получает энергию от батареи с напряжением  $V_0$ , соединенной с плазменной пушкой через сопротивление  $R_A$  с помощью двойного переключателя  $S$ , который замыкается для приведения ее в действие. Замедляющий конденсатор нагружен на сопротивление  $R_D$ . Вся установка симметрична относительно Земли. Плазменный слой содержит однородную полностью ионизованную плазму плотности  $\rho$  и массы  $M = \rho \Delta x \Delta y \Delta z$ . Предполагается, что приэлектродными эффектами в областях  $A$  и  $D$  можно пренебречь (это означает, что, хотя все электроды считаются способными испускать электроны и ионы в неограниченном количестве, увеличение массы  $M$ , обусловленное этой эмиссией, пренебрежимо мало).

После включения пушки ток  $I$  ускоряет плазму силой  $F = \Delta y IB$  до скорости  $u$ . Если обозначить через  $V$  падение напряжения на плазменной пушке, то

$$V = V_0 - IR_A. \quad (4)$$

Далее,

$$u = \frac{V}{B\Delta y}, \quad (5)$$

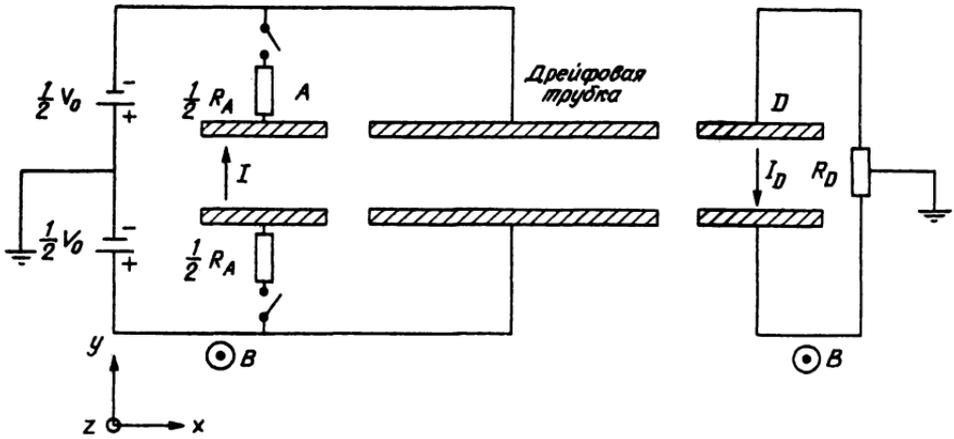


Рис. III.1а. Цепь, соответствующая модели (а). Магнитное поле  $B$  однородно. Плазма ускоряется в области  $A$  до скорости и под действием силы  $F = \Delta y I B$ . После прохождения дрейфовой трубки она попадает в область  $D$ . Здесь плазма замедляется, генерируя э. д. с.

а мощность  $P$ , передаваемая плазме,

$$P = IV. \tag{6}$$

Комбинируя уравнения (2) и (5), находим величину полного тока через сечение  $\Delta x \Delta y$ :

$$I = \frac{nm\Delta x \Delta z}{B} \frac{d}{dt} \frac{V}{B\Delta y}. \tag{7a}$$

Это соотношение с учетом (4) можно переписать в виде

$$I = -t_A \frac{dI}{dt}, \tag{76}$$

где

$$t_A = R_A \frac{S}{\Delta y} \frac{\rho}{B^2} \tag{8}$$

и  $S = \Delta z \Delta x$  — эффективная площадь электродов. Интегрируя (76), получим

$$I = I_0 e^{-t/t_A}, \tag{9}$$

где

$$I_0 = \frac{V_0}{R_A}. \tag{10}$$

Поскольку емкость плоского конденсатора

$$C = \epsilon_0 \frac{S}{\Delta y} \quad (11)$$

(где  $\epsilon_0$  — диэлектрическая проницаемость вакуума), то выражение (8) можно представить в виде

$$t_A = R_A \frac{C}{\epsilon_0} \frac{\rho}{B^2} = \quad (12)$$

$$= R_A C \epsilon / \epsilon_0, \quad (13)$$

где «кажущаяся диэлектрическая проницаемость»

$$\epsilon = \frac{1}{\mu_0 V_A^2}. \quad (14)$$

Здесь

$$V_A = B / \sqrt{\mu_0 \rho} \quad (15)$$

— альвеновская (гидромагнитная) скорость.

Когда плазменный слой входит в замедляющую систему, ток в ней скачком принимает значение  $I_0 = V_0 / R_D$ , а затем спадает по закону (76), где вместо  $t_A$  следует подставить  $t_D = R_D C \epsilon / \epsilon_0$ .

Если длина замедляющей системы достаточно велика, плазма передаст всю свою кинетическую энергию электрической цепи. Если же длина не очень велика, плазма передаст цепи лишь часть своей кинетической энергии, а после выхода из системы будет двигаться с меньшей скоростью.

Сравнивая состояние плазмы в дрейфовой трубке с ее состоянием до начала ускорения, можно показать, что ведущие центры ионов смещаются за это время на расстояние  $y_p$  в направлении электрического поля  $E = V_0 / \Delta y$ , которое достаточно велико, чтобы ионы смогли приобрести свою кинетическую энергию. Тогда

$$y_p E = \frac{1}{2} m \frac{E^2}{B^2}, \quad (16)$$

или

$$y_p = m \frac{E}{2B^2}. \quad (17)$$

При замедлении ионов смещение обращается в нуль. Это смещение эквивалентно смещению зарядов в диэлектрике, находящемся между пластинами конденсатора. Скорость изменения  $y_p$  со временем определяет инерционный ток (ток смещения). Электроны смещаются в противоположную сторону, однако поскольку масса электрона значительно меньше массы иона, то смещение электронов не столь важно.

## Модель (б)

Рассмотрим плазму, дрейфующую поперек магнитного поля  $B_z(x)$  под действием электрического поля  $E_y$ , создаваемого двумя конденсаторными пластинами единичной длины  $\Delta x = 1$ . Расстояние между пластинами  $\Delta y$  тоже равно единице. Скорость дрейфа  $u$  определяется соотношением (1). Если  $n$  — концентрация электронов и ионов,  $m_e$ ,  $m_i$  и  $\mu_e$ ,  $\mu_i$  — соответственно их массы и магнитные моменты, то плотность тока определяется выражением

$$\vec{i} = ne(\vec{u}_i - \vec{u}_e) = \frac{n}{B^2} \vec{B} \left[ (\mu_i + \mu_e) \text{grad } B + (m_i + m_e) \frac{d\vec{u}}{dt} \right], \quad (18)$$

с помощью которого можно получить величину потока энергии  $P = Vi$  через единичную площадку в единицу времени:

$$P = v \frac{\partial}{\partial x} (w_k - w_t), \quad (19)$$

где  $v$  — поток ионов и электронов,  $w_k$  — кинетическая и  $w_t$  — тепловая энергии, приходящиеся на ион и электрон.

Если плазма из области  $A$  (рис. III.16) попадает в область  $C$ , где магнитное поле нарастает, возможны два различных варианта ее поведения:

1) Скорость плазмы вследствие инерции остается постоянной. Тогда  $E$  будет возрастать пропорционально  $B$ . Если затем магнитное поле  $B$  вернется к своему первоначальному значению, то же самое произойдет и с электрическим полем  $E$ .

2) Если поддерживать постоянным значение электрического поля  $E$ , то скорость плазмы будет уменьшаться как  $B^{-1}$ . При этом кинетическая энергия плазмы должна передаваться цепи. В горячей плазме часть кинетической энергии будет превращаться в тепловую со скоростью  $v(\partial w_k / \partial x)$ . Если считать, что потери энергии на электродах пренебрежимо малы, цепь, изображенная на рис. III.16, может получить энергию от плазмы, а затем вернуть ее плазме в области  $C'$ , где магнитное поле уменьшается. Таким образом, пучок плазмы может пересечь магнитный барьер без изменений своей кинетической энергии. Этот вывод относится и к случаю горячей плазмы, если отсутствует взаимодействие между  $v_{\perp}$  и  $v_{\parallel}$ . Если же такое взаимодействие существует, плазма будет нагреваться за счет своей кинетической энергии.

Если при передаче энергии в цепи происходят потери (например, в сопротивлении  $R$ ), плазме будет возвращаться меньшее количество энергии и плазменный поток будет замедляться (примеры такого процесса рассмотрены в разд. III.6). Расчеты моделей (а) и (б) немного усложнятся, если плазменный поток считать непрерывным, так как придется учитывать сжатие пучка в направлении  $y$ . Тем не менее основные принципы передачи энергии останутся без изменения.

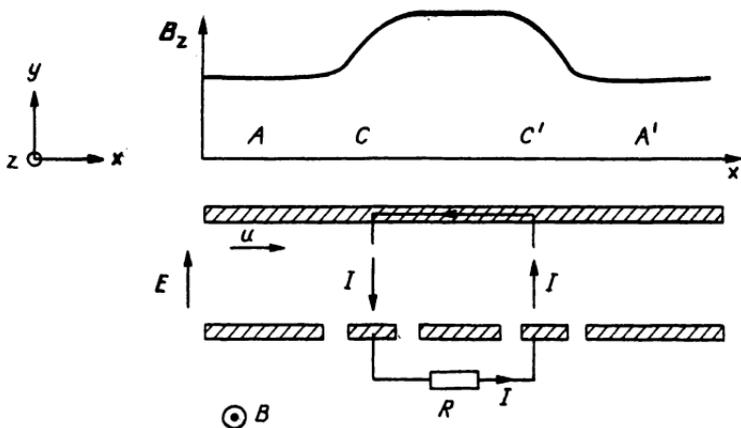


Рис. III.16. Цепь, соответствующая модели (б). Магнитное поле  $B$  в области  $CC'$  сильнее, чем в  $A$  и  $A'$ . Когда плазма входит в область более сильного поля и выходит из нее, в плазме под действием градиента поля наводятся токи, показанные на рисунке. Цепи (а) и (б) иллюстрируют основной механизм взаимного превращения кинетической энергии и энергии цепи.

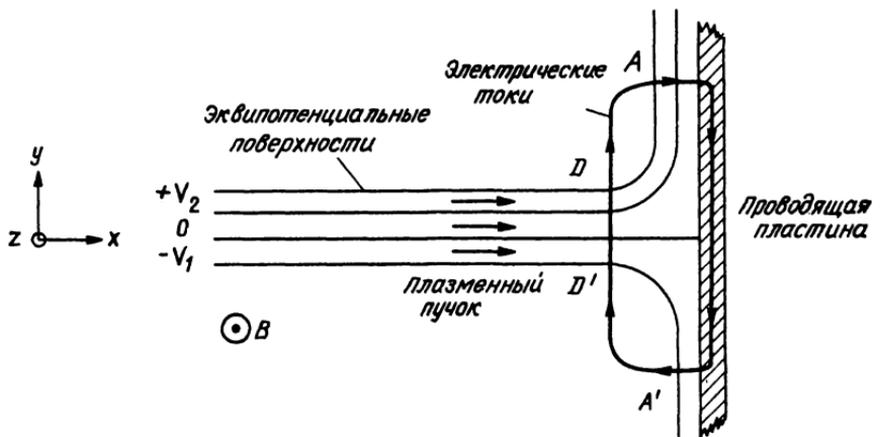


Рис. III.1в. Цепь, соответствующая модели (в). Магнитное поле однородно. Плазменный пучок, движущийся в направлении проводящей пластины, отклоняется, так как плазма дрейфует приблизительно вдоль эквипотенциальных поверхностей. Замедление плазмы в области  $DD'$  приводит к появлению инерционных токов, которые замыкаются так, как показано на рисунке, и вызывают ускорение в областях  $A$  и  $A'$ . Таким образом, отклонение замагниченного плазменного пучка низкой плотности, выстреленного в направлении проводящего препятствия, происходит не в результате столкновения пучка с препятствием и не под действием градиента давления. На частицы пучка действуют лишь электрическое и магнитное поля.

### Модель (в)

В качестве третьего примера рассмотрим однородный пучок плазмы, ограниченный эквипотенциальными поверхностями  $+V_1$  и  $-V_2$  и находящийся в однородном магнитном поле, который выстреливается в направлении бесконечно проводящей плоскости нулевого потенциала. Поведение пучка зависит от значений  $V_1$  и  $V_2$ , плотности пучка и электрического поля при  $y \rightarrow \pm \infty$ . Предположим сначала, что интенсивность пучка настолько невелика, что генерируемые им токи практически не искажают внешнее магнитное поле, а эквипотенциали имеют вид, изображенный на рис. III.1в.

В первом приближении как ионы, так и электроны перемещаются вдоль эквипотенциалей. Однако в местах ослабления (на сгибе эквипотенциалей) и последующего усиления (при больших положительных и отрицательных значениях  $y$ ) электрического поля за счет торможения частиц в областях  $D$  и  $D'$  и ускорения в  $A$  и  $A'$  возникают инерционные токи. В результате образуется токовая система, изображенная на рис. 1в [ср. с моделью (б)].

Если увеличить интенсивность пучка, токовая система будет генерировать более сильное магнитное поле в местах поворота пучка. В результате пучок еще более замедлится, а инерционные токи возрастут и станут более концентрированными. При достаточно больших плотностях пучка может образоваться поверхностный инерционный ток («фронт ударной волны»).

Передача энергии из замедляющей области в ускоряющие осуществляется цепью точно так же, как и в модели (б).

Из рассмотренной модели следует интересный вывод, состоящий в том, что пучок плазмы с низкими плотностью и температурой, наталкивающийся на проводящее препятствие, отклоняется *исключительно из-за того, что препятствие искажает электрическое поле пучка*. При низкой интенсивности пучка внешнее магнитное поле практически не искажается; если, кроме того, температура плазмы в пучке не высока, не возникают существенные градиенты давления, и тем не менее пучок отклоняется.

Эта задача относится к категории задач, которые следует решать на языке токов (см. рис. I.4).

## III.2. АВРОРАЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ

Уже из данных первых измерений магнитного поля, проводившихся в зоне полярных сияний, следовало, что в ионосфере имеются сильные горизонтальные токи, текущие в направлении восток — запад. Биркеланд полагал, что они, скорее всего, замыкаются вертикальными токами, которые он пытался исследовать с помощью измерений и опытов с тереллой. Однако позднее Чепмен провозгласил, что вертикальных токов быть не может, так как Земля погружена в «вакуум», и поэтому

вблизи нее нет носителей тока. Он и Вестин построили модель токовой системы, расположенной целиком в ионосфере. Поскольку Чепмен обладал огромным авторитетом, все попытки развить идеи Биркеланда не принимались всерьез до тех пор, пока прямые измерения, проведенные в космическом пространстве [4], не разрешили это разногласие, существовавшее в течение полувека, в пользу Биркеланда.

Эти измерения обнаружили области, в которых токи текут вертикально вверх и вертикально вниз и которые разделены по широте всего лишь примерно на  $5^\circ$  (рис. III.2). На вечерней стороне широта области, в которой токи текут вверх, больше широты области, где токи текут вниз. На утренней же стороне наблюдается обратная картина. Измерения ионосферных токов, замыкающих цепи Биркеланда, показали, что на вечерней стороне замыкание осуществляется северными токами, а на утренней — южными.

Другая токовая система, которая в основном исследуется группой из университета Джона Гопкинса [5–8], содержит также долготные токи (рис. III.3). Эти токи, текущие с востока на запад, обладают слоистой структурой, однако их плотность далеко не постоянна. Иногда слои состоят из ряда волокон, нередко имеющих эллиптическое сечение.

Указанные токи подвержены сильным вариациям, а их структура, как правило, бывает чрезвычайно сложной. Чтобы разобраться в основных механизмах, мы рассмотрим здесь несколько простых моделей (оставляя исследование глобальной токовой модели до разд. III.6). Мы представим наблюдаемую токовую систему в виде трех эквивалентных цепей, в двух из которых имеются токи, текущие в меридиональной плоскости (ток  $ACI$ ; см. рис. II.17), а в третьей — долготный ток ( $ACII$ ; см. рис. III.4). Если смотреть с дневной стороны, ток  $ACI$  течет по часовой стрелке как на вечерней, так и на дневной сторонах.

Выяснив геометрию цепей, необходимо найти э. д. с., поддерживающую ток, элементы цепей  $R$  и  $L$  и двойные слои, если они имеются. (Под термином «двойной слой» мы подразумеваем падение напряжения вдоль силовой линии в нижней магнитосфере, даже если оно частично возникло под действием эффекта магнитного зеркала (см. разд. II.6.2).)

Э. д. с.  $V_b$  определяется интегралом

$$V_b = \oint \vec{v} \times \vec{B} \cdot d\vec{s}, \quad (20)$$

взятым по всему замкнутому контуру. Поскольку интегралы вдоль силовых линий  $B_1$  и  $B_2$  равны нулю (см. рис. II.17), то э. д. с.  $V_b = \int_{a_2}^{a_1} + \int_{a_1}^{a_2}$ . Мы используем систему координат, вращающуюся вместе с Землей, поэтому в интеграл  $\int_{a_1}^{a_2}$  дают вклад лишь ионосферные ветры. Пренебрегая этим вкладом, получим

$$V_b = \int_{c_2}^{c_1} (\vec{v} - \omega \vec{r}) \times \vec{B} ds, \quad (21)$$

где  $\vec{v} - \omega \vec{r}$  — разность между скоростью плазмы и синхронной ско-

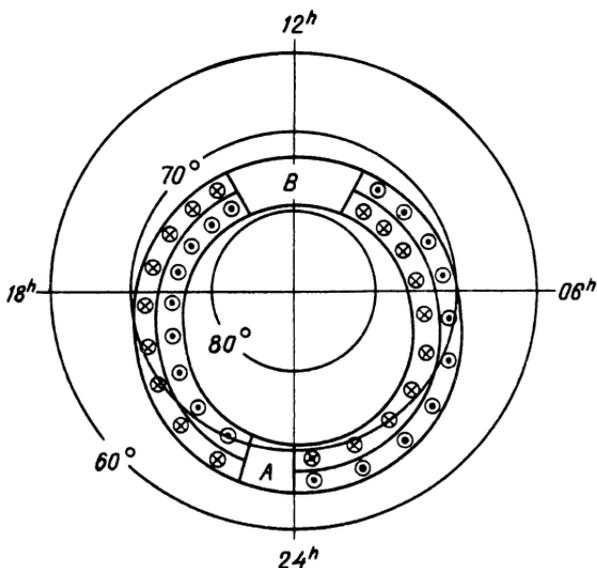


Рис. III.2. Вертикальные токи в зоне полярных сияний [4]. На вечерней стороне токи, текущие вниз (обозначены крестиком), наблюдаются на более низких широтах, чем токи, текущие вверх (обозначены точкой); на утренней стороне направления токов изменяются на противоположные.

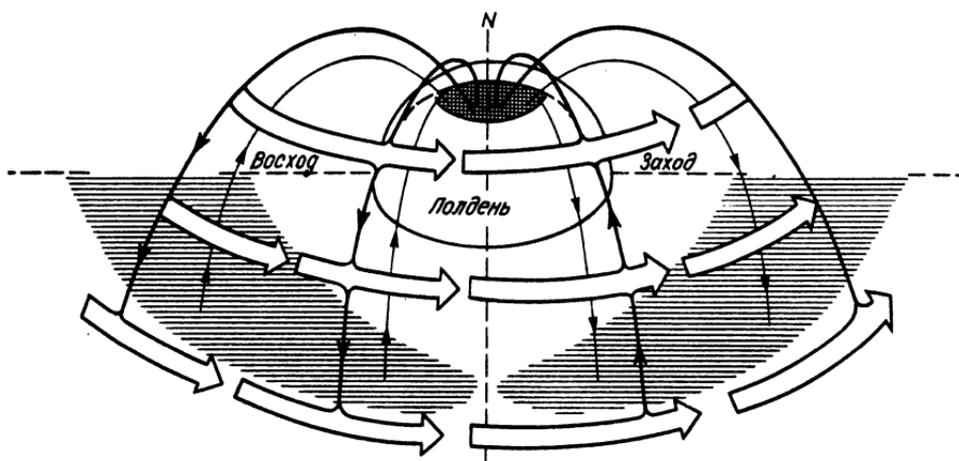


Рис. III.3. Токовая система, предложенная в работе [6]. Токовый слой, который представляет собой ток в магнитопаузе, текущий по внешней поверхности пограничного слоя с запада на восток, изображен в виде широких стрелок. Внутри него расположена токовая система, показанная на рис. III.2, из которой здесь представлены лишь внешние токи.

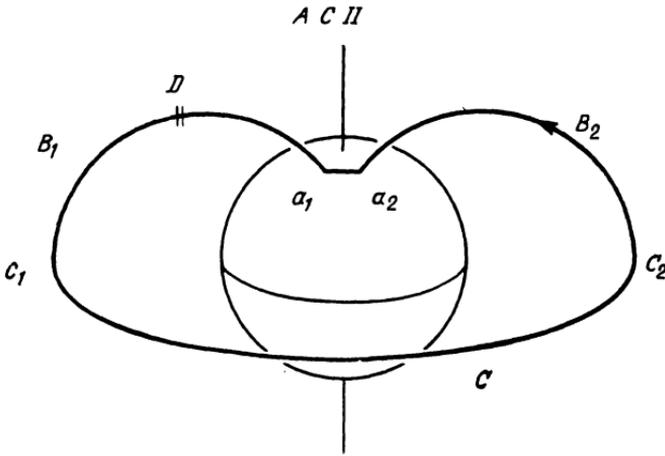


Рис. III.4. Авроральная цепь ACII. Эта цепь сходна с цепью ACI, показанной на рис. II.17, но здесь токнесущие силовые линии  $B_1$  и  $B_2$  находятся на одной и той же широте, но на разных долготах. Линия  $c_1c_2$  является дугой окружности, лежащей в экваториальной плоскости; линия  $a_1a_2$  проходит через зону полярных сияний. Ср. с рис. III.3.

ростью. Энергия, выделяющаяся в авроральной электрической цепи, черпается из кинетической энергии плазмы, движущейся в экваториальной плоскости. Этот процесс сходен с передачей энергии в замедляющей области  $D$  в модели (а), рассмотренной в разд. III.1.3.

Приведем численные оценки для широты  $\lambda = 67^\circ$ , находящейся в зоне полярных сияний. Магнитная силовая линия, входящая в Землю на этой широте, пересекает экваториальную плоскость на расстоянии

$$r_e = \frac{R_\oplus}{\cos^2 \lambda} \quad (22)$$

от центра Земли.

Магнитное поле на этом расстоянии

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{\mu_\oplus}{r_e^3}, \quad (23)$$

где  $\mu_\oplus$  — магнитный момент Земли. Учитывая, что  $\mu_\oplus = 8,2 \cdot 10^{22}$  А·м<sup>2</sup> и  $R_\oplus = 6,4 \cdot 10^6$  м, для  $B$  получим значение порядка  $10^{-7}$  Т. При  $\int ds = 10^8$  м для получения напряжения в 3 кВ необходимо, чтобы разность  $(v - \omega r)$  равнялась 0,3 км/с.

Для грубой оценки индуктивности  $L$  можно воспользоваться формулой для индуктивности круговой петли радиусом  $a$ , сделанной из провода, радиус сечения которого равен  $b$ :

$$L = \mu_0 a \left( \frac{1}{4} + \ln \frac{8a}{b} - 2 \right). \quad (24)$$

При  $a = 10^7$  м и  $b = 5 \cdot 10^3$  м получим  $L = 30$  Гн.

Если вычислять омическое сопротивление цепи  $R$ , используя формулу Спитцера, то везде, за исключением ионосферы, оно обычно оказывается очень малым, однако в  $R$  должны входить и все остальные потери, которые трудно рассчитать.

Если в цепи нет двойных слоев (разд. II.5 и II.6.5), ток нарастает, достигая своего значения насыщения  $I_s$ . Если в цепи образуется взрывающийся двойной слой до того, как ток достигнет насыщения, цепь замыкается. В результате один и тот же процесс будет периодически повторяться (см. разд. II.6.5 и рис. II.21).

### III.3. НАМАГНИЧЕННОЕ ТЕЛО, ВРАЩАЮЩЕЕСЯ В ПЛАЗМЕ

Поскольку в авроральной токовой системе, изображенной на рис. II.17, токи текут поперек магнитного поля как в ионосфере (вдоль линии  $a_1a_2$ ), так и в плазме (вдоль линии  $c_1c_2$ ), расположенной в экваториальной плоскости, эти токи, очевидно, будут переносить момент количества движения от центрального тела к окружающей плазме.

Поэтому изучение авроральной токовой системы очень важно для прояснения одной из основных проблем астрофизики, а именно проблемы взаимодействия вращающегося намагниченного тела с окружающей плазмой (конечно, с учетом гравитационного поля тела). В простейшем случае намагниченность считается однородной и параллельной (или антипараллельной) оси вращения (см. рис. III.5).

В идеализированном случае, когда учитываются лишь магнитогидродинамические эффекты, плазма находится в состоянии изоротации Ферраро (см. [3, разд. 3.11.2]). Однако такой случай не соответствует действительности по целому ряду причин. Прежде всего вследствие ограниченных размеров окружающей тело плазменной области всегда имеется внешняя граница области изоротации. В случае Земли синхронный радиус сравним с линейными размерами магнитосферы, вне которой нельзя ожидать изоротации. Даже ближе к диполю наблюдается общий дрейф плазмы в направлении Солнца, свидетельствующий о том, что граница области изоротации совпадает с границей плазмосферы. При большем удалении разность угловых скоростей приводит к появлению э.д.с. (стремящейся восстановить изоротацию), которую может принять на себя двойной слой. Следовательно, двойные слои *разрывают* связь, необходимую для выполнения условий применимости теоремы изоротации Ферраро.

В магнитосфере Солнца (гелиосфере, или межпланетном пространстве) изоротация не возникает из-за воздействия солнечного ветра. Вместо нее в экваториальной плоскости образуется тонкий токовый слой. Токовая система в гелиосфере будет рассмотрена в разд. III.4.

Информация, которую мы можем получить при изучении процесса передачи момента количества движения окружающей плазме, может служить основой для подхода к проблеме, относящейся к ранней стадии

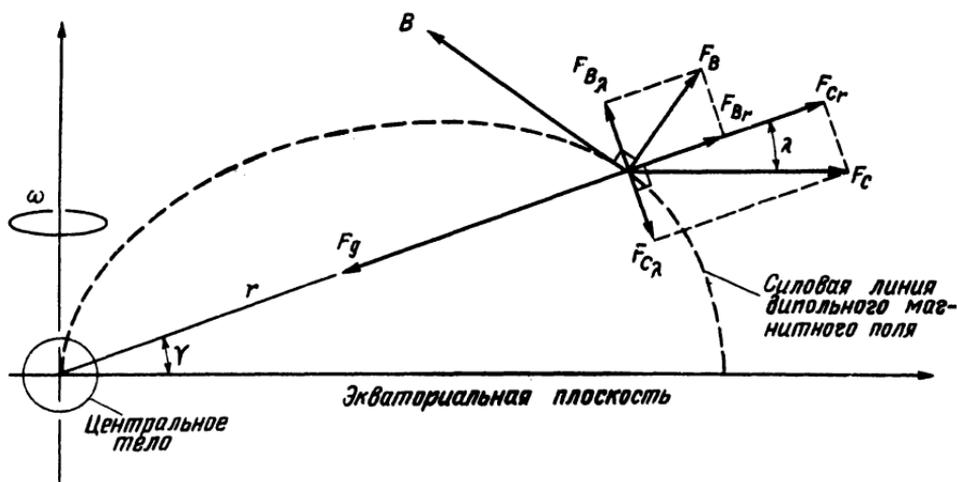


Рис. III.5. При наличии двойного слоя вращающееся центральное тело не может привести окружающее его плазменное облако в состояние изоротации. Вместо этого плазменное облако приходит в состояние частичной коротации, которое определяется из условия равновесия центробежной силы  $F_c$ , гравитационной силы  $F_g$  и электромагнитной силы  $F_B$ . При этом условии  $F_c$  всегда меньше  $F_g$  и плазма не «растягивает» магнитные силовые линии.

эволюции Солнечной системы. Эта проблема состоит в том, каким образом осуществлялась передача момента количества движения от Солнца планетам в процессе их образования и от самих планет спутникам. Основное отличие ранней Солнечной системы от современной состоит, по-видимому, в том, что в прежние времена плотность плазмы в областях, окружающих центральное тело, была гораздо выше. В настоящее время плотность плазмы в магнитосферах Юпитера и Сатурна настолько мала, что она приводится в состояние изоротации Ферраро на очень больших расстояниях от планеты. На ранних же стадиях космогонической эволюции для установления изоротации требовались существенно большие токи. Однако эти токи могли оказаться достаточно большими для возникновения двойных слоев, слегка нарушающих условия, необходимые для изоротации. В результате могло реализоваться состояние («частичная коротация свободно вращающейся плазмы»), в котором гравитационная сила уравнивается центробежной. В этом состоянии под влиянием геометрии магнитного поля плазма должна приобретать угловую скорость, равную  $(2/3)^{1/2}$  кеплеровской скорости [9, гл. 17]. Строение пояса астероидов и колец Сатурна объясняется этим явлением.

Аналогичные явления могут определять эволюцию галактик. Момент количества движения межзвездной среды может передаваться в межгалактическую среду, а кинетическая энергия последней по плазменным кабелям — окружающим телам (разд. III.4.4).

### III.4. ГЕЛИОСФЕРНАЯ ТОКОВАЯ СИСТЕМА

#### III.4.1. «Секторная структура» и экваториальный токовый слой

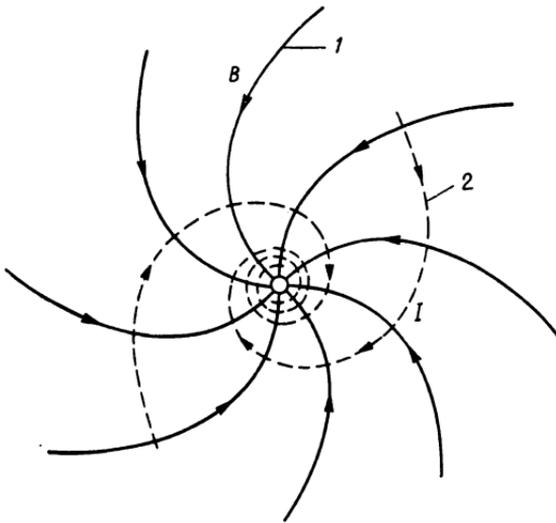
С помощью измерений с космических аппаратов, которые до сих пор проводились в окрестности плоскости эклиптики, было обнаружено, что межпланетное магнитное поле в одних областях направлено к Солнцу, а в других — в противоположную сторону (рис. III.6). Эти области разделены чрезвычайно резкой границей, представляющей собой, очевидно, токовый слой. Его толщина, как правило, составляет всего лишь  $1 \div 10$  протонных ларморовских радиусов (т. е.  $\sim 10^6$  м) [10]. Сначала считали, что эти токовые слои перпендикулярны к плоскости эклиптики и образуют «секторную структуру» как межпланетного пространства, так и солнечной атмосферы. С точки зрения токового описания такая интерпретация выглядит абсурдной, потому что из нее, например, следует, что на орбите Земли большие токи, текущие в слоях, должны соединяться с Солнцем вдоль меридиональных плоскостей. Более вероятно, что наблюдаемые токовые слои представляют собой часть системы, содержащей экваториальный токовый слой. Как показывает схема такой системы, построенная на основании теоретических соображений (рис. III.7), изменение направления поля связано с положением Земли относительно слоя.

В работе [11] приведены убедительные экспериментальные доказательства справедливости такой теоретической модели (см. также [12, 13]). Она была однозначно подтверждена данными измерений в космическом пространстве, представленными в [14]. Явление, которое иногда ошибочно называют «секторной структурой» солнечного ветра, обусловлено относительно малыми смещениями вверх и вниз (порядка  $10-20^\circ$ ) солнечного экваториального токового слоя. Оно сходно с волнообразным движением юбки кружащейся балерины. В нашей модели мы пренебрегаем этим явлением и аппроксимируем скачок магнитного поля тонкой токовой поверхностью, совпадающей с экваториальной плоскостью. К северу от этой плоскости магнитные силовые линии представляют собой закручивающиеся спирали, а к югу — такие же, но раскручивающиеся спирали. Вычислив ротор от этого магнитного поля, нетрудно показать, что в экваториальной плоскости имеется поверхностный ток, текущий вдоль закручивающихся логарифмических спиралей (рис. III.6).

Возможно, что направления магнитного поля и электрических токов изменяются на противоположные при смене солнечного цикла.

#### III.4.2. Построение гелиосферной токовой модели

До сих пор мы не делали ничего, кроме формального перехода с описания на языке магнитных полей к описанию на языке токов. Но как только мы переходим на язык токов, сразу же появляется целый



**Рис. III.6.** Магнитные силовые линии (сплошные кривые), расположенные выше экваториальной плоскости и линии тока (штриховые кривые), ортогональные магнитному полю, которые находятся в экваториальной плоскости. Немного ниже экваториальной плоскости силовые линии имеют такую же геометрию, но противоположное направление.

ряд вопросов. Как ток замыкается? Где находится источник э. д. с? Переносит ли ток энергию из одной области в другую или нет? Ответы можно получить непосредственно.

Ток имеет радиальную составляющую, следовательно, он переносит заряд в направлении Солнца. Из закона Кирхгофа следует, что такой же по величине ток должен течь и от Солнца, причем он может протекать в области, которая пока недоступна для прямых измерений с помощью космических аппаратов (то есть на больших широтах). Этот ток проще всего представить в виде двух токов, текущих вдоль оси (или вблизи нее). Поскольку радиальный ток в экваториальной плоскости составляет примерно  $3 \cdot 10^9$  А (это значение получено из измерений магнитного поля), а сумма осевых токов тоже должна равняться  $3 \cdot 10^9$  А, каждый из них в случае симметрии должен составлять  $1,5 \cdot 10^9$  А. Таким образом, *простой перевод* с языка полей на язык токов позволил нам сделать заранее неочевидное предсказание о существовании токов в осевой области.

Эти рассуждения приводят к модели эквивалентной гелиосферной токовой цепи (рис. III.7), которая в простейшем случае состоит из центрального тела, намагниченного внутренним током (*ACI* на рис. II.17), радиального тока  $I_0$ , текущего в экваториальной плоскости и однородно распределенного по долготе от 0 до  $2\pi$ . Далее, два осевых тока, каждый из которых равен  $I_0/2$ , должны течь в противоположных направ-

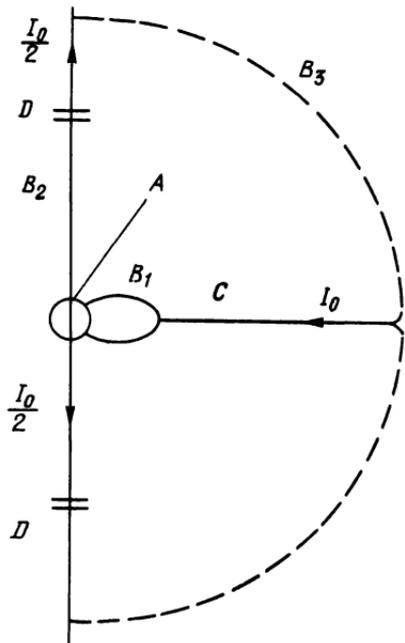


Рис. III.7. Экваториальная цепь для гелиосферы. Солнце действует как униполярный индуктор (A), генерирующий ток, который течет от Солнца вдоль оси ( $B_2$ ), к Солнцу в экваториальной плоскости  $C_1$  и вдоль магнитных силовых линий  $B_1$ . Ток замыкается на больших расстояниях от Солнца ( $B_3$ ).

влениях. Вся цепь замыкается на «бесконечности». Источником э. д. с. является вращающееся центральное тело (за счет униполярной индукции).

В цилиндрической системе координат ( $r, \varphi, z$ ) магнитное поле тока  $I_0/2$  выражается следующим образом:

$$B_\varphi = \frac{\mu_0 I_0}{4\pi r} \text{ при } z > 0 \tag{25a}$$

и

$$B_\varphi = -\frac{\mu_0 I_0}{4\pi r} \text{ при } z < 0. \tag{25б}$$

Чтобы магнитные силовые линии вблизи экваториальной плоскости имели форму спиралей, к току  $I_0$  следует добавить систему круговых токов  $I_\varphi$ .

Если считать, что солнечный ветер распространяется радиально с постоянной скоростью  $v_s$ , а магнитное поле параллельно этой скорости в системе координат, вращающейся с угловой скоростью Солнца  $\Omega$ , то  $v_\varphi = r\Omega$ . Тогда на основании этого предположения и уравнений (25a) и (25б) можно получить следующие выражения для компонент магнитного поля и поверхностной плотности тока  $i$ :

$$B_r = B_0 (r_0/r)^2, \tag{26}$$

$$B_\varphi = B_r (v_\varphi/v_s) = B_0 (r_0/r), \tag{27}$$

$$i_r = \frac{I_0}{2\pi r_0} \frac{r_0}{r} = i_0 \left( \frac{r_0}{r} \right), \quad (28)$$

$$i_\varphi = i_r (v_s/v_\varphi) = i_0 (r_0/r)^2, \quad (29)$$

где  $r_0 = v_s/\Omega$  — расстояние от Солнца до точки, в которой магнитная силовая линия (спиральная) составляет угол  $45^\circ$  с радиус-вектором,  $B_0$  — радиальное магнитное поле при  $r = r_0$  и  $i_0 = I_0/2\pi r_0$  — поверхностная плотность радиального тока на этом расстоянии. Далее,  $I_0 = 2\pi r_0 i_0 = (4\pi/\mu_0) B_0 r_0$ . При  $B_0 = 2 \cdot 10^{-9}$  Т и  $r_0 = 1,5 \cdot 10^{11}$  м получаем ток  $I_0 = 3 \cdot 10^9$  А.

### III.4.3. Свойства гелиосферной цепи

Описанная выше модель обладает следующими свойствами, которые можно сравнить с наблюдаемыми свойствами Солнца и гелиосферы.

Центральное тело действует как униполярный генератор, создающий э.д.с. в области  $A$  (рис. III.7). Механическая сила  $d\vec{F} = Id\vec{s} \times \vec{B}$ , приложенная к солнечной атмосфере, стремится затормозить вращение центрального тела к окружающей плазме. Следовательно, в полярной области к солнечной атмосфере приложена тормозящая сила. Это может привести к дифференциальному вращению Солнца, которое наблюдается и в действительности (угловая скорость вращения уменьшается с широтой). Вопрос о том, дает ли такая интерпретация правильное количественное объяснение дифференциального вращения, остается пока открытым.

В области  $V_1$  токи текут вдоль силовых линий. Такие токи часто проявляют себя в виде светящихся волокон, и это можно считать общей закономерностью, характерной для объектов космической физики (разд. II.4). Если ток, текущий в области  $V_1$ , имеет значительное сечение, можно ожидать появления волокнистых структур в этой области. Возможно, что возникновение *экваториальных лучей* в солнечной короне объясняется этим механизмом.

Аналогичным образом вертикальные токи в полярных областях вблизи поверхности Солнца могут создавать *полярные щеточки* в солнечной короне.

Из нашей модели следует, что вблизи оси должны течь достаточно большие токи, равные в сумме экваториальному току. Эти токи, возможно, удастся наблюдать, когда будут запущены космические аппараты в высокоширотные области гелиосферы. Неясно, насколько сильно такие токи сосредоточены к оси. Возможно, что область, где текут эти токи, имеет значительное сечение и они отличны от нуля также и в средних широтах.

Наряду с рассмотренными явлениями возможно возникновение, особенно под действием осевых токов, электростатических двойных слоев

(и/или падений напряжения, вызванных зеркальным эффектом). Это означает, что вдали от Солнца могут появиться области  $D$  (см. рис. III.1), в которых происходит выделение энергии без видимых путей ее восполнения. Указанное явление сходно с механизмом выделения энергии в двойных слоях, образовавшихся в зоне полярных сияний. Если двойной слой возникает вдали от Солнца, он может излучать радио- и плазменные волны, поддающиеся регистрации. Одно из возможных приложений такого явления обсуждается в следующем разделе.

### III.4.4. Применение полученных результатов к объектам галактических масштабов: двойные радиисточники

Если в гелиосферной цепи заменить вращающееся намагниченное Солнце галактикой, которая тоже намагничена и вращается, можно ожидать, что результирующая токовая система останется прежней, но ее линейные размеры увеличатся примерно на 9 порядков. Конечно, подобная экстраполяция выглядит весьма смелой, но нельзя забывать, что при успешном переходе от лабораторных экспериментов к магнитосферным линейный масштаб изменяется почти во столько же раз. (Безусловно, все теории плазменных явлений, происходящих в областях пространства, недоступных для локальных измерений, являются умозрительными!)

Генерируемая э. д. с. определяется интегралом (20), взятым вдоль линии, соединяющей центр галактики с областью, где ток покидает галактику, т. е. с внешней ее границей. Внутри галактики ток может течь в плоскости ее симметрии подобно току, текущему в экваториальной плоскости Солнца, однако для наших целей картина распределения тока внутри галактики, вообще говоря, не очень существенна. Электродвижущая сила, черпающая свою энергию из энергии вращения галактики, приложена к двум параллельным цепям, одна из которых находится на «севере», а другая — на «юге» (рис. III.8). Поскольку галактики, как правило, симметричны относительно «экваториальной» плоскости, разумно считать, что эти две цепи одинаковы. Поэтому можно ожидать, что токовая система обладает высокой степенью симметрии (по крайней мере в идеализированном случае).

Известно, что в магнитосфере ток, вытекающий из ионосферы, создает двойные слои (или падения напряжения за счет зеркального эффекта) на некотором расстоянии от Земли (разд. II.5.2 и III.2). По аналогии, исходя из сходства плазменных конфигураций, можно ожидать *наличия на оси галактики двойных слоев*, в которых должно наблюдаться мощное выделение энергии. Мы предполагаем, что *образование таких двойных слоев является основным механизмом возникновения двойных источников радиоизлучения*. Это предположение подтверждается сделанным в работе [15] выводом о наличии постоянного притока энергии к этим источникам, обеспечиваемого галактикой, находящейся в центре.

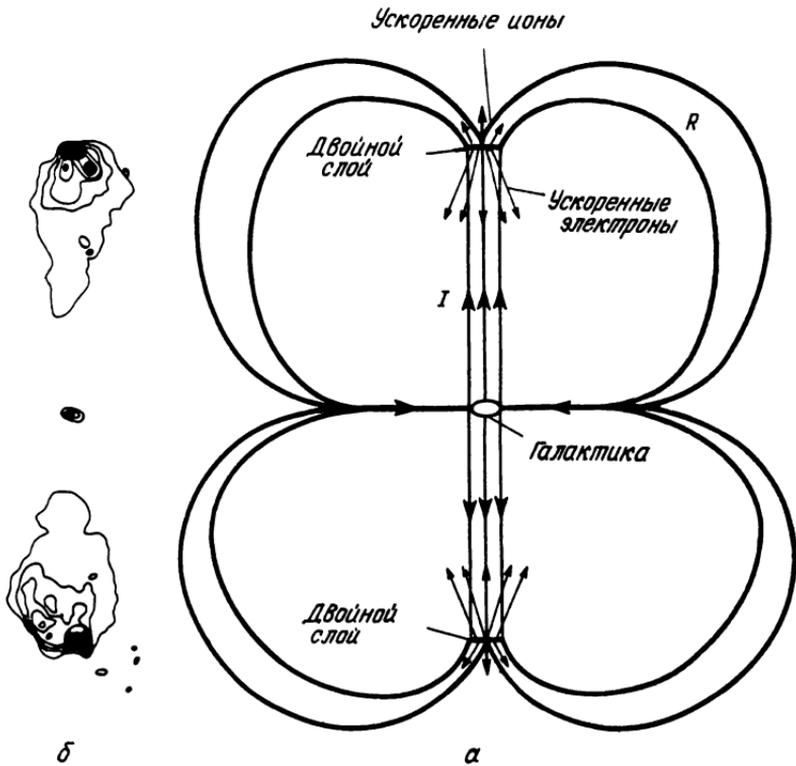


Рис. III.8. Галактическая цепь. *a* — цепь для гелиосферы увеличена примерно в  $10^9$  раз и Солнце заменено на галактику, действующую как униполярный индуктор; *б* — наблюдаемое радиоизлучение источника Лебедь А [15] объясняется синхротронным излучением электронов, ускоренных в двойном слое. Галактика, являющаяся источником энергии, расположена почти посредине между радиоисточниками.

В галактической цепи э.д.с. создается вращающейся намагниченной галактикой, т. е. энергия источника черпается из кинетической энергии вращения. Так же, как и в авроральной токовой цепи, она переносится в двойные слои, где выделяется мощность, равная  $P = IV_D$ . В одном или нескольких двойных слоях по обе стороны галактики происходит ускорение заряженных частиц. Из данных исследования магнитосферы мы знаем, что двойные слои образуются токами, текущими наружу (до сих пор не ясно, могут ли возникать двойные слои, когда токи текут внутрь магнитосферы). Если это справедливо и в галактических масштабах, то поток тепловых электронов, движущийся из внешних областей в направлении галактики, будет последовательно проходить через несколько двойных слоев, в результате чего электроны потока будут ускорены до очень больших энергий. Следовательно, *должен существовать пучок очень энергичных электронов, распространяющийся вдоль оси от*

*двойного слоя к центральной галактике.* Этот механизм ускорения сходен с механизмом ускорения электронов, вызывающих полярные сияния, но его масштаб по размерам и энергиям на много порядков больше. По аналогии с явлением протекания тока в хвосте магнитосферы (разд. III.5) можно сделать заключение, что ток, протекающий в экваториальной плоскости галактики, может привести к образованию двойных слоев, в которых выделяется большое количество энергии.

На рис. III.8 представлена картина двойного источника радиоизлучения, полученная на основе радиоастрономических наблюдений. В нашей модели существенно, что знак э. д. с., создаваемой галактикой, таков, что осевые токи текут наружу. Они образуют двойные слои, которые должны быть расположены на внешних краях мощного радиоисточника. Когда электроны, переносящие ток, попадают в двойной слой, они ускоряются до очень высоких энергий. Точно так же ионы, достигающие двойного слоя при своем движении наружу от центральной галактики, испытывают в нем ускорение. Сильный осевой ток создает магнитное поле, которое сжимает плазму, в результате чего она сосредоточивается внутри цилиндра малого радиуса, расположенного вдоль оси.

Хотя электроны ускоряются в основном вдоль направления магнитного поля, они будут рассеиваться на его неоднородностях и двигаться по спиральным траекториям, испуская синхротронное излучение. Ускоренные электроны будут больше напоминать горячий газ, чем моноэнергетический пучок. При удалении от двойного слоя электроны будут отклоняться от оси, в результате чего их энергия, а следовательно, и синхротронное излучение будут уменьшаться. Этот вывод согласуется с наблюдениями. Не исключено, что некоторые электроны достигнут центральной галактики, вызывая в ней радиоизлучение. Вполне возможно, что наблюдаемое радиоизлучение из центральной галактики связано с каким-нибудь другим токовым эффектом (можно перечислить несколько возможных механизмов). Однако мы не будем обсуждать здесь подобные явления, происходящие в центральной галактике.

Ионы, пересекающие двойной слой при своем движении наружу, будут ускоряться до тех же энергий, что и электроны. Поскольку их масса покоя существенно больше массы электрона, их синхротронное излучение будет незначительным. Однако имеется целый ряд других механизмов, с помощью которых ионы могут испускать наблюдаемое радиоизлучение из областей, расположенных далеко от центральной галактики.

Следует еще раз подчеркнуть, что, как в магнитосфере и лаборатории, *энергия, выделяющаяся в двойном слое, поставляется в него электрическими токами, которые сами переносятся в основном электронами* относительно низких энергий. Нет никакой необходимости предполагать, что из центральной галактики вырывается пучок электронов высоких энергий (или тем более загадочных «плазмонов»). Скорее наоборот, центральную галактику бомбардируют электроны, обладающие высокой энергией, которую они приобрели в двойном слое. Подробное описание этой теории и сравнение ее с наблюдениями имеются в работе [16].

Количественный анализ результатов наблюдений двойных радиогалактик показывает, что ток в плазме должен быть порядка  $I = 3 \cdot 10^{17}$  А, а падение напряжения на одном или скорее нескольких двойных слоях порядка  $V_D = 3 \cdot 10^{16}$  В. В результате мы оказываемся в диапазоне космического излучения, соответствующем максимальным значениям наблюдаемых энергий. Действительно, из двойных слоев должны вылетать ионы с энергией

$$W = ZeV_D, \quad (30)$$

где  $Ze$  — заряд иона. При  $V_D = 3 \cdot 10^{16}$  В и  $Z = 30$  получаем  $W = 10^{18}$  эВ.

Частица может приобрести энергию такого же порядка и за счет бетатронного ускорения (см. [3, разд. 2.3.1]), и при пинч-эффекте. Действительно, если ток  $I$  создает магнитное поле  $B = \mu_0 I / 2\pi r$ , то это поле может удерживать и ускорять частицы жесткости  $B\gamma$ . Существенная часть энергии синхротронного излучения радиоисточника принадлежит, по-видимому, космическим лучам чрезвычайно высоких энергий.

Нет смысла подчеркивать, что предложенная здесь модель является, безусловно, чисто умозрительной, как и все модели, относящиеся к областям пространства, недоступным для космических аппаратов (см. рис. I.2).

### III.5. ЭКВИВАЛЕНТНЫЕ ЦЕПИ ХВОСТА МАГНИТОСФЕРЫ, КОМЕТ И ВЕНЕРЫ

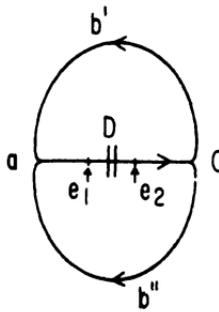
#### III.5.1. Цепь для хвоста магнитосферы и магнитные суббури

Электрическая цепь для тока, намагничивающего хвост магнитосферы, принципиально очень проста (рис. III.9). Она содержит плазменный слой, в котором ток течет от  $a$  до  $c$  в плазме, которая либо неподвижна, либо медленно перемещается относительно Земли. Цепь замыкается токами  $cb'a$  и  $cb''a$ , текущими в солнечном ветре, который находится в магнитном поле  $\vec{B}$  и движется со скоростью  $\vec{v}$  перпендикулярно плоскости рисунка. Э.д.с. определяется выражением

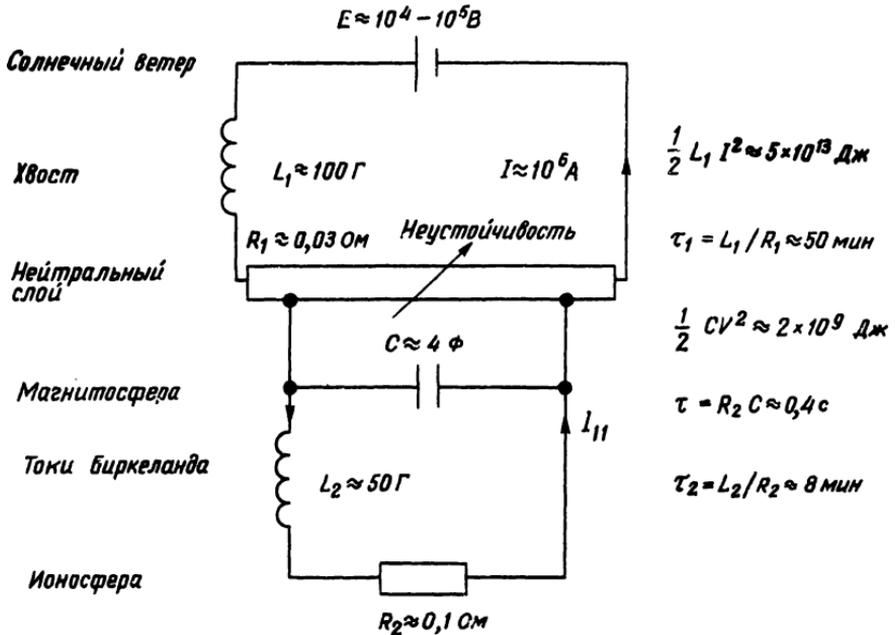
$$V = \int_{cb'a} (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{s}. \quad (31)$$

Когда  $\vec{B}$  имеет южную составляющую вблизи хвоста магнитосферы, э.д.с. поддерживает ток в цепи, показанной на рисунке. Эта цепь является частью более крупномасштабной магнитосферной токовой цепи (разд. III.6).

В слое  $ac$  возможно образование двойного слоя, который иногда взрывается, размыкая ток  $ac$ . Однако из-за большой индуктивности всей цепи ток не может обратиться в нуль мгновенно. Согласно [17], он избирает новый путь и начинает течь вдоль магнитных силовых линий к ионосфере. Это явление дает разумное объяснение *магнитных суббурь*. Его можно описать, используя эквивалентную схему, изображенную на рис. III.10.



**Рис. III.9.** Эквивалентная цепь для хвоста магнитосферы. Элементы цепи  $cb'a$  и  $ab''c$  расположены в солнечном ветре, а элемент  $aDc$  — в хвосте магнитосферы. Солнечный ветер возбуждает э. д. с., равную  $\int_{cb'a} (\vec{v} \times \vec{B}) ds$ , которая поддерживает ток в нейтральном слое хвоста. Эта токовая система определяет магнитное поле в хвосте. В области  $D$  может образоваться двойной слой, в результате взрыва которого развивается магнитная суббуря. Последняя может периодически повторяться согласно рис. III.21.



**Рис. III.10.** Эквивалентный контур, описывающий возникновение магнитной суббури [17]. После начала суббури сопротивление нейтрального слоя возрастает и ток в хвосте изменяет направление и начинает течь к ионосфере.

Исследования показывают, что имеется целый ряд различных явлений, тесно связанных с магнитными суббурами. Так, например, движение дневного каспа (см. рис. I.2, в) и связанной с ним зоны полярных сияний на дневной стороне зависит от активности суббурь и изменений направления межпланетного магнитного поля [18]. Такая очевидная корреляция свидетельствует о сложной природе механизма суббурь.

### III.5.2. Кометная токовая система

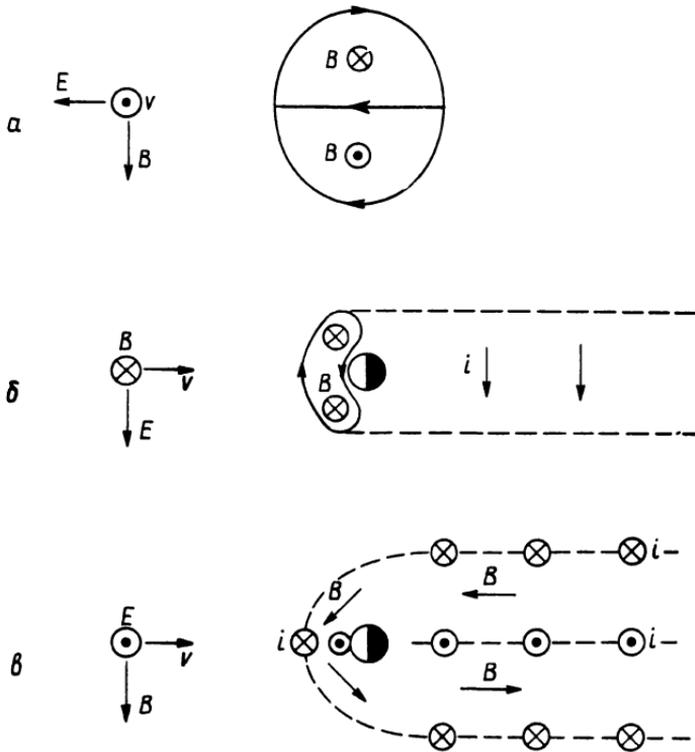
Используя эквивалентную цепь для хвоста магнитосферы в качестве модели, Мендис, частично в соавторстве с Ипом, построил токовую систему для хвостов комет (см. [19]). Предполагается, что ток течет в плоскости симметрии хвоста, так что магнитное поле, проявляющееся в виде волокнистых структур (см. рис. II.6), направлено в разных половинах хвоста в противоположные стороны. Ток в плоскости симметрии может, как и в хвосте земной магнитосферы, прерываться. Возможно, что явление «складывающегося зонта», состоящее во внезапном изменении угла между волокнами в хвосте кометы, вызывается таким запирающим тока. Оно сходно с явлением, вызывающим земные магнитные суббури.

### III.5.3. Токовая система в магнитосфере Венеры

Поскольку Венера, как и комета, не имеет сколько-нибудь существенного собственного магнитного поля, солнечный ветер взаимодействует с ней точно так же, как и с кометами. Грингауз [20], проанализировав результаты локальных измерений, проведенных с помощью космических станций серии «Венера», построил токовую систему, сходную с системой Мендиса, т. е. в некоторой степени подтвердил последнюю результатами прямых измерений.

Токовая система Грингауза (рис. III.11) обладает плоскостью симметрии, параллельной электрическому полю в солнечном ветре (т. е. перпендикулярной той компоненте магнитного поля солнечного ветра, которая направлена поперек радиус-вектора). Поэтому плоскость симметрии изменяет свою ориентацию в пространстве, когда магнитное поле солнечного ветра изменяет свое направление. В хвосте Венеры, т. е. в области тени, имеется *нейтральный слой* с  $B = 0$ , лежащий в плоскости симметрии. В этом слое течет поверхностный ток, который замыкается двумя полукруглыми петлями, идущими «вверх» и «вниз» от плоскости симметрии. Таким образом, полученная эквивалентная цепь в принципе не отличается от цепи, изображенной на рис. III.9.

В лобовой части магнитосферы имеется токовая петля, точно такая же, как и в модели (в) из разд. III.1.3, но здесь роль проводника играет ионосфера Венеры. Измерения [21], описанные в разд. II.4.7, относятся к этому ионосферному току. В этой работе представлены данные прямых измерений токовой системы как в хвосте области обтекания, так и в ее лобовой части. Вполне возможно, что эти системы комбини-



**Рис. III.11.** Токовая система Венеры. *a* – хвост магнитосферы (вид с ночной стороны); *б* – вид с севера; *в* – вид с вечерней стороны [20].

руются в единую систему, как это изображено на рисунке. Имеет смысл также сравнить полученную систему с токовой системой, изображенной на рис. II.2 (без учета авроральной токовой системы).

Описанная токовая система создает магнитное поле, которое можно себе представить как магнитное поле солнечного ветра, обволакивающее препятствие, стоящее на его пути.

Основное отличие магнитосферы Венеры от кометной магнитосферы состоит в том, что гравитационное поле Венеры не позволяет ионосферному газу просачиваться в хвост, поэтому он не светится, как хвост кометы.

Сходство токовых систем для Венеры, комет и хвоста земной магнитосферы указывает на то, что и на Венере должны, по-видимому, наблюдаться магнитные суббури и явления «складывающегося зонта».

### III.6. МАГНИТОСФЕРНАЯ ЭКВИВАЛЕНТНАЯ ЦЕПЬ

Из-за наличия собственного магнитного поля Земля обладает гораздо более сложной токовой системой, чем ненамагниченные тела. Беря за основу модель Мендиса — Грингауза, мы можем охарактеризовать главную особенность, обусловленную наличием собственного магнитного поля. Последнее расщепляет полную токовую систему на фронтальную и хвостовую, между которыми появляется авроральная токовая система.

Току, протекающему в верхней ионосфере Венеры, соответствует в случае Земли гораздо более удаленный от атмосферы ток, текущий в магнитопаузе. Магнитный поток, пронизывающий фронтальную цепь, затем охватывает дипольное поле Земли, сильно искажая его. Поток в хвосте магнитосферы связан частично с потоком сквозь фронтальную цепь, но в основном определяется дипольным полем. В результате получается очень сложная геометрическая конфигурация. (Модели токовой системы в магнитосфере предлагались различными авторами. Одна из первых моделей принадлежит Коулу [22, 23]; см. также [5].)

Мы рассмотрим данную проблему, используя метод последовательных приближений [24]. Начнем с простейшей из возможных моделей: магнитное дипольное поле ( $\mu_{\oplus}$ -дипольный момент), описывающее собственное поле Земли, на которое наложено однородное межпланетное поле  $\vec{B}_{\oplus}$ , либо параллельное, либо антипараллельное оси диполя, плюс однородный солнечный ветер, движущийся со скоростью  $\vec{v}$  перпендикулярно этой оси. Вся система находится в электрическом поле, которое на больших расстояниях от Земли постоянно и равно

$$\vec{E}_s = \vec{v} \times \vec{B}_s \quad (32)$$

#### III.6.1. Нулевое приближение: движение отдельных частиц

Вначале мы будем считать, что плотность плазмы в солнечном ветре настолько мала, что дебаевский радиус значительно превышает линейные размеры всей магнитной конфигурации. В этом случае справедливо одночастичное приближение [25, 26]. Межпланетное магнитное поле должно быть направлено на север, чтобы частицы могли проникать в магнитосферу.

#### III.6.2. Первое приближение: малый плазменный поток

На следующем шаге мы будем по-прежнему считать плазменный поток настолько малым, что возмущениями магнитного поля можно пренебречь. В то же время предположим, что плотность плазмы достаточно высока и дебаевский радиус мал по сравнению с характерной длиной. Следовательно, теперь необходимо учитывать пространственный заряд. На рис. III.12 изображена картина распределения поля для случая, когда межпланетное магнитное поле направлено на север. Магнитная силовая линия, совпадающая на бесконечности с осью дипо-

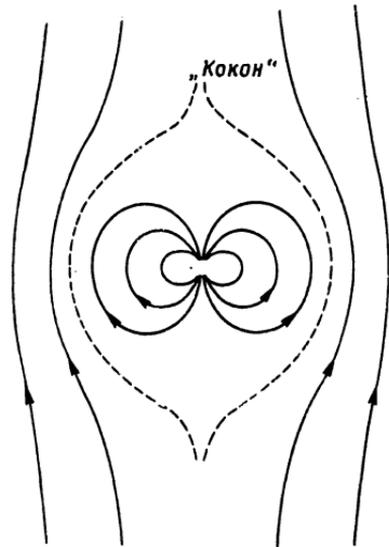


Рис. III.12. Комбинация земного дипольного поля и межпланетного поля, направленного на север. В этом случае связь между дипольным полем и полем солнечного ветра минимальна.

ля, расщепляется на две, которые обволакивают магнитосферу подобно кокону. Поскольку заряд может свободно перемещаться вдоль этих силовых линий, поверхность «кокона», на которой имеется пространственный заряд, является эквипотенциальной. В результате магнитосфера оказывается заэкранированной от солнечного ветра.

Если же межпланетное магнитное поле направлено на юг, то между ним и магнитосферой возникает сильное взаимодействие (рис. III.13).

Получающаяся конфигурация магнитного поля обладает следующими свойствами:

а) В экваториальной плоскости ( $z = 0$ ) образуется нейтральная линия ( $B = 0$ ), находящаяся от диполя на расстоянии

$$r_n = \left( \frac{\mu_0 \mu_{\oplus}}{4\pi B_s} \right)^{1/3}. \quad (33)$$

Считается, что эта линия определяет границу магнитосферы.

б) При  $z \rightarrow \infty$  силовые линии, проходящие через нейтральную линию в экваториальной плоскости, лежат на окружности радиусом

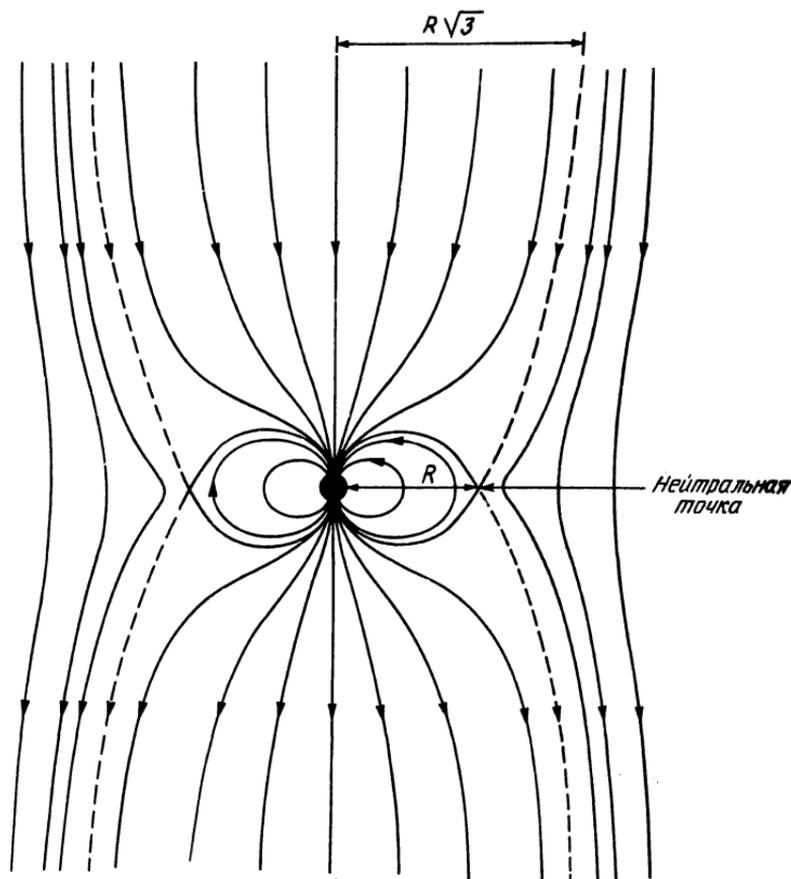
$$r_s = r_n \sqrt{3}. \quad (34)$$

в) Однородное на бесконечности электрическое поле  $E_s$  создает напряжение

$$V = 2r_s E_s \quad (35)$$

между точками  $a$  и  $d$  и  $a'$  и  $d'$  (рис. III.14). Магнитное поле передает эту разность потенциалов магнитосфере.

Эту конфигурацию следует сравнить с моделью (а), рассмотренной в разд. III.1.3 (см. рис. III.1а), иллюстрирующей случай, когда плазма

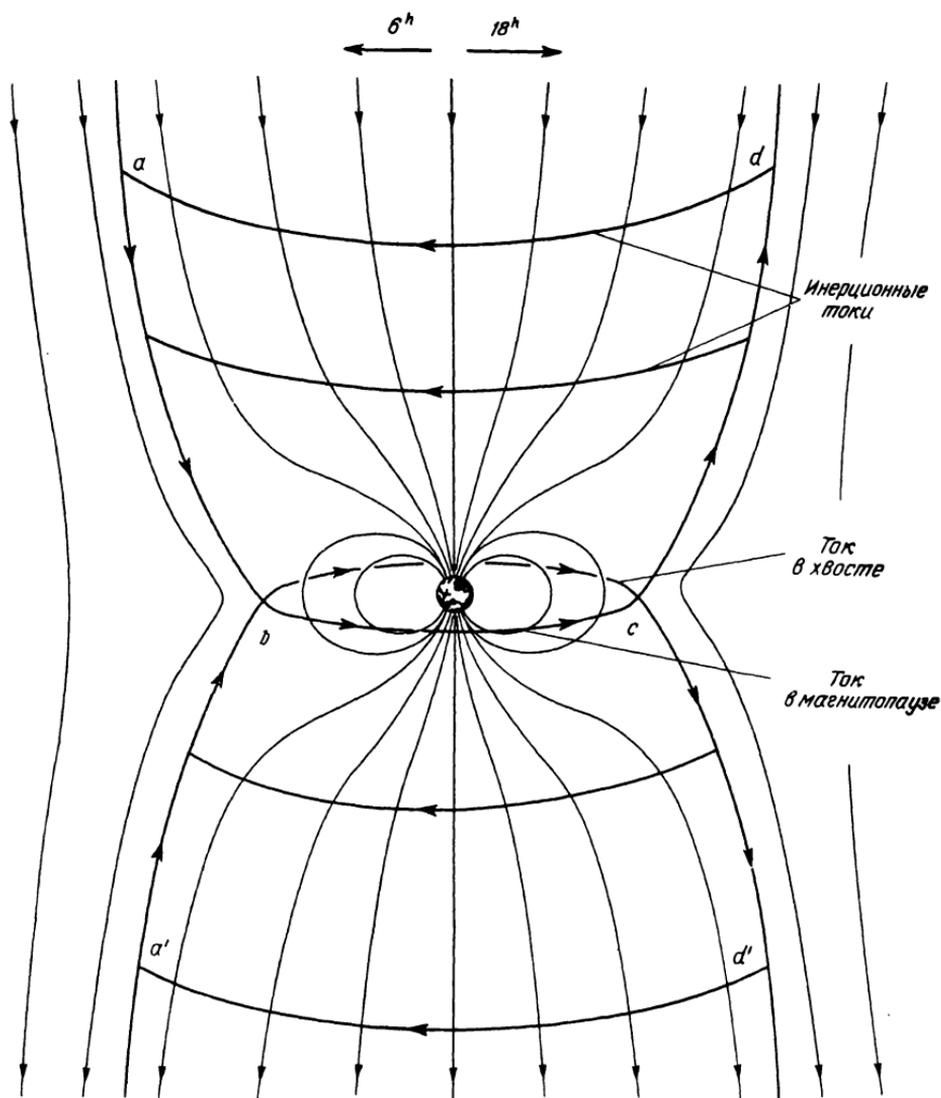


**Рис. III.13.** Комбинация земного дипольного поля и межпланетного поля, направленного на юг. В этом случае связь между полями максимальна.

попадает в замедляющую область, где часть кинетической энергии плазмы за счет инерционных токов преобразуется в (индуктивную) энергию цепи. В нашем случае инерционные токи, текущие вдоль  $ad$  и  $a'd'$ , поглощают энергию солнечного ветра и передают ее магнитосфере с помощью такого же механизма, как и в модели (а). Таким образом, между солнечным ветром и магнитосферой происходит обмен энергией (рис. III.14 а, б). Значение  $R_D$  из схемы на рис. III.1а можно найти, исходя из величины потерь энергии.

Взаимодействие солнечного ветра с магнитосферой приводит к следующим двум важным эффектам:

а) Электрическое поле, переносимое вдоль магнитных силовых линий, вызывает в экваториальной области магнитосферы дрейф плазмы



**Рис. III.14а.** Вид токовой системы со стороны Солнца. Электрическое поле солнечного ветра создает разность потенциалов между силовыми линиями  $aba'$  и  $dcd'$ , под действием которой возникает ток, текущий по солнечной и антисолнечной сторонам нейтральной линии  $bc$ . Это поле также возбуждает токи, текущие вдоль силовых линий и перпендикулярно им во всей магнитосфере.

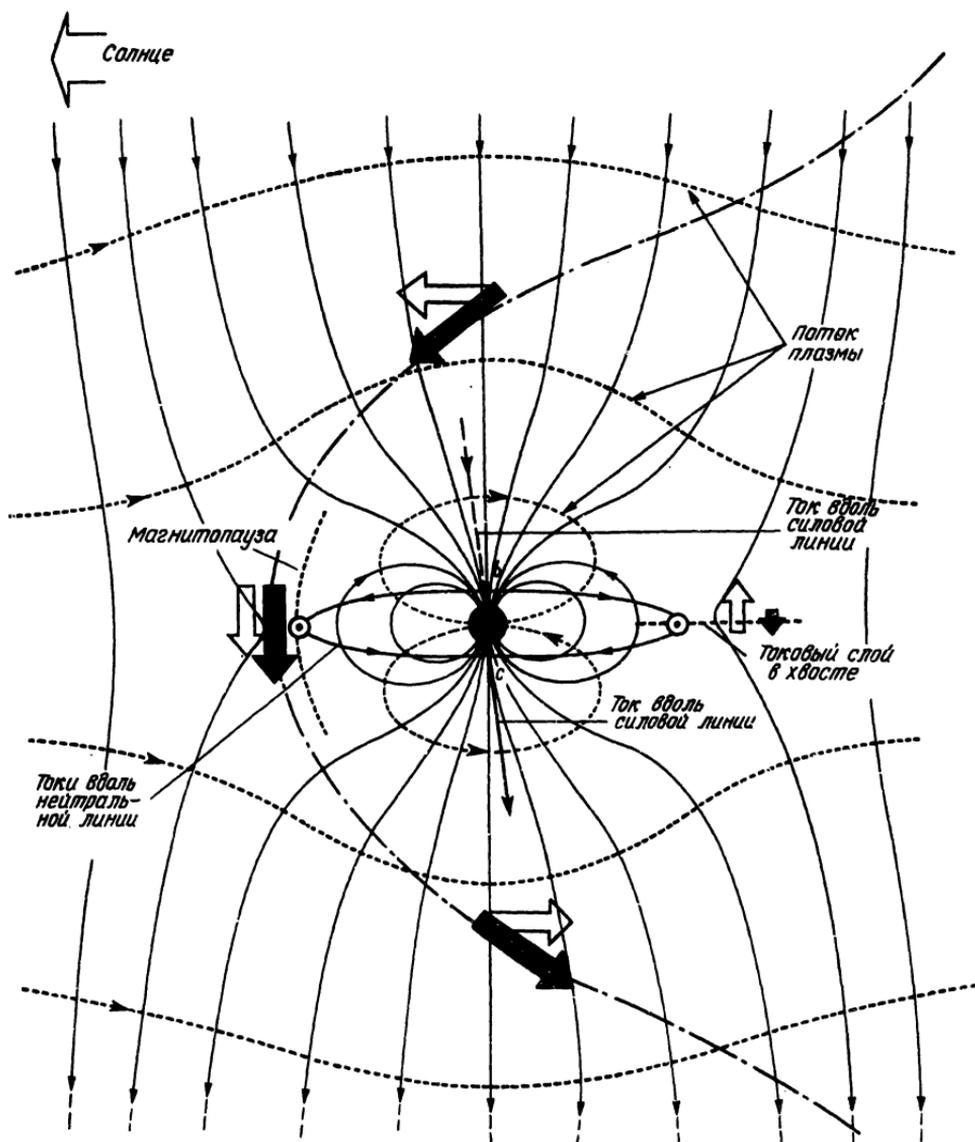
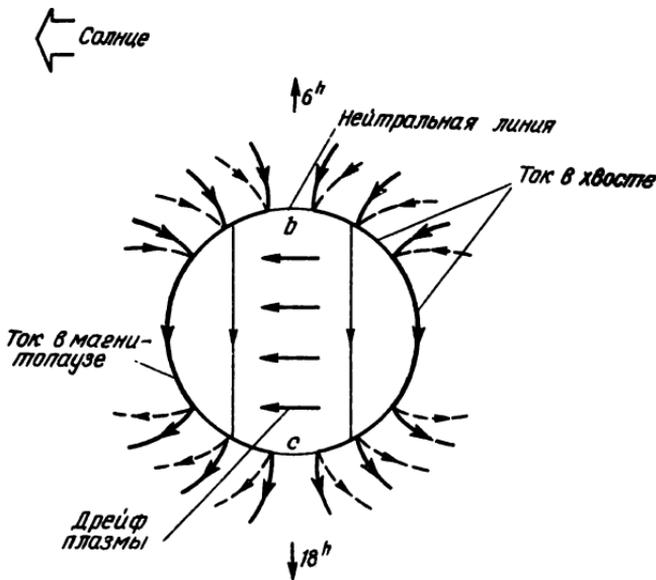


Рис. III.146. Вид токовой системы с вечерней стороны. Показаны также плазменный поток и конфигурация магнитного поля. Токи, текущие вдоль магнитных силовых линий на вечерней и утренней сторонах, замыкаются через солнечный сектор нейтральной линии (что приводит к образованию магнитопаузы) и через антисолнечный сектор (что приводит к образованию нейтрального слоя в хвосте). Светлыми стрелками показано магнитное поле токовой системы, черными стрелками – векторная сумма исходного поля и поля токовой системы, штрихпунктирной линией – типичная силовая линия суммарного магнитного поля.



**Рис. III.15.** Токовая система «солнечный ветер – авроральная область». Вид нейтральной линии со стороны севера.

в сторону Солнца. Для возбуждения и поддержания этого дрейфа энергия должна заимствоваться у солнечного ветра.

б) Возникают токи, текущие вдоль солнечных и антисолнечных секторов нейтральной линии. Поскольку силовые линии, выходящие из полярных ионосфер и уходящие на бесконечность, обладают очень большими пробочными отношениями, электрические токи вдоль них не очень существенны. Следовательно, можно ожидать, что токи будут в основном течь вдоль силовых линий, соединяющих нейтральную линию и бесконечность. Так как магнитосфера эквивалентна импедансу в цепи, инерционные токи вдоль линий  $ad$  и  $a'd'$  создают падения напряжения вдоль этих линий и потому тормозят солнечный ветер.

Инерционные токи замыкают цепь, как показано на рис. III.14 и III.15.

### III.6.3. Три эквивалентные цепи, соответствующие первому приближению

В зависимости от того, как текут токи в магнитосфере, можно представить три различные эквивалентные цепи, описывающие передачу кинетической энергии солнечного ветра магнитосфере. (В солнечном ветре имеются также токи, не затекающие в магнитосферу.) Во всех трех случаях энергия переносится инерционными токами.

А. Цепь для магнитопause. Ток замыкается по дневной части нейтральной линии  $bc$  на рис. III.14 и III.15 (о происхождении названия см. разд. III.6.6, посвященный второму приближению).

Б. *Цепь для хвоста магнитосферы.* Ток замыкается по хвостовой части нейтральной линии  $bc$  (рис. III.14 и III.15).

В. *Цепь «солнечный ветер – авроральная область».* Эта цепь создает и поддерживает дрейф плазмы в экваториальной области магнитосферы в направлении на Солнце. Поскольку токи в этой цепи вызывают электрические разряды в зоне полярных сияний, большая часть мощности цепи идет на излучение («*aurora*» означает «полярное сияние», отсюда и название этой цепи).

### III.6.4. Явления, связанные с токами первого приближения

Таким образом, токовая система, соответствующая первому приближению, вызывает следующие эффекты.

А. *Изменение распределения крупномасштабного магнитного поля.* Легко показать, что токовая система изменяет распределение крупномасштабного магнитного поля, как показано на рис. III.14б.

Б. *Магнитосферный дрейф.* Перенос межпланетного электрического поля в магнитосферу вызывает в области вблизи экваториальной плоскости дрейф плазмы в направлении на Солнце, показанный на рис. III.15 (влиянием плазмосферы мы пренебрегаем). Электрическое поле, связанное с дрейфом, компенсирует приложенное электрическое поле. Магнитные силовые линии, выходящие из ионосферы, могут частично закоротить падение напряжения, так что токи из экваториальной плоскости будут течь в зону полярных сияний и обратно как в области  $b^h$ , так и в области  $18^h$ , что согласуется с токовой системой, предложенной в [27, 4]. Цепь замыкается ионосферными токами – особенно в зоне полярных сияний.

### III.6.5. Второе приближение: плазменный поток, близкий к реальному

Посмотрим теперь, что произойдет, если увеличить слабый поток плазмы солнечного ветра до значений, близких к существующим в действительности. Очевидно, магнитосфера, включая токовую систему, сильно деформируется. Однако топология поля и токов вряд ли изменится до неузнаваемости. Разумно предположить, что в качестве следующего шага можно просто увеличить возмущения, соответствующие первому приближению. Цель второго приближения, которое описывается в разд. III.6.6 – III.6.10 и III.7, – выработать основу для приближения третьего порядка, которое не рассматривается в данной монографии.

### III.6.6. Изменения магнитного поля

Крупномасштабное магнитное поле представляет собой векторную сумму исходного магнитного поля и возмущенного поля. Результат такого суммирования представлен на рис. III.14б. Видно, что получается распределение магнитного поля кометного типа, которое очень сходно

с наблюдаемым. За счет эффекта Данжи [28, 29] токи, текущие вдоль нейтральной линии, превращаются в токовый слой. На дневной стороне магнитосферы линейный ток расширяется вдоль линии, перпендикулярной экваториальной плоскости, и превращается в мощный токовый слой. Этот слой называется *магнитопаузой*. Он получает энергию через токовую цепь для магнитопаузы. Аналогичным образом линейный ток на ночной стороне магнитосферы превращается в токовый слой, но лежащий в экваториальной плоскости. Этот слой называется *нейтральным слоем в хвосте магнитосферы*.

### III.6.7. Эквивалентная цепь для фронта ударной волны

В первом приближении на солнечный ветер вблизи экваториальной плоскости действует магнитное поле, спадающее по мере приближения ветра к нейтральной линии. После образования магнитопаузы магнитное поле перед ней возрастает. В результате дрейф солнечного ветра замедляется и возникает инерционный ток, текущий против тока в магнитопаузе. Данная картина сходна с моделью (в), рассмотренной в разд. III.1.3. Плазма, набегающая на препятствие (в данном случае на магнитопаузу), тормозится и отклоняется не самим препятствием, а электрическим полем, которое наводится препятствием в набегающей плазме. Поскольку возмущения магнитного поля, вызванные инерционным дрейфом, малы, ток течет в слое достаточной большой толщины ([26]; направление тока в этой работе следует изменить на противоположное, так как межпланетное магнитное поле бралось там с другим знаком). Если плотность плазмы достаточно велика, инерционный ток сильно возмущает магнитное поле и токовый слой сжимается до малой толщины. Результирующий тонкий токовый слой и есть «фронт ударной волны», получающийся при исследовании данной проблемы магнитогидродинамическим методом. Из нашей модели следует, что в том случае, когда поток солнечного ветра невелик, вместо фронта ударной волны будет образовываться слой распределенного тока. Из некоторых схем «фронта ударной волны», полученных магнитогидродинамическим методом, не следует, что токи, текущие во «фронте», должны где-нибудь замыкаться. При описании на языке частиц это совершенно очевидно [см. модель (в)]. Сила  $\vec{r} \times \vec{B}$ , действующая во фронтальном токовом слое, тормозит плазму и практически останавливает ее перед магнитопаузой. После этого плазма должна получить ускорение в обе стороны вдоль магнитопаузы. Как и в модели (в), где описание проводилось на языке частиц, это ускорение производится электромагнитными силами. Поэтому мы приходим к выводу, что между фронтальным слоем и магнитопаузой должны течь такие токи, которые вызывают нужное ускорение плазмы силой  $\vec{r} \times \vec{B}$ . В результате мы получаем токовую систему, изображенную на рис. III.16. Ток во «фронте ударной волны» замыкается током в магнитопаузе, который накладывается на основной ток, текущий в цепи для магнитопаузы. Таким образом, мы

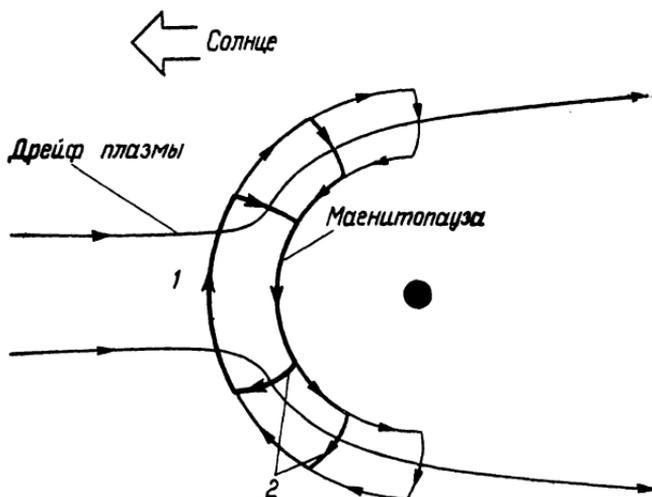


Рис. III.16. Простая картина токовой цепи перед магнитосферой Земли (для фронта ударной волны) (ср. рис. III.1в). Ток, текущий в цепи на участке 1, замедляет солнечный ветер перед магнитосферой. Токи, текущие на участке 2, ускоряют плазму вбок и в сторону хвоста. Цепь замыкается через магнитопаузу. (Можно ожидать, что в корональных токовых петлях ситуация будет обратной, т. е. токи будут ускорять плазму солнечного ветра.)

снова наблюдаем сходство с моделью (в). Цепь для «фронта ударной волны» следует также сравнить с соответствующими цепями для магнитосферы Венеры и комет (см. рис. III.11).

### III.6.8. Эквивалентная цепь для магнитопаузы

Цепь для магнитопаузы остается практически такой же, как и в первом приближении; с ее помощью энергия солнечного ветра передается магнитопаузе. Однако ток, протекавший в первом приближении вдоль нейтральной линии, превращается теперь в поверхностный ток, и не совсем ясно, как он соединяется с токами в солнечном ветре. Далее, поскольку часть тока в магнитопаузе принадлежит цепи для «фронта ударной волны», последняя может сильно влиять на цепь для магнитопаузы.

### III.6.9. Цепь «солнечный ветер — авроральная область»

Дрейф магнитосферной плазмы в направлении на Солнце в области между магнитопаузой и нейтральным слоем в хвосте тоже практически не изменится по сравнению с первым приближением. Как только токи через ионосферу в авроральной области превысят определенное значение, начнут образовываться двойные слои, хотя следует отметить, что

эти слои возникают лишь под действием токов, текущих вверх из ионосферы [30]. В двойных слоях происходит ускорение заряженных частиц, и эти частицы вызывают по крайней мере наиболее красочные сияния. Рассматривая совместно рис. III.15 и рис. III.17, нетрудно прийти к выводу о существовании механизма прямой передачи энергии солнечного ветра частицам, вызывающим полярные сияния. Можно сказать, что генератор — солнечный ветер — соединен непосредственно с потребителем энергии в зоне полярных сияний с помощью мощной передающей линии. Подробное исследование этого вопроса приводится в [24].

### III.6.10. Эквивалентная цепь для хвоста магнитосферы

Ток, который в первом приближении течет вдоль нейтральной линии, превращается в токовый слой. Как и в случае для магнитопаузы, неясно, как эти токи соединяются с токами, текущими в солнечном ветре.

Ток течет в нейтральном слое хвоста магнитосферы, создавая характерную картину распределения поля. Токовая система преобразует энергию солнечного ветра в индуктивную энергию цепи, т. е. в энергию магнитного поля в хвосте магнитосферы. Когда величина тока в нейтральном слое превосходит определенное критическое значение, образуется взрывающийся двойной слой, который, по-видимому, является причиной магнитных суббурь. Ток в хвосте запирается (хотя бы частично) и поворачивает в зону полярных сияний. Скорее всего, именно в этом состоит основной механизм возникновения магнитных суббурь (см. рис. III.10 — модель Бострема). Огромное количество энергии, высвобождающееся в процессе магнитной суббури, свидетельствует о том, что ток в хвосте несет значительную часть полной энергии, передаваемой солнечным ветром магнитосфере.

### III.6.11. Третье приближение и сравнение с данными наблюдений

После завершения расчетов в первом и втором приближениях их результаты должны послужить основой третьего приближения, которое, как мы надеемся, даст хорошее согласие с данными наблюдений.

В настоящее время не вполне ясно, является ли токовая система «солнечный ветер — авроральные области» главным источником энергии полярных сияний. Вполне возможно, что значительная (а может быть, и основная) часть энергии поступает в зону полярных сияний из токовой системы для хвоста магнитосферы, как предполагается в работе [17]. В настоящее время поступает огромное количество новых данных наблюдений, но выводы из них в некоторых отношениях остаются противоречивыми.

### III.6.12. Модель трех токовых колец

Теперь необходимо качественную модель магнитосферы, которая была описана выше, превратить в количественную. Несмотря на то что нами была выбрана весьма идеализированная и упрощенная модель, выполнение поставленной задачи наталкивается на непреодолимые математические трудности. Поэтому для достижения нашей цели следует вводить дополнительные упрощения.

Заменим сложную геометрическую конфигурацию, изображенную на рис. III.14, цилиндром, радиус которого  $r$  равен радиусу окружности, образуемой нейтральной линией. По поверхности цилиндра, изображенного на рис. III.17, текут три кольцевых тока (отсюда и название модели), один из которых ( $I_1$ ) течет вдоль нейтральной линии, а два других ( $I_2$  и  $I_2'$ ) — по обе стороны от  $I_1$  в плоскостях  $z = z_0$  и  $z = -z_0$ . Эти линейные токи записываются в виде

$$I_1 = -2I_0 \cos \varphi, \quad (36)$$

$$I_2 = I_2' = I_0 \cos \varphi. \quad (37)$$

**Они соединяются поверхностными токами, текущими в направлении  $z$  и имеющими плотность**

$$J_z = \pm \frac{I_0}{R} \sin \varphi, \quad (38)$$

где значение параметра  $I_0$  можно выбрать произвольно, хотя мы и будем его связывать с величиной межпланетного электрического поля  $\vec{E}_\infty$ , с помощью соотношений (32) и (35).

Введенное упрощение состоит в замене распределенных инерционных токов линейными токами и в уменьшении их радиусов до радиуса нейтральной линии.

В работе [31] было получено распределение магнитного поля, исходя из картины дипольного поля и однородного межпланетного поля, направленного на юг (см. рис. III.13), на которые наложено магнитное поле рассматриваемой токовой системы. Расстояние между током, текущим вдоль нейтральной линии, и линейными инерционными токами было произвольно выбрано равным  $70R_\oplus$ . На рис. III.18, *a* и *б* представлены решения для  $I_0 = 3,2 \cdot 10^5$  А и  $9,6 \cdot 10^5$  А соответственно. Видно, что в первом случае влияние токовой системы настолько незначительно, что токовую модель, изображенную на рис. III.17, можно по-прежнему использовать в качестве первого приближения. Однако абсолютная величина тока в этом случае неправдоподобно мала. Во втором же случае величина тока вполне реальна, но искажение поля настолько велико, что модель трех колец становится неприменимой.

В обоих случаях нельзя считать линейным ток, текущий вдоль нейтральной линии, поскольку вследствие эффекта Данжи [28, 29] линейные токи превращаются в поверхностные, причем поверхность, по

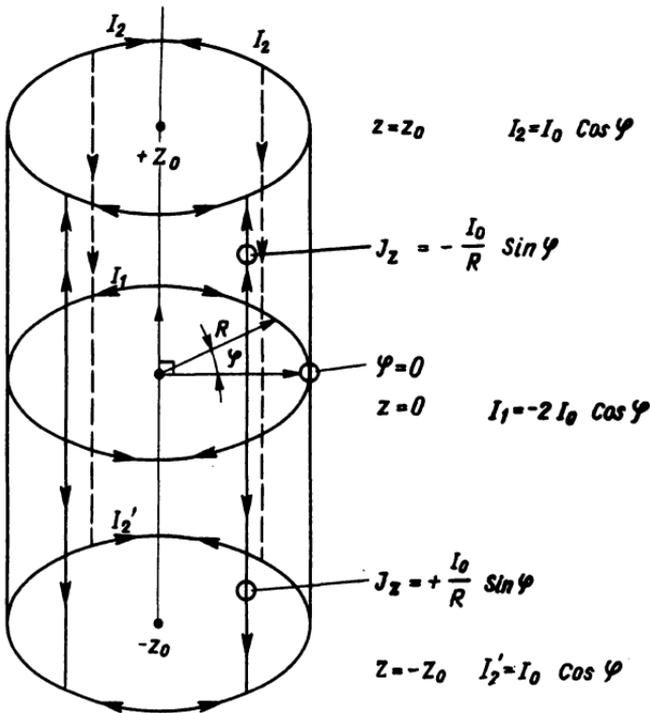


Рис. III.17. Токовая модель трех колец. Центральное кольцо представляет ток, текущий вдоль нейтральной линии. Вертикальные токи в цилиндрическом слое эквивалентны токам, текущим вдоль силовых линий к нейтральной линии. Два других кольцевых тока, расположенные выше и ниже экваториальной плоскости, замыкают токовую систему и описывают распределенные токи, текущие поперек силовых линий.

которой они текут, перпендикулярна экваториальной плоскости в области магнитопаузы и совпадает с этой плоскостью в хвосте магнитосферы. Аналитический расчет такой более реалистической модели, в которой токи считаются поверхностными, наталкивается на трудности, которые пока еще не удалось преодолеть.

На рис. III.18 представлены результаты расчетов на ЭВМ для двух вышеупомянутых случаев. Как показано на рис. III.18, а, влияние токовой системы в первом случае сводится к следующим эффектам:

а) Магнитные силовые линии на больших расстояниях от Земли загибаются в антисолнечном направлении.

б) На дневной стороне появляются ярко выраженные каспы.

в) Вследствие того что токи считаются линейными, появляются особые точки как на дневной, так и на ночной сторонах магнитосферы. Вблизи этих точек (затененные области на рисунке) рассчитанное поле не соответствует действительности.

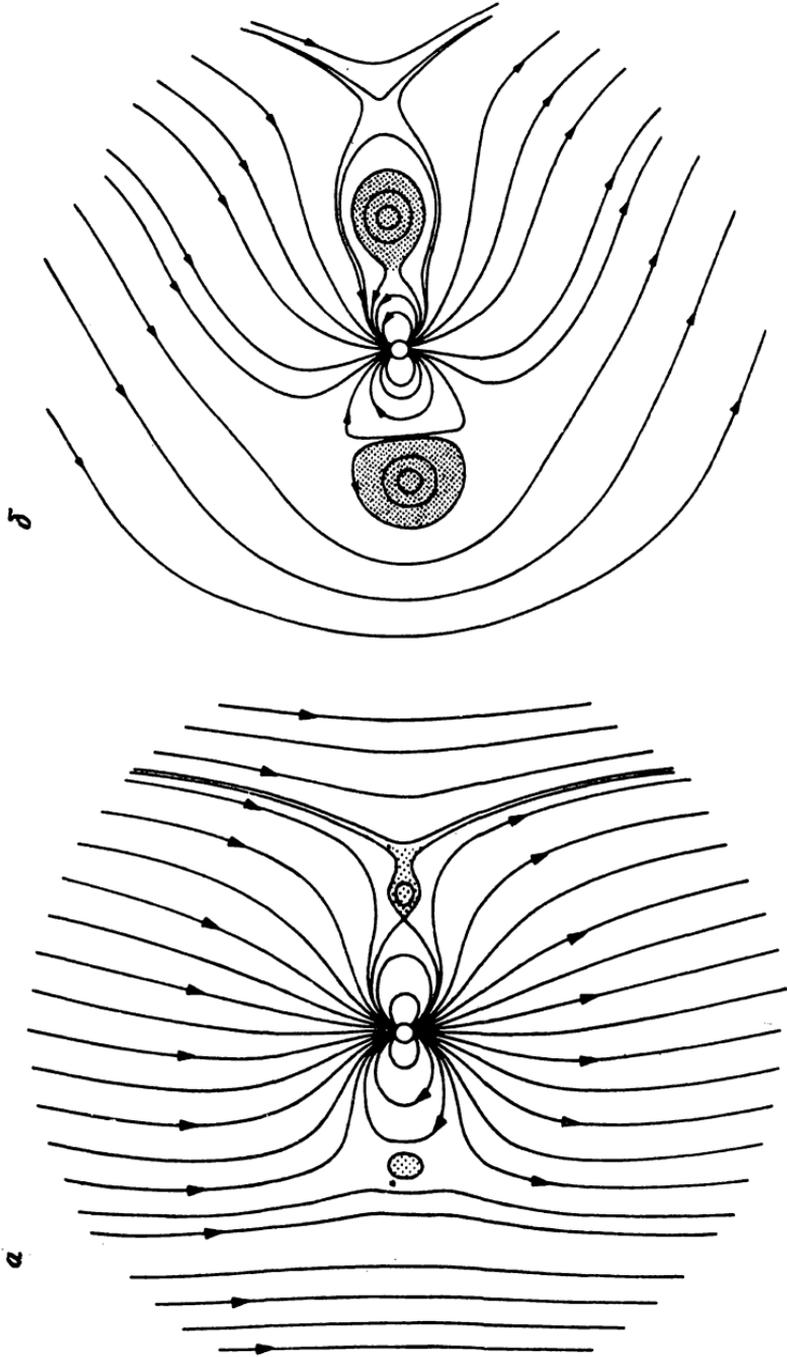


Рис. 18. Результаты расчетов на ЭВМ модели трех колец. Заданы дипольное магнитное поле и однородное поле солнечного ветра, направленное на юг, на которые накладывается магнитное поле токовой системы (ток в нейтральной линии и инерционный ток). а) Конфигурация магнитного поля при  $I_0 = 3,2 \cdot 10^5$  А. Затененные области соответствуют областям, где расчеты некорректны из-за того, что нейтральные поверхности магнитоплазмы и нейтральной области, заменялись нейтральными линиями. б) Конфигурация магнитного поля при  $I_0 = 9,6 \cdot 10^5$  А. Солнечному слою в хвосте, заменялись нейтральными линиями. в) Конфигурация магнитного поля при  $I_0 = 9,6 \cdot 10^5$  А. Солнце расположено слева, солнечный ветер движется слева направо.

На рис. III.18, б видны те же эффекты, но гораздо более ярко выраженные. Загибание магнитных силовых линий оказывается настолько сильным, что полученная картина распределения поля напоминает реально наблюдаемую. Каспы смещаются к полюсам. Затененные области, в которых поле из-за замены поверхностных токов линейными рассчитывается некорректно, значительно расширяются. Для правильного расчета полей в этих областях следует использовать модель слоистых токов. Качественные соображения показывают, что в такой модели магнитное поле не будет сильно отличаться от наблюдаемого.

Результаты, полученные с помощью рассмотренной приближенной модели, настолько вдохновляющие, что имеет смысл попытаться построить на ее основе третье приближение. Однако расчеты в этом приближении будут связаны с большими математическими трудностями.

Можно сделать заключение, что основные черты картины распределения магнитного поля получаются из простой и достаточно прозрачной теории, использующей описание плазмы на языке частиц. Из этой теории следует, что искажение собственного магнитного поля Земли обусловлено не сметанием силовых линий солнечным ветром, а воздействием возбуждаемой им токовой системы. Следовательно, хотя понятие замороженных силовых линий в данном случае проявляется наглядным образом, на самом деле оно и здесь псевдопедагогично.

### III.7. ДРУГИЕ МАГНИТОСФЕРЫ

Локальные измерения проводились в магнитосферах Меркурия, Марса, Юпитера и Сатурна. Были созданы некоторые модели токовых систем, однако до сих пор не существует модели, способной объяснить передачу энергии солнечного ветра магнитосферам этих планет. Сейчас еще не ясно, располагаем ли мы достаточным количеством данных наблюдений для построения такой модели.

### III.8. ЦЕПЬ ДЛЯ СОЛНЕЧНОГО ПРОТУБЕРАНЦА И СОЛНЕЧНЫЕ ВСПЫШКИ

Поскольку Солнце по-прежнему находится вне пределов досягаемости для космических аппаратов, диагностика солнечной плазмы невозможна и все теории солнечных явлений по необходимости остаются умозрительными или, во всяком случае, неподтвержденными высококачественными диагностическими измерениями. Однако если скомбинировать результаты солнечных наблюдений с аккуратной экстраполяцией данных измерений, относящихся к областям, доступным космическим аппаратам, мы все-таки сможем разобраться в некоторых солнечных явлениях.

На основании волокнистой структуры солнечного протуберанца можно заключить, что он связан с током. В фотосфере существуют дви-

жения со скоростью  $\vec{v}$ , которые иногда имеют нерегулярный характер (возникают при грануляции), а иногда регулярный (вихри вокруг солнечных пятен, движения, вызванные дифференциальным вращением Солнца). Поскольку плазма в фотосфере замагничена ( $\vec{B} \neq 0$ ), то ее электрический потенциал изменяется от точки к точке. Если магнитная силовая линия над фотосферой соединяет точку  $A$  с точкой  $B$ , то напряжение  $V = \int_A^B (\vec{v} \times \vec{B}) ds$  между  $A$  и  $B$  приложено к силовой линии и может вызвать электрический ток вдоль нее. Электрическая цепь сходна с эквивалентной авроральной цепью, но значительно проще последней; она состоит из магнитной силовой трубки, пересекающей поверхность Солнца в двух точках, которые электрически соединены в фотосфере или под ней.

При  $v \approx 10^4$  м/с,  $B = 10^{-3}$  Т и расстоянии между  $A$  и  $B$  порядка  $10^8$  м напряжение составляет  $V = 10^9$  В. Если же  $\vec{v}$  и  $\vec{B}$  имеют нерегулярный характер (изменяются более или менее случайным образом), значение  $V$  может быть значительно меньше. С другой стороны, выбранные значения для  $v$  и  $B$  не являются максимально возможными. Поэтому значение напряжения  $V$ , равное  $10^8 - 10^9$  В, можно считать типичным. Согласно [32], электрический ток должен быть порядка  $10^{11} - 10^{12}$  А, что было подтверждено наблюдениями [33]. Индуктивность нашей цепи порядка 10 Гн, а запасенная энергия составляет  $LI^2/2 = 10^{23}$  Дж.

Размеры токовой цепи для протуберанца сравнимы с размерами авроральной цепи. Однако токи в первой цепи существенно сильнее из-за большего значения действующей в ней э. д. с. и более высокой проводимости (если сопротивление верхних слоев ионосферы велико, то сопротивление фотосферы существенно меньше из-за более высоких температур). Как и в авроральной цепи, в цепи для протуберанца может образоваться двойной слой. Двойной слой в зоне полярных сияний нередко испытывает быстрые флуктуации, что приводит к быстрым изменениям картины полярных сияний. Двойной слой в цепи для протуберанца изменяется еще быстрее; более того, он может взрываться, в результате чего возникают солнечные вспышки. В работах [34, 35] была изложена теория солнечных вспышек, основанная на явлении запираания тока в таком двойном слое. Результаты этой теории количественно согласуются с данными наблюдений.

Много труда было потрачено в попытках объяснить природу солнечных вспышек на языке магнитных полей (обзор этих попыток содержится в [36]). По причинам, изложенным в гл. I (см. рис. I.4), все эти объяснения не соответствуют действительности. Поскольку в теориях солнечных вспышек, основанных на идее слияния магнитных полей, неверно учитываются граничные условия, эти теории не способны объяснить быструю концентрацию всей индуктивной энергии цепи в месте разрыва тока. С другой стороны, имеются теории, в которых солнечные вспышки объясняются запираемостью тока, обусловленным не взрывом двойного слоя, а влиянием неустойчивостей. Такие теории заслуживают серьезного рассмотрения.

### III.9. УСКОРЕНИЕ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

Солнечный ветер заряжается энергией в атмосфере Солнца, затем выстреливается в межпланетное пространство и, достигая окрестностей Земли, передает часть своей энергии земной магнитосфере.

Согласно гл. I (см. рис. I.4), процесс передачи энергии от Солнца солнечному ветру и от солнечного ветра магнитосфере может быть корректно описан только путем исследования систем электрических токов. Мы представили несколько простых электрических цепей, обеспечивающих возможность передачи энергии. Одна из них, изображенная на рис. III.1a, характеризует механизм передачи энергии от Солнца к Земле с помощью солнечного ветра.

Области Солнца, где происходят накачка энергии и ускорение солнечного ветра, в нашей модели соответствует область ускорения  $A$ , движению ветра в межпланетном пространстве — движение плазмы в дрейфовой трубке, а земной магнитосфере, получающей часть кинетической энергии солнечного ветра, — область торможения  $D$ . Из этих трех областей достаточно хорошо изучена с помощью космических аппаратов область межпланетного пространства, в которой солнечный ветер движется от Солнца к Земле. В разд. III.6 анализировался процесс передачи энергии солнечного ветра магнитосфере. Для описания всех явлений, связанных с солнечным ветром, остается лишь рассмотреть процессы, происходящие на Солнце. Поскольку они происходят в области пространства, не доступной для космических аппаратов, нельзя надеяться, что мы достигнем очень хорошего понимания этих процессов, однако о свойствах солнечной атмосферы известно так много, что перечислить основные явления мы все-таки можем.

Таким образом, мы должны выяснить, как устроена «плазменная пушка» на Солнце. Во-первых, нам нужно установить природу электродвижущей силы, которой соответствует батарея на рис. III.1a. Эта э. д. с., очевидно, определяется разностью потенциалов  $V$  между двумя точками  $A$  и  $B$  в фотосфере:

$$V = \int_A^B (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{s}. \quad (39)$$

Далее нам следует найти «провода», по которым энергия поступает в «плазменную пушку»; в качестве таких проводов служат, вероятно, магнитные силовые линии. И наконец, мы должны установить местонахождение самой «пушки», т. е. области, где цепь замыкается с помощью токов, текущих перпендикулярно магнитному полю и, следовательно, ускоряющих плазму.

Разность потенциалов может возникать вследствие движений вещества вблизи солнечного пятна, и эта разность потенциалов, согласно разд. III.8, снабжает энергией солнечные протуберанцы. Подобные явления носят, как правило, локальный характер и вряд ли способны выбро-

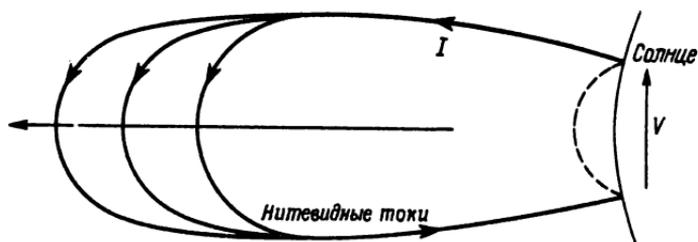


Рис. III.19. Предполагается, что в спокойных протуберанцах текут токи. Время от времени эти протуберанцы извергаются, в результате чего в короне образуются расширяющиеся петлеобразные структуры. Удлиняясь, петли трансформируются в корональные лучи, которые несут токи из фотосферы во внешние области короны или в межпланетное пространство, а затем обратно в фотосферу.

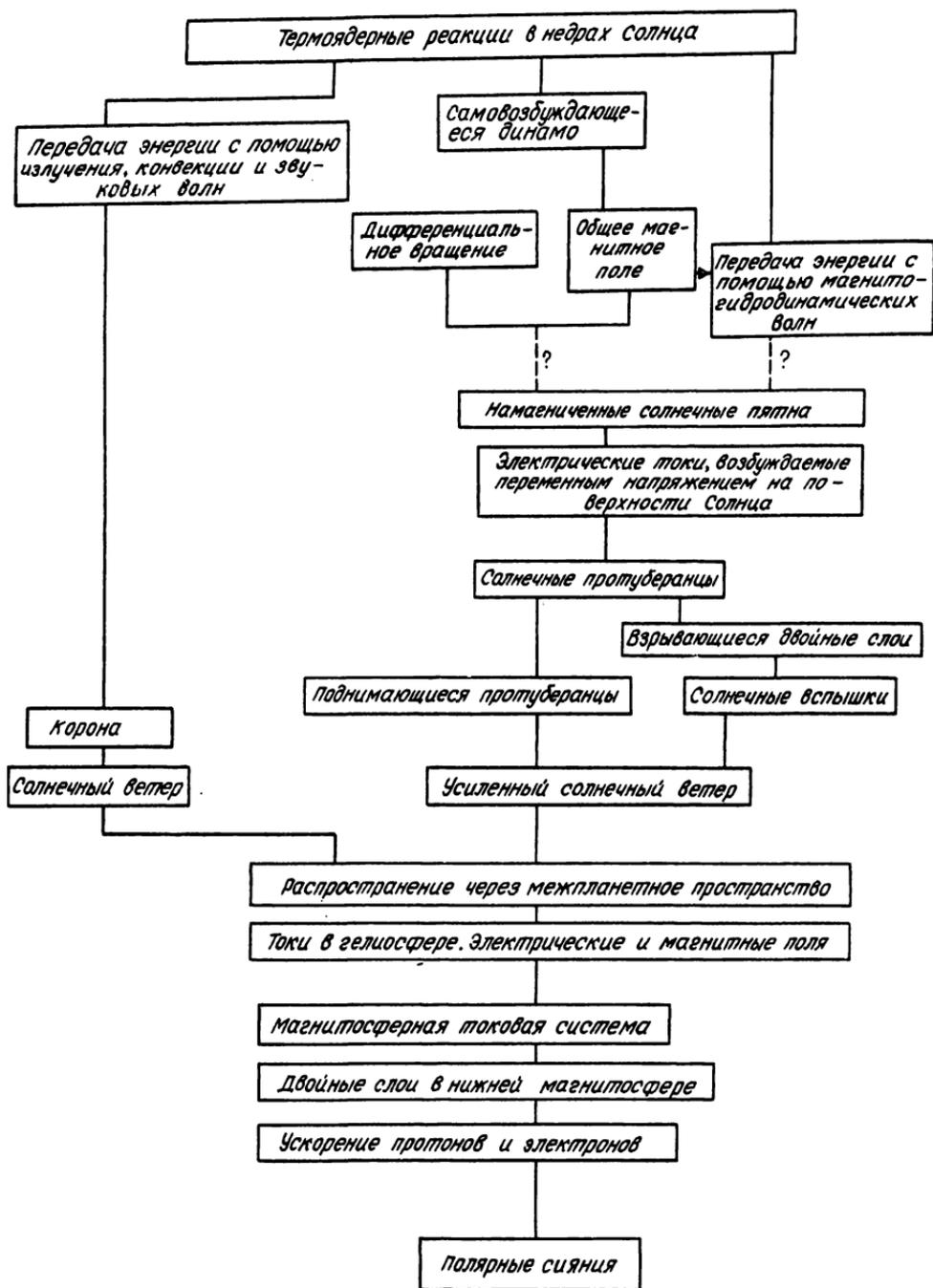
сильную плазму в космическое пространство. Исключение составляют *поднимающиеся протуберанцы*, которые достигают больших высот над поверхностью Солнца. Разность потенциалов может также возникать вследствие вращения Солнца относительно неподвижной системы координат (или вследствие дифференциального вращения). Такая разность потенциалов может быть мощным источником энергии в полярных шапках, возбуждая токи, текущие вдоль силовых линий далеко в межпланетное пространство.

Проблема обеспечения солнечного ветра энергией через систему электрических токов до сих пор не решена удовлетворительным образом. В работе [37] кратко рассмотрен поднимающийся протуберанец, действующий подобно «плазменной пушке». Схематически он изображен на рис. III.19. Электродвижущая сила в фотосфере возбуждает ток, поднимающийся до больших высот вдоль одной магнитной силовой трубки и спускающийся назад вдоль другой. Высоко в солнечной атмосфере (короне) разность потенциалов ускоряет плазму таким же образом, как и в обычной «плазменной пушке».

Если трактовать огромное количество данных наблюдений, относящихся к физике Солнца, на основании вышеизложенных принципов, можно надеяться разобраться в основных механизмах, с помощью которых солнечный ветер приобретает свою энергию. После этого мы сможем понять весь процесс передачи энергии солнечной фотосферы к земной ионосфере.

### III.10. ПЕРЕДАЧА ЭНЕРГИИ ОТ СОЛНЕЧНОГО ЯДРА К ПОЛЯРНЫМ СИЯНИЯМ

Рис. III.20 иллюстрирует, в частности, механизм передачи энергии от солнечного ядра к фотосфере, который включает в себя различные процессы, протекающие внутри Солнца. Природа этих процессов недоста-



**Рис. III.20.** Передача энергии от солнечного ядра к зоне полярных сияний.

точно ясна, поскольку их невозможно исследовать с помощью непосредственных измерений, а также из-за того, что уверенность в классической теории была поколеблена в связи с проблемой нейтрино. Механизм передачи энергии от фотосферы к солнечному ветру рассматривался в разд. III.9, однако и этот механизм не подтвержден прямыми измерениями. Что касается последующих этапов процесса передачи энергии, то здесь наши знания базируются на более прочной основе. Хотя и не все физические явления поняты достаточно хорошо, в настоящее время проводится такая огромная работа по их изучению, что есть надежда в ближайшем будущем разобраться в солнечно-земных связях.

# ТЕОРИЯ КОСМИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЫ

### IV.1. КЛАССИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ И ЕЕ ТРУДНОСТИ

Классический теоретический подход к физике космической плазмы состоит в обобщении кинетической теории газов с включением электромагнитных сил, действующих между ионами и электронами. основоположниками этого подхода были Чепмен, Каулинг, Спитцер, работы которых были позднее развиты многими выдающимися физиками-теоретиками. В результате был создан математический аппарат (который мы в дальнейшем будем называть классической теорией космической плазмы), являющийся мощным орудием в руках компетентных специалистов, но в то же время способный привести к неверным результатам, если его использовать без достаточной осторожности. Причины, по которым этот подход нередко дает ошибочные ответы, состоят в следующем:

1) Плазма сама по себе чрезвычайно сложна. Для того чтобы вывести свойства плазмы теоретически (исходя из начальных принципов), приходится использовать целый ряд упрощающих предположений. Эти упрощающие предположения не всегда были верными, особенно в начале развития теории. Отсутствие связи между теорией и экспериментами привело к тому, что теория стала чрезмерно абстрактной и в некоторых отношениях далекой от действительности. В предыдущих главах мы приводили примеры подобной оторванности теории от действительности, и некоторые из этих примеров будут обсуждаться ниже.

2) Реальная плазма очень часто «шумит», то есть в ней возбуждаются колебания в широком диапазоне частот, что приводит к явлениям, которые почти невозможно описать с помощью классических методов. В лаборатории можно создать нешумящую плазму (например, сильно нагретую цезиевую плазму), однако она сразу же начинает «шуметь», как только через нее пропускают ток. Таким образом, свойство, которое, по-видимому, является основным для космической плазмы, до сих пор не может быть описано в рамках классической теории. Следовательно, нельзя ожидать, что классическая теория окажется применимой повсеместно. Например, распределение электронов по энергиям в плазме очень часто отличается от максвелловского, в результате чего за счет энергичных электронов в хвосте распределения ионизация оказывается больше ожидаемой.

3) Классическая теория часто применяется к геофизическим и астрофизическим задачам небрежно и безответственно. При этом наиболее часто допускаются следующие ошибки:

а) К плазме конечных размеров применяют модели безграничной плазмы. Например, в «ударной волне» (в солнечном ветре вне магнитосферы) электрический ток обязательно течет в поперечном направлении. Однако этот ток должен замыкаться, а это как раз и не учитывают во многих моделях магнитосферы, что приводит к серьезным ошибкам (разд. III.6.7).

б) В теориях, описывающих сжатие межзвездных облаков, нередко утверждается, что магнитное поле всегда препятствует сжатию. Однако справедливость такого заключения зависит от модели. Магнитное поле может иногда способствовать сжатию, а иногда даже вызывать его (разд. IV.8.3). Подобные ошибки приводят к неучету пинч-эффекта как важного механизма удержания космической плазмы и образования вольнистых структур (разд. II.4).

4) Создается впечатление, что лишь немногие ученые, работающие в области космической физики, имели склонность к критическому анализу основ теории космической плазмы. Стоило какой-нибудь чрезвычайно умозрительной модели стать «общепринятой», как к ней начинали относиться, как к святыне.

В результате всего этого состояние теории космической плазмы оставляет желать лучшего. Нам кажется, что необходим довольно решительный и, безусловно, болезненный пересмотр основ классической теории. Некоторые причины, вызывающие необходимость такого пересмотра, указывались в гл. II и III. В этой главе мы обсудим целый ряд других явлений, свидетельствующих о необходимости пересмотра некоторых положений классической теории космической плазмы.

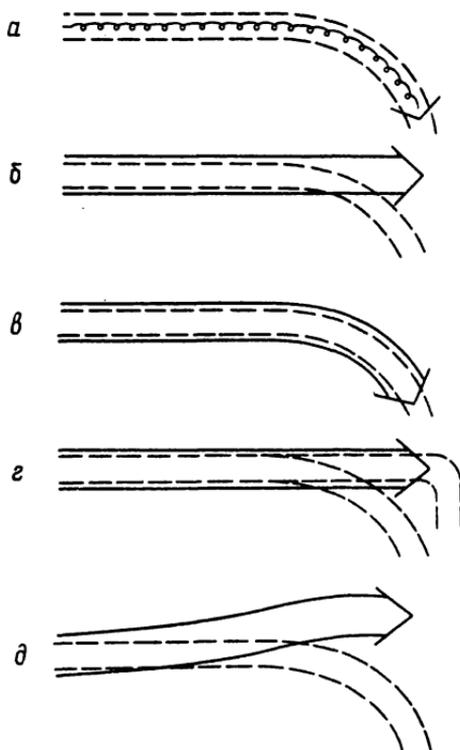
### IV.1.1. Обратное отклонение

В качестве иллюстрации тех трудностей, с которыми сталкивается классическая теория даже в относительно простых случаях, рассмотрим поведение потока плазмы в искривленном продольном магнитном поле [1, 2].

На основании простых теоретических соображений, изложенных в работах Линдберга, следовало ожидать, что существует несколько различных вариантов поведения плазмы, входящей в область искривленного поля (рис. IV.1). При этом казалось очевидным, что в зависимости от параметров плазмы (ее плотности, скорости, температуры и намагниченности) она будет вести себя так, как показано на рис. IV.1, б, в и г. Когда Линдберг провел эксперимент, он обнаружил, что в определенном диапазоне параметров пучок отклонялся в противоположную сторону (рис. IV.1, д) и, более того, из цилиндрического превращался в плоский. Таким образом, все наивные теоретические предсказания оказались ошибочными! Такое же явление наблюдалось в работах [3, 4].

Линдберг показал (после проведения эксперимента), что обратное отклонение может быть качественно объяснено на основании классической теории. Однако на самом деле это явление сложное, и решающим фак-

**Рис. IV.1.** Поведение плазменного пучка, который вначале движется вдоль однородного поля, а затем попадает в область искривленного поля, на основании предсказаний классической теории и в действительности [1]. *a* — в первом приближении отдельные частицы должны двигаться вдоль магнитных силовых линий, даже если они искривлены; *b* — тонкий плазменный пучок самополяризуется и за счет дрейфа  $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$  продолжает двигаться прямо; *в* — поляризационное поле уничтожается токами деполяризации, и пучок следует вдоль искривленного поля; *г* — плазменный пучок с высокой проводимостью и большой кинетической энергией движется прямолинейно, «растягивая силовые линии и отбрасывая их в стороны»; *д* — эксперименты с пучком бесстолкновительной плазмы показывают, что его поведение не совпадает ни с одним из теоретических предсказаний.



тором, ответственным за обратное отклонение, является дрейф высокоэнергичных электронов назад (рис. IV.2). Это явление еще раз подчеркивает важность учета токовой цепи. В плазме, входящей в область искривленного магнитного поля, индуцируется поперечное электрическое поле  $\mathbf{E} = -\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ . Эта область плазменного пучка действует как генератор, создающий ток вверх по пучку, где плазма поляризуется из-за своей низкой поперечной проводимости. Можно сделать вывод, что явление обратного отклонения носит, очевидно, фундаментальный характер и характерно для бесстолкновительной плазмы в широком диапазоне ее параметров.

Поскольку космическая плазма часто движется вдоль искривленных силовых линий, мораль данного эксперимента состоит в том, что без тесного контакта с экспериментом классическая теория может привести к ошибкам даже при исследовании таких простых задач, как рассмотренная выше, если предварительно не проанализировать все связанные с этой задачей явления в широком диапазоне параметров.

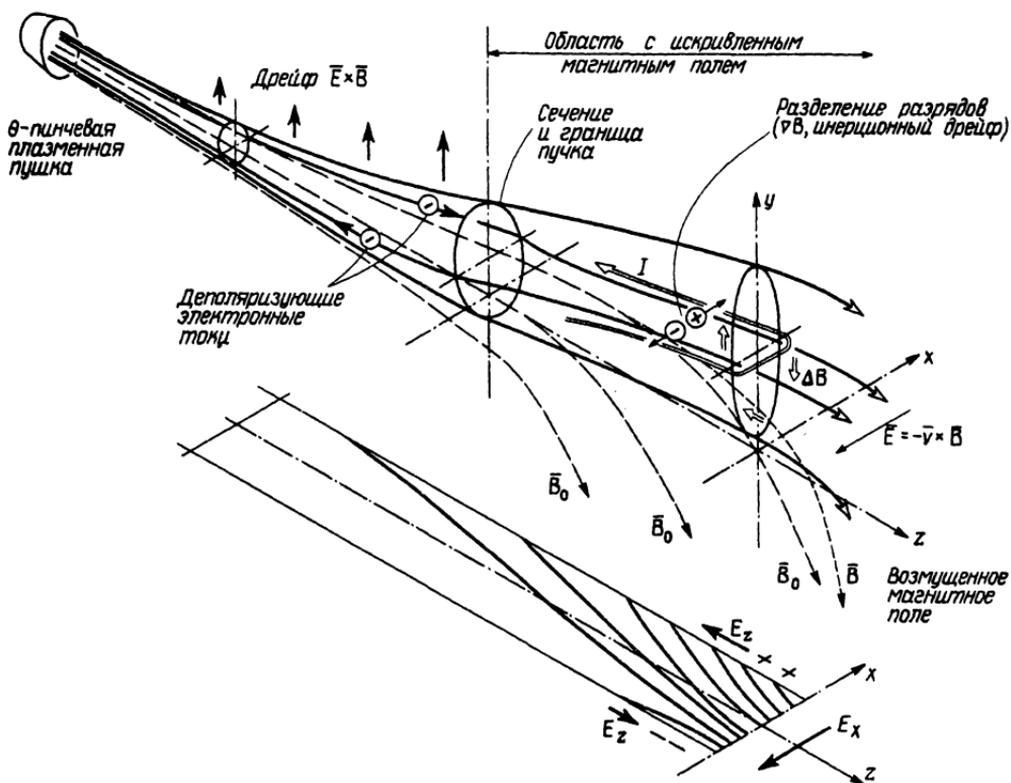


Рис. IV.2. Объяснение неожиданного поведения пучка. Дальнейшие исследования раскрыли причину такого поведения. Плазма выстреливается из  $\theta$ -пинчевой плазменной пушки в направлении продольного магнитного поля  $B_0$ , которое по ходу пучка загибается вниз. Когда плазма попадает в область искривленного поля, возникают дрейфы, приводящие к разделению зарядов, и устанавливается поляризационное электрическое поле  $E = -\nabla \times B$ . Часть поляризационного поля распространяется назад из-за обратного потока электронов в область чисто продольного магнитного поля (деполяризующие электронные токи). Это электрическое поле вызывает дрейф  $E \times B$  всего плазменного пучка до того, как он попадает в область искривленного поля. Когда пучок попадает в эту область, он сжимается и принимает форму вертикального плоского слоя. Это происходит под действием продольной составляющей электрического поля. Распределение потенциала в пучке становится несимметричным (см. рисунок) вследствие того, что ионы обладают гораздо большей (поступательной) энергией, чем электроны. При высокой плотности плазмы деполаризующие токи настолько искажают магнитное поле, что силовые линии сначала вытягиваются (становятся менее искривленными), а затем по ходу пучка искривляются сильнее, чем в невозмущенном состоянии [2]. (В нижней части рисунка показана картина эквипотенциальных линий в плоскости  $xz$ , иллюстрирующая распределение электрического поля.)

## IV.2. ИОНИЗАЦИЯ

### IV.2.1. Ионизация светом, частицами и электрическими токами

Ультрафиолетовое излучение звезд является главным источником ионизации в областях III. В областях II это излучение также ионизует элементы с низкими потенциалами ионизации. Эти факты породили уверенность, что ультрафиолетовое излучение звезд является *единственным ионизирующим агентом* (в некоторых случаях к нему добавляются космические лучи) и что в темных облаках, где излучение звезд и космические лучи поглощаются, ионизация прекращается или по крайней мере становится пренебрежимо малой. Такой вывод не всегда верен, потому что во многих случаях ионизация космической плазмы происходит в основном под действием электрических токов, возникающих вследствие магнитогиродинамических или гравитационных эффектов.

Этот вывод становится очевидным при изучении окружающей нас области космического пространства. Солнечный свет ионизует дневные ионосферы планет, однако, если не считать этих крохотных объемов, почти вся ионизация в Солнечной системе обусловлена другими механизмами. Ночная ионосфера и зоны полярных сияний ионизируются как заряженными частицами, приходящими из магнитосферы, так и электрическими токами (например, авроральной электроструей). Ионизация в магнитосфере происходит за счет энергии, передаваемой от солнечного ветра, который в свою очередь приобретает свою кинетическую и тепловую энергию, а также энергию, затрачиваемую на ионизацию, от электрических токов, текущих вблизи Солнца (разд. III.8—III.10).

Эти токи также разогревают корону. Они получают энергию от магнитогиродинамических процессов, а последние в свою очередь — от конвективных движений внутри Солнца. Эта длинная цепочка процессов практически не зависит от излучаемого Солнцем света. Если бы мы могли выключить световое излучение (включая ультрафиолетовое) фотосферы, состояние ионизации окружающей Солнце области, в том числе и верхних слоев солнечной атмосферы, осталось бы неизменным (за немногими исключениями, упомянутыми выше).

Далее, высокая степень ионизации в магнитосфере Юпитера практически не связана с излучением Солнца или Юпитера. Таким образом, мы видим, что основная часть ионизации в нашем окружении возникает не под действием ультрафиолетового (или космического) излучения, а за счет электрических токов, которые в конечном итоге черпают энергию из кинетической энергии, высвобождающейся в солнечной конвективной зоне (разд. III.1.3 и III.9). Об этой весьма сложной цепи передачи энергии известно достаточно много, чтобы мы могли проследить ее хотя бы в общих чертах, начиная с источника энергии и кончая областями ионизации в нашем окружении (разд. III.10).

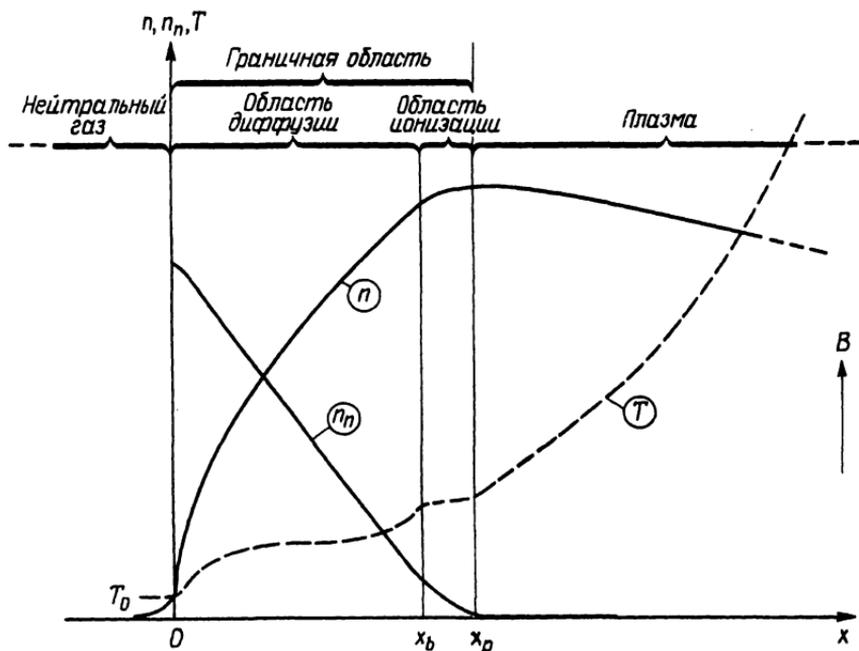


Рис. IV.3. Переходная область между полностью ионизованной плазмой и нейтральным газом. Нейтральный газ расположен при  $x < 0$ , пограничный слой — при  $0 < x \leq x_p$ , а полностью ионизованная плазма — при  $x > x_p$  [7].

В качестве примера того, как изучение явлений, наблюдаемых в нашем ближайшем окружении, влияет на наши представления о процессах в более удаленных областях, мы применим наши выводы к проблеме образования звезд (разд. IV.8). Следует отметить, что при образовании звезды из темного облака высвобождается гравитационная энергия, в несколько тысяч раз превосходящая суммарную энергию ионизации всех атомов облака.

Поскольку магнитогидродинамический способ передачи энергии является, как правило, весьма эффективным, можно заключить, что обсуждавшиеся выше процессы способны создать высокую степень ионизации во время образования звезды. Хотя количественный анализ механизмов передачи энергии трудно провести до конца, все-таки, как можно ожидать, степень ионизации является достаточно высокой, чтобы в основу анализа образования звезд положить методы магнитогидродинамики. Этот вывод подтверждается также тем фактом, что космическое пространство в значительной степени состоит из различных плазменных областей; см. разд. II.9. Конечно, из этого вывода вовсе не следует, что в космическом пространстве вообще отсутствуют процессы, при изучении которых можно в основном обойтись без магнитогидродинамики. К таким процессам относится, например, дрейф пыли или образование стеллезималей.

## IV.2.2. Переходная область между плазмой и нейтральным газом

Когда область сильно ионизованной плазмы окружена неионизованным газом, на границе образуется переходная область, состоящая из частично ионизованного газа. Свойства таких областей изучались Ленертом [5–7]. В его работах использовались результаты термоядерных исследований, применяемые к условиям космоса (т. е. при  $n > 10^{13} \text{ м}^{-3}$  и  $B > 10^{-4} \text{ Т}$ ). В этот диапазон параметров попадают звездные атмосферы, включая протуберанцы и нижнюю солнечную корону.

Ленерт нашел, что область частично ионизованной плазмы, разделяющая полностью ионизованную плазму и окружающий нейтральный газ, часто бывает очень тонкой, в результате чего между горячей и холодной областями образуется довольно резкая граница. На рис. IV.3 изображен типичный случай. Слева расположен нейтральный газ, а справа — полностью ионизованная плазма. В области границы нейтральный газ (с короткой средней длиной свободного пробега) диффундирует направо, где ионизируется электронами плазмы. Результаты этих исследований применимы к резким границам между областями активной и пассивной плазмы, которые часто наблюдаются в космическом пространстве.

## IV.3. КОСМИЧЕСКАЯ РАСПРОСТРАНЕННОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ И ИХ ДИФФЕРЕНЦИАЦИЯ

### IV.3.1. Космическая распространенность

В течение длительного времени считалось общепринятым, что «космическая распространенность» различных химических элементов почти одинакова во всех областях Вселенной. Исключения, конечно, составляли некоторые планеты и спутники, например Земля и Луна, гравитационные поля которых недостаточны для удержания наиболее легких составляющих и в которых произошла дифференциация элементов под действием геологических процессов. Химические и петрографические различия между метеоритами объяснялись как следствие подобных же процессов дифференциации элементов, протекавших впоследствии на разрушившейся планете (или планетах), из обломков которых, как считалось, произошли метеориты. Таким образом, еще совсем недавно предполагалось, что Юпитер (а также и другие большие планеты) должен обязательно состоять из «солнечного вещества» или даже из твердого водорода. По-видимому, этой точки зрения продолжают придерживаться многие ученые, работающие над проблемой происхождения Солнечной системы. Оправданием таких взглядов служило утверждение, что вещество во Вселенной было перемешано турбулентными процессами и что поэтому никакие вариации относительных распространенностей элементов невозможны. Тот факт, что в случае некоторых звезд наблюдались химические «аномалии», объяснялся «аномалиями»

термоядерного синтеза, происходящего внутри этих звезд. Во всяком случае, в плазме Солнечной системы ни в настоящее время, ни на ранней стадии ее эволюции не должно быть, как считалось, никаких химических вариаций, поскольку она находится в турбулентном состоянии. Когда выяснилось, что для объяснения поясной структуры Солнечной системы (разд. V.7) необходимо наличие облаков различного химического состава, падающих в направлении Солнца, решили, что идея о поясной структуре неверна.

Все эти представления резко изменились после того, как стали возможны прямые измерения в космосе. Как и многие другие однородные модели, модель химически однородной Вселенной не выдержала сравнения с данными наблюдений.

### IV.3.2. Наблюдения химической дифференциации

Первое серьезное возражение против представления о химической однородности появилось после того, как измерения солнечного ветра показали, что содержание гелия в нем меняется. Будучи в среднем равным нескольким процентам, содержание гелия иногда (особенно во время солнечных вспышек) подскакивало до значений больше 20%, а иногда уменьшалось до значений ниже среднего [8]. Попытки объяснить это явление термоядерным синтезом во вспышках выглядели малопривлекательными. Решающее же свидетельство в пользу возможности значительной химической дифференциации было получено группой из университета Джона Гопкина, исследовавшей химический состав солнечных космических лучей низких энергий, испускаемых во время солнечных вспышек. Обзор результатов этих исследований содержится в работе [9] (см. также [10]); как следует особо подчеркнуть, из этих результатов вытекает, что химическая дифференциация обусловлена *не самой вспышкой*, а процессами, происходящими *до нее*. Об этом свидетельствует тот факт, что энергетические спектры различных компонент, наблюдаемые во время вспышки, одинаковы. Следовательно, эти результаты говорят о том, что в *солнечной плазме протекают процессы, вызывающие химическую дифференциацию при условиях, предшествующих началу вспышки*.

### IV.3.3. Разделение элементов, вызванное различиями потенциалов ионизации

Поскольку солнечная вспышка происходит в результате запираания тока, можно предположить, что именно электрический ток вызывает химическую дифференциацию, возможно в сочетании с гравитационными эффектами. Если нитевидный ток течет в частично ионизованной плазме, все ионы вследствие пинч-эффекта будут двигаться к оси тока.

Мы обсуждали это явление в разд. II.4.5 и пришли к выводу, что процесс формирования магнитных жгутов является возможным механизмом образования областей с различным химическим составом.

Существует и другой процесс, вызывающий химическую дифференциацию, до некоторой степени связанный с предыдущим. В ходе экспериментов по термоядерному синтезу с полностью ионизованной замагниченной плазмой, окруженной неионизованным газом, Ленерт [5, 11] исследовал граничную переходную область между полностью ионизованным и неионизованным газами. Он обнаружил, что в случае, когда плазма состоит из смеси различных элементов, происходит химическая дифференциация. Это приводит к накоплению элементов в той или иной области ионизованного или неионизованного газа (в зависимости от того, является ли потенциал ионизации высоким или низким). При определенных условиях накопление настолько значительно, что данный механизм вполне может служить для объяснения аномалий, наблюдающихся в солнечном ветре (а также в магнитных звездах).

#### IV.3.4. Разделение, вызванное различиями в массе

В разд. III.1.2 мы установили, что некоторые слагаемые, входящие в выражение для скорости дрейфа ведущего центра частицы, зависят от ее массы. Одно из них соответствует гравитационному дрейфу под действием силы  $F_g = m\vec{g}$ . Если плазма «подвешена» в магнитном поле или удерживается газовым давлением, гравитационный дрейф может быть точно скомпенсирован, но при условии, что все ионы имеют одинаковую массу. Если же плазма состоит из смеси частиц с разными массами, не зависящие от массы силы способны скомпенсировать  $F_g$  лишь в среднем. В этом случае легкие ионы будут смещаться в одну сторону, а тяжелые — в другую. Однако пока неизвестно, достаточно ли эффективен этот механизм, чтобы принимать его во внимание в космической физике.

В работе [12] был предложен другой процесс, вызывающий разделение частиц с различными массами. Возможно, что существует еще ряд механизмов, приводящих к разделению по массам.

#### IV.3.5. Разделение, вызванное различиями давлений паров

При рассмотрении процессов, вызывающих химическую дифференциацию, мы не должны, конечно, забывать, что плазма при наличии пыли конденсируется в мелкие частицы. Испарение этих частиц часто является важным процессом дифференциации.

Добавим, что радиационное давление может иногда способствовать химическому разделению.

### IV.4. ТУРБУЛЕНТНОСТЬ

Турбулентным обычно называется такое состояние жидкости, в котором ее скорость является случайной и разупорядоченной (см., например, [13]). Это означает, что мгновенная скорость, измеренная в любой

точке турбулентной области, не воспроизводима. Часто утверждают, что турбулентность является очень важным явлением в космической плазме. Однако исследования магнитосферы с помощью локальных измерений показали, что в ней *крупномасштабная турбулентность* отсутствует. Поэтому современные модели магнитосферы исключают существование крупномасштабной турбулентности [14].

Конечно, при измерениях с помощью космических аппаратов значения плотности, магнитного поля и скорости плазмы нередко быстро изменяются. Указанное явление особенно проявляется, когда космический аппарат пересекает магнитные силовые линии, проходящие через зону полярных сияний, магнитопаузу или нейтральный слой в хвосте магнитосферы. Однако эти изменения происходят, как правило, вследствие нитевидной или слоистой структуры токов и носят регулярный, явно не турбулентный характер.

Область земной атмосферы, вплоть до турбопаузы, расположенной на высоте порядка 100 км, часто находится в сильно турбулентном состоянии. На больших высотах, особенно в зоне полярных сияний, нередко наблюдаются быстрые и нерегулярные вариации физических характеристик. Частично они связаны с конвекцией, вызванной локальным разогревом, но в основном, по крайней мере в верхней ионосфере, они обусловлены, по-видимому, быстрыми изменениями в токовой системе и вторичными эффектами этих изменений. Неверно отождествлять эти вариации с «турбулентностью» в правильном понимании этого термина.

Для *солнечной атмосферы* характерно волокнистое строение: протуберанцы, спикулы и корональные лучи. Если бы космический аппарат смог пересечь эти области, он бы зарегистрировал быстрые и на первый взгляд нерегулярные вариации плотности, температуры и магнитного поля. Изучая полученные данные измерения, можно было бы заключить, что верхняя солнечная атмосфера находится в турбулентном состоянии. Визуальные наблюдения волокнистой структуры противоречат такой интерпретации. Конечно, волокнистая структура нередко быстро изменяется, но не таким образом, чтобы можно было бы говорить о «турбулентности» в правильном понимании этого термина.

Тем не менее вполне возможно, что явления, происходящие в конвективном слое внутри и ниже фотосферы, можно описывать на языке «турбулентности», хотя структура конвективных потоков зачастую такова, что ее нельзя считать действительно случайной.

Нередко считают, что так называемый «фронт ударной волны» на дневной стороне магнитосферы находится в турбулентном состоянии. Мы не сомневаемся, что космический аппарат, пересекающий его, регистрирует нерегулярные и быстрые вариации плотности, температуры и магнитного поля. Достигая этой области, солнечный ветер замедляется, а поскольку он состоит из бесстолкновительной плазмы, это замедление может произойти лишь под влиянием электромагнитных сил, действующих на частицы ветра. Нет сомнения, что в области фронта ударной волны имеется разветвленная цепь быстро изменяющихся элект-

трических токов, которые взаимодействуют с магнитными полями, частично порожденными этими токами. Однако совсем не очевидно, что такое явление можно отождествить с «турбулентностью» (разд. III.6). Действительно, было бы ошибкой применять этот термин к явлению, которое так мало сходно, например, с тропосферной турбулентностью.

Различие между терминами «турбулентность» и «быстрые, явно случайные флуктуации» не является лишь семантическим. Турбулентность обычно связана с *перемешиванием*. В турбулентной области ниже турбопаузы из-за вызванного турбулентностью перемешивания невозможны значительные вариации химического состава (см., например, [15]). В волокнистых же структурах такое перемешивание, как правило, не происходит. Более того, происходят, скорее всего, обратные процессы.

Как было сказано в разд. IV.3.2, отношение He/H в солнечном ветре и химический состав в солнечных космических лучах низких энергий могут резко изменяться (от  $< 1\%$  до  $> 20\%$  для отношения He/H). Очевидно, это происходит из-за химического разделения, вызванного процессами в плазме (например, при различных потенциалах ионизации). Такие процессы, конечно, не могли бы происходить, если бы области, где зарождается солнечный ветер, находились в турбулентном состоянии и в них происходило перемешивание вещества.

В космической физике многим физическим явлениям приписывается происхождение, связанное с турбулентностью. Например, расширение спектральных линий, наблюдаемое в спектрах различных небесных тел, часто интерпретируется подобным образом. Мы уже отмечали, что турбулентность, по-видимому, не играет важной роли в космической плазме низкой плотности, которая была исследована с помощью прямых измерений. Более того, оказалось, что плазма низкой плотности под действием магнитного поля приобретает такую структуру, которая подавляет или предотвращает развитие турбулентности. Возмущения в такой плазме скорее генерируют магнитогидродинамические волны, чем турбулентность. Можно сказать, что большинство флуктуаций, наблюдаемых в магнитосфере и солнечном ветре, интерпретируются как суперпозиция таких волн [16, 17].

Разумно считать, что и в областях, пока недоступных для прямых измерений, нет ярко выраженной крупномасштабной турбулентности.

Существуют теории, в которых происхождение космических магнитных полей приписывается турбулентности. Широко распространена точка зрения, что во Вселенной происходит настолько мощное турбулентное перемешивание, что «космические распространенности» элементов повсюду одинаковы. *Подобного рода рассуждения нельзя принимать всерьез до тех пор, пока не представлены серьезные доказательства существования крупномасштабной турбулентности.* Легкомысленная привычка использования термина «турбулентность» применительно к «явно случайным флуктуациям» приводит к превратному представлению о существе дела и с ней следует покончить.

Тем не менее нужно сказать, что в отличие от крупномасштабной турбулентности так называемая *мелкомасштабная плазменная турбу-*

лентность существует. В обзоре проблем плазменной турбулентности [18] Кадомцев указывает, что применительно к лабораторной плазме термин «турбулентность» используется в более широком смысле, чем в обычной гидродинамике. «Турбулентность», которая наблюдается в плазме, генерирует шумы и колебания и приводит к явлению «аномальной» бомовской диффузии. Такого рода слабая турбулентность больше напоминает движение волнистой поверхности моря, чем турбулентное движение обычной жидкости. Другими словами, она не обязательно приводит к сильному химическому перемешиванию.

Наконец, даже в отсутствие турбулентности в правильном понимании этого слова интерференция плазменных волн, особенно с большими амплитудами, может привести к сильному перемешиванию в определенных областях. В заключение можно сказать, что крайне необходим подобный полусемантический анализ роли «турбулентности» в космической плазме.

## IV.5. УСИЛЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОТОКА

### IV.5.1. Генерация космических магнитных полей

В первых трех главах было показано, что понимание космических магнитогидродинамических явлений невозможно без введения *явных выражений* для электрических токов. Это относится и к процессу генерации космических магнитных полей.

Существуют по крайней мере три различных типа токовых систем, создающих космические магнитные поля:

#### *А. Круговые токи внутри небесных тел*

Намагниченность небесных тел должна быть связана с электрическими токами, текущими внутри этих тел. Этому вопросу посвящен данный раздел.

#### *Б. Токи вблизи поверхности*

Примеры: ионосферные токи в верхней атмосфере Земли, токи, связанные с солнечными пятнами и протуберанцами.

#### *В. Крупномасштабные токовые системы*

Примеры: магнитосферная токовая система, гелиосферная токовая система, ток, текущий в экваториальной плоскости вокруг Юпитера, токи в хвостах комет и, возможно, общегалактическая токовая система.

### IV.5.2. Самовозбуждающееся динамо

Токовые системы Б и В, указанные выше, вероятно, возникают под действием э. д. с.  $V$ , которая создается движениями вещества в присутствии магнитного поля  $\vec{B}$ . Тогда

$$V = \int (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{s}. \quad (1)$$

Однако наличие начального затравочного поля приходится постулировать и считать, что оно порождается каким-то другим механизмом. Весь процесс генерации по традиции называется «самовозбуждающимся динамо».

Этот процесс должен происходить внутри таких небесных тел, как Земля, Юпитер, Сатурн и Солнце. Вероятно, существует и галактическое динамо, расположенное, скорее всего, в ядре Галактики.

Известно, что темные межзвездные облака обладают собственными магнитными полями порядка  $10^{-7}$  Т ( $10^{-3}$  Гс) или даже больше. Возможно, что в центре Галактики существует самовозбуждающееся динамо. Тогда магнитные поля в темных межзвездных облаках могут представлять собой концентрации этого галактического поля. Более сильные поля в темных облаках могут генерироваться также их собственными самовозбуждающимися динамо.

Далее, существует очень интересная, но малоизученная так называемая «транспланетная область», которая играла важную роль во время образования Солнечной системы, так как она была частью «первичного облака» (см. [19, гл. 19]). Сходная область может существовать и в настоящее время, будучи переходной областью между гелиосферой (где основную роль играет солнечный ветер) и тем, что можно назвать истинно межзвездным пространством. Эту область можно отождествить с кометным облаком Оорта, и она может служить резервуаром так называемых «галактических» космических лучей (хотя этот термин, скорее всего, неверен, так как нет убедительных доказательств, что все лучи действительно имеют галактическое происхождение (разд. IV.10.3)). Если эта область является резервуаром космических лучей, в ней тоже должно существовать самовозбуждающееся динамо для создания достаточной намагниченности.

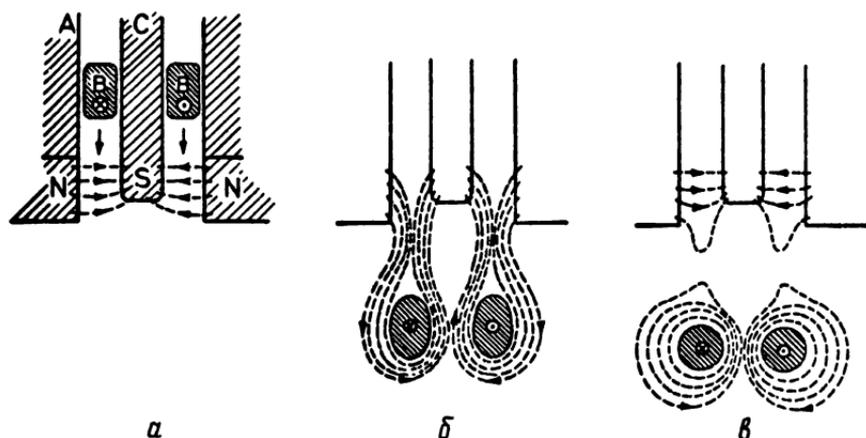
Таким образом, можно сделать вывод, что самовозбуждающиеся динамо должны существовать не только внутри некоторых небесных тел, но и в определенных областях космической плазмы.

### IV.5.3. Теории самовозбуждающегося динамо

Имеется целый ряд хорошо известных теорий самовозбуждающегося динамо. В этих теориях возбуждение космического динамо объясняется плазменной турбулентностью. Однако, как было показано в разд. IV.4, не существует убедительных доказательств, что турбулентность в правильном понимании этого термина на самом деле имеется в космической плазме. Даже обычные модели механизма динамо внутри небесных тел встречаются с трудностями (см. [20]), поэтому не следует пренебрегать любыми новыми теориями.

### IV.5.4. Механизм усиления магнитного потока

Обсудим теперь несколько иной подход, который в отличие от вышеописанного не базируется на относительно умозрительных процессах.



**Рис. IV.4.** Создание плазменного кольца с помощью полоидального и тороидального магнитных полей. *а* — в коаксиальной плазменной пушке создается плазменное кольцо с тороидальной намагниченностью. Выходя из пушки, оно проходит через радиальное магнитное поле; *б* — кольцо «захватывает» это поле, приобретая полоидальную намагниченность; *в* — свободно движущееся плазменное кольцо с полоидальным и тороидальным магнитным полем [21].

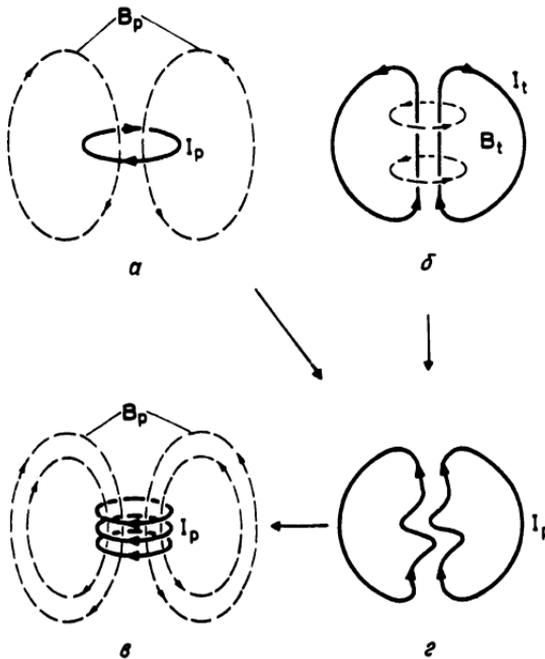
Начнем с процесса, хорошо известного из лабораторных экспериментов, который приводит к усилению уже существующего магнитного поля. Этот механизм был экспериментально обнаружен Линдбергом (см. [21, 22]).

В плазменной пушке создается плазменное кольцо (рис. IV.4), в котором под действием разрядного тока в пушке возникает тороидальное магнитное поле. На выходе пушки имеется радиальное магнитное поле.

Вылетая из пушки, плазменное кольцо захватывает радиальное поле, в результате чего приобретает полоидальную намагниченность. Поведение кольца изучается после его вылета из пушки.

Таким образом, мы имеем свободное плазменное кольцо, обладающее тороидальным и полоидальным магнитными полями. Было обнаружено, что если энергия тороидального магнитного поля превосходит энергию полоидального поля, то может происходить передача энергии от тороидального поля к полоидальному, в результате чего полоидальный магнитный поток усилится.

Тщательные диагностические измерения показали, что усиление полоидального поля легко объяснить, если изобразить токовую систему (рис. IV.5). В упрощенной модели полоидальное поле  $B_p$  создается кольцевым током  $I_p$ , а тороидальное поле  $B_t$  — аксиальным током  $I_a$ , который замыкается на больших расстояниях от кольца. При определенных условиях аксиальный ток становится неустойчивым по отношению к изгибам и приобретает форму спирали. Этот новый ток можно представить как сумму аксиального и кольцевого токов. Из свойств не-



**Рис. IV.5.** Усиление потока в эксперименте Линдберга [22]. Начальная намагниченность плазменного кольца имеет как полоидальную, так и тороидальную составляющие. *а* – полоидальное поле создается кольцевым током; *б* – тороидальное поле создается продольным током, который является неустойчивым; *г* – неустойчивость продольного тока по отношению к изгибам порождает кольцевые токи; *в* – результирующее усиленное полоидальное поле. (Магнитное поле показано штриховыми линиями, а ток – сплошными.)

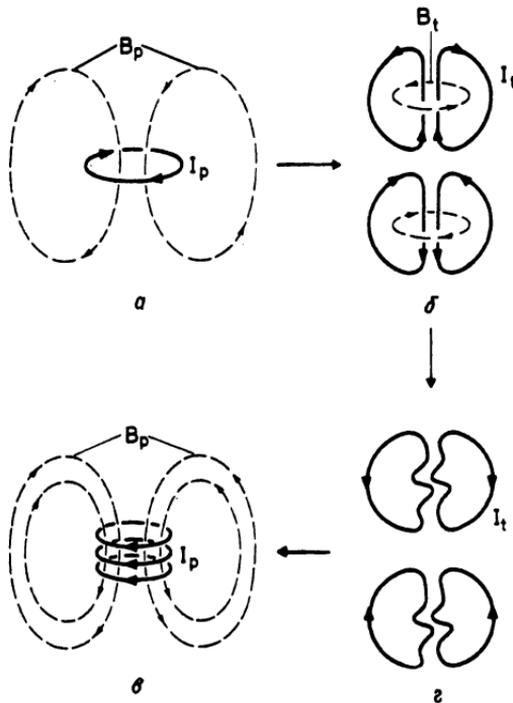
устойчивости по отношению к изгибам следует, что кольцевой ток всегда течет в таком направлении, чтобы усиливать уже существующее полоидальное магнитное поле.

С помощью этого механизма усиления магнитного потока, тщательно изученного в лаборатории, можно объяснить процесс генерации магнитного поля в космической плазме низкой плотности [23, 24, 25, 26].

Сходные плазменные явления наблюдались в тета-пинчах и сферомаках [27, 28].

#### IV.5.5. Генерация космических магнитных полей под действием неустойчивости по отношению к изгибам

Мы совсем не уверены, что с помощью механизма усиления поля за счет неустойчивости по отношению к изгибам также можно объяснять происхождение магнитных полей в межзвездных облаках. Еще более неясен этот вопрос по отношению к внутренним областям планет. Тем не



**Рис. IV.6.** Усиление потока космического магнитного поля с помощью неустойчивости по отношению к изгибам. *а* — начальное полоидальное магнитное поле, созданное кольцевым током; *б* — замедление экваториального вращения приводит к деформации магнитных силовых линий, в результате чего появляются две составляющие тороидального поля; *в* — обе эти составляющие создаются продольными токами, которые неустойчивы по отношению к изгибам; *г* — результирующее усиленное полоидальное поле [22]. (Магнитное поле показано штриховыми линиями, а ток — сплошными.)

менее подобное объяснение (если бы оно оказалось возможным) могло бы выглядеть так:

1) Существует исходное полоидальное магнитное поле (как угодно слабое) (рис. IV.6, *а*).

2) Вследствие гидродинамического движения «вмороженные» магнитные силовые линии деформируются так, что появляется тороидальное поле. Например, это произойдет, если скорость вращения в центральной области экваториальной плоскости отличается от скорости вращения на периферии. В этом случае возникают два тороидальных магнитных поля с противоположной ориентацией, расположенные в северном и южном полушариях (рис. IV.6, *б*).

3) Когда энергия тороидального магнитного поля сравнивается с энергией полоидального поля, осевые токи, генерирующие тороидаль-

ное поле, становятся неустойчивыми (рис. IV.6, в). Неустойчивость по отношению к изгибам приводит к появлению кольцевых токов, которые всегда усиливают исходное полоидальное поле (рис. IV.6, г).

4) При многократном повторении этого процесса могут получиться очень сильные магнитные поля. Усиление поля ограничивается величиной кинетической энергии, запасенной в дифференциальном вращении.

Нельзя сказать, что данное объяснение является чисто умозрительным. Положения (1) и (2) обычно выполняются в космических условиях. Положение (3) — это следствие наиболее изученной из магнитогидродинамических неустойчивостей. За счет процесса (2) кинетическая энергия превращается в энергию тороидального магнитного поля. За счет же процесса (3) энергия тороидального поля трансформируется в энергию полоидального магнитного поля.

Вопрос о том, применимо ли это объяснение к внутренним областям планет, остается открытым. Следует серьезно заняться выяснением этого вопроса, поскольку все существующие теории усиления поля внутри планет сталкиваются в настоящее время с большими трудностями.

## IV.6. КРИТИЧЕСКАЯ СКОРОСТЬ

### IV.6.1. Наличие эффекта критической скорости в ранней Солнечной системе

Если нарисовать график зависимости гравитационной энергии  $W_g$  тел Солнечной системы (планет и спутников) от расстояния до центрального тела (Солнца или планеты), вокруг которого они обращаются, то мы обнаружим, что все «регулярные» тела (за исключением спутников с обратным движением и астероидов) распределяются по поясам. Эту ярко выраженную поясную структуру Солнечной системы (разд. V.7) можно объяснить, если считать, что неионизованные атомы, падающие с больших расстояний на центральное тело, ионизируются и вследствие этого останавливаются электромагнитными силами, как только достигают «критической скорости»  $v_c$ , определяемой соотношением

$$\frac{mv_c^2}{2} = eV_{\text{ion}} \quad (2)$$

( $m$  — масса атома,  $eV_{\text{ion}}$  — его энергия ионизации).

Когда поясная структура Солнечной системы была обнаружена [29], вначале считали, что ее происхождение нетрудно объяснить: как только падающие атомы набирают нужную для ионизации энергию, они ионизируются. Однако все попытки получить этот результат, исходя из классической теории плазмы, оказались неудачными по целому ряду причин. Трудно было придумать механизм превращения кинетической энергии атомов (не электронов!) в энергию ионизации. Далее, из-за наличия целого ряда других конкурирующих процессов лишь относительно малая

часть всей имеющейся энергии могла превращаться в энергию ионизации. В результате поясная структура оставалась необъяснимой теоретически.

### IV.6.2. Экспериментальное открытие

Если не относиться к классической теории плазмы как к святыне, рассмотренное выше явление следует изучать на эксперименте. Как только в связи с термоядерными исследованиями появилась необходимая экспериментальная техника, были проведены опыты по изучению взаимодействия замагниченной плазмы с неионизованным газом. В них был экспериментально обнаружен эффект критической скорости. Это означало, что выводы, сделанные на основании наблюдаемой поясной структуры Солнечной системы, оказались верными, а классическая теория плазмы — неверна!

После первоначального открытия эффекта критической скорости это явление наблюдалось в различных плазменных экспериментах: в опыте по гомополярному вращению, в коаксиальных плазменных пушках и в термоядерном эксперименте Ленерта с вращающейся плазмой. Даниэльсон [30] провел эксперимент, не имеющий непосредственного отношения к физике космической плазмы, который состоял в том, что замагниченная плазма выстреливалась в облако неионизованного газа.

Было показано, что явление «ограничения напряжения», экспериментально обнаруженное задолго до проведения перечисленных выше экспериментов, можно объяснить с помощью эффекта критической скорости. Обзор экспериментальных исследований был дан в работе [31].

Более поздние эксперименты были проведены Бохумской группой с использованием более изощренной экспериментальной техники [32–34]. Они в целом подтвердили ранее полученные результаты и открыли новые возможности для более глубокого понимания рассматриваемого явления.

Все эти эксперименты проводились с чистыми газами, кроме опытов Акнеса [35, 36], где было исследовано поведение газовых смесей и молекулярных газов при определенных условиях.

Наиболее замечательный факт, обнаруженный в этих экспериментах, состоял в том, что уравнение (2) оказалось справедливым для широкого диапазона значений параметров. Действительно, это уравнение хорошо согласуется с данными наблюдений при изменении намагниченности и степени ионизации в пределах нескольких порядков величин.

### IV.6.3. Теория

Результаты экспериментов по критической скорости чрезвычайно сложно объяснить теоретически. Для этого был предложен целый ряд механизмов, но ни один из них не перекрывал весь диапазон значений параметров. В своем обзоре теорий Шерман [37] утверждает, что так оно и должно быть на самом деле. Преобразование энергии происходит

посредством различных механизмов в различных областях значений параметров. Из этого можно заключить, что существует несколько эффективных способов передачи кинетической энергии от ионов к электронам.

В недавних теоретических работах [38, 39] развиваются идеи Шермана и особо исследуется роль электростатических неустойчивостей. В работах [40, 41] рассматривается механизм нагрева электронов, зависящий от образования электростатических оболочек типа впервые предложенных Ленертом [42].

#### IV.6.4. Эффект критической скорости и космические исследования

Несмотря на отмеченные выше трудности, к настоящему времени мы достигли довольно хорошего понимания эффекта критической скорости. Это означает, что сейчас мы готовы объяснить целый ряд астрофизических явлений с помощью этого эффекта. Кроме поясной структуры Солнечной системы имеется несколько явлений, к которым этот механизм может быть применен. Как только относительная скорость движения замагниченной плазмы и неионизированного газа начинает превышать  $v_c$ , взаимодействие между ними должно сильно возрастать.

Для ионосферных газов N и O значение  $v_c$  составляет примерно 11 км/с. Эта скорость немного превышает скорость спутника в верхней ионосфере, поэтому при проведении спутникового эксперимента газ следует выпускать по ходу космического аппарата. В работе [43] был предложен интересный спутниковый эксперимент для демонстрации эффекта критической скорости, состоящий в выпуске нейтрального газа (ксенона), критическая скорость которого меньше первой космической. В работах [44–47] эффект критической скорости используется для объяснения различных явлений, происходящих на поверхности Луны. Он также применим к взаимодействию солнечного ветра с ионосферой Венеры или кометы [48]. Далее разумно предположить, что эффект критической скорости играет важную роль во взаимодействии солнечного ветра с межзвездной средой [49], а также в некоторых других астрофизических процессах, протекающих в более удаленных областях.

В работе [50] содержится обзор экспериментов, теории и их космических приложений.

#### IV.7. ПЛАЗМА ПРИ НАЛИЧИИ ПЫЛИ

Космическая плазма очень часто бывает пылевой, т. е. содержит твердые частицы, в том числе мельчайшие частицы пыли. Обычно они бывают электрически заряжены, и при достаточно большом отношении заряда к массе, когда их движение в основном определяется электромагнитными силами, их также можно считать частью «пылевой плазмы». Этот вопрос рассматривается в работе [51]. Заряженные частицы пыли в планетных магнитосферах изучались в [52, 53].

Температура твердых частиц в космической плазме может отличаться от плазменной на несколько порядков. Если плазма прозрачна и твердые частицы могут излучать энергию, то их температура может составлять, например, около 10 К при температуре электронов порядка  $10^4$  К, температуре ионов порядка  $10^3$  К и температуре молекул порядка 100 К.

#### IV.7.1. Твердые частицы как часть плазмы

Твердая частица в космической плазме заряжается отрицательно в основном из-за столкновений с плазменными электронами. Частица может затем потерять этот заряд за счет фотоэффекта, иногда также под действием автоэлектронной эмиссии и ударов положительных ионов. Обычно частица заряжается до положительного или отрицательного потенциала порядка 1–10 В. Однако, если в плазме имеется много надтепловых электронов, отрицательный потенциал частицы может достигнуть значений порядка нескольких тысяч вольт [54, 55, 51]. Подобные резкие изменения потенциала от нескольких вольт до нескольких тысяч вольт были зарегистрированы в околоземном пространстве с помощью спутников.

#### IV.7.2. Движение твердых частиц под действием электромагнитных и гравитационных сил

Если тело обладает электрическим зарядом  $q$ , то на него действует электромагнитная сила

$$\vec{F}_E = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}), \quad (3)$$

где  $\vec{E}$  и  $\vec{B}$  — электрическое и магнитное поля, а  $\vec{v}$  — скорость тела.

Если сила  $\vec{F}_E$  велика в сравнении с другими силами, частица движется по спирали в космическом магнитном поле. Если ее ларморовский радиус много меньше размеров области, занятой плазмой, частицу можно считать принадлежащей плазме. Такая пылевая плазма широко распространена в космосе. Темные межзвездные облака состоят из пылевой плазмы, и имеются серьезные аргументы в пользу предположения, что Солнечная система в свое время сформировалась из пылевой плазмы.

Если плазма содержит твердые частицы с широким спектром масс, то существует граница, разделяющая достаточно малые частицы, являющиеся частью пылевой плазмы, и достаточно большие частицы, на которые электромагнитное поле влияет слабо. Граничный размер зависит от величины магнитного электрического, гравитационного полей, заряда и плотности частицы. Обычно он бывает порядка  $10^{-5}$ – $10^{-7}$  м. (Для ознакомления с этим вопросом см. [19 разд. 5.4].) Когда частица попадает в область плазмы с большим количеством надтепловых электронов, ее заряд может резко возрасти примерно в 1000 раз, в резуль-

тате чего она окажется захваченной плазмой. Если затем ее заряд уменьшится или увеличится ее масса, то ее движение вновь будет определяться действием неэлектромагнитных сил.

#### IV.8. ОБРАЗОВАНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ МЕЖЗВЕЗДНЫХ ОБЛАКОВ

Часто считают, что магнитогиродинамические эффекты препятствуют сжатию космического облака. Однако, как было показано в разд. II.4, возможно и обратное воздействие. Легко найти конфигурации магнитного поля, при которых электромагнитные силы способствуют сжатию. Эти силы могут даже играть определяющую роль в образовании и связывании космических облаков.

Как было показано в разд. II.4.3, стационарные электромагнитные явления поддерживают градиент давления

$$\nabla p = \vec{i} \times \vec{B}. \quad (4)$$

Поскольку

$$\vec{i} = \frac{1}{\mu_0} \text{rot } \vec{B}, \quad (5)$$

можно исключить из уравнения (4) либо  $\vec{i}$ , либо  $\vec{B}$ . В физике космической плазмы обычно исключают  $\vec{i}$ , что дает

$$\nabla p = \frac{1}{\mu_0} [\text{rot } \vec{B} \times \vec{B}], \quad (6)$$

или

$$\nabla \left( p + \frac{B^2}{2\mu_0} \right) = \frac{(\vec{B} \nabla) \vec{B}}{\mu_0}. \quad (7)$$

При определенных условиях (например, если все магнитные силовые линии параллельны) правая часть соотношения (7) обращается в нуль и мы получаем

$$p + \frac{B^2}{2\mu_0} = \text{const.} \quad (8)$$

Распространенное мнение, что магнитное поле противодействует сжатию облака, опирается исключительно на эту формулу, которая справедлива лишь в одном частном случае. Для иллюстрации важности учета правой части соотношения (7) рассмотрим более подробно следующий простой пример [56].

Предположим, что все параметры задачи (давление  $p$ , магнитное поле  $\vec{B}$  и плотность тока  $\vec{i}$ ) зависят в цилиндрической системе координат  $(r, \varphi, z)$  лишь от  $r$ . Из уравнения (4) имеем

$$\frac{dp}{dr} = i_\varphi B_z - i_z B_\varphi \quad (9)$$

Поскольку  $B_\varphi = \mu_0 I_z(r)/2\pi r$ , где  $I_z = I_z(r)$  — полный ток в направлении  $z$  через круг радиуса  $r$ , на основании (5) получим

$$i_\varphi = -\frac{1}{\mu_0} \frac{dB_z}{dr}, \quad i_z = \frac{1}{2\pi r} \frac{dI_z}{dr}. \quad (10)$$

Тогда уравнение (7) принимает вид

$$\pi r^2 \frac{d}{dr} \left( p + \frac{B_z^2}{2\mu_0} \right) = -\frac{\mu_0}{8\pi} \frac{d}{dr} (I_z^2). \quad (11)$$

После интегрирования по частям получим

$$-\pi r_1^2 \left( p + \frac{B_z^2}{2\mu_0} \right)_{r=r_1} + \int_0^{r_1} \left( p + \frac{B_z^2}{2\mu_0} \right) 2\pi r dr = \frac{\mu_0}{8\pi} I_z^2(r_1). \quad (12)$$

### IV.8.1. Три частных случая

Рассмотрим три важных частных случая.

1)  $i_z = 0$ . Ток течет только в направлении  $\varphi$  (рис. IV.7, а), и из уравнения (11) имеем

$$p + \frac{B^2}{2\mu_0} = \text{const}, \quad (13)$$

т. е. сумма газокINETического и «магнитостатического» давлений постоянна в пространстве.

2)  $p = \text{const}$ . Магнитное поле является бессильным. Из уравнения (9) имеем

$$\frac{i_z}{i_\varphi} = \frac{B_z}{B_\varphi}. \quad (14)$$

Мы получаем спиральное магнитное поле (рис. IV.7, б), которое параллельно оси  $z$  при  $r=0$ , но перпендикулярно ей при больших  $r$ . При больших значениях  $r$  поле  $B_\varphi$  спадает пропорционально  $r^{-1}$  [57].

3) Третий частный случай определяется условиями  $B_z = 0$  и  $p(r_1) = 0$ . Он соответствует классическому пинчу с азимутальным магнитным полем и током, текущим вдоль оси  $z$  (рис. IV.7, в). В полностью ионизованной плазме, в которой  $T_i = T_e = T$ ,  $n_i = n_e = n$  и  $N = \int_0^{r_1} (n_i + n_e) 2\pi r dr$  (полное число электронов и ионов на единицу длины), из уравнения (12) получается соотношение Беннетта [58]

$$\frac{\mu_0}{4\pi} I_z^2 = 2NkT, \quad (15)$$

выведенное ранее в разд. II.4.3.

Если плазма ионизована не полностью, электромагнитные силы действуют на неионизованную компоненту лишь косвенным образом, через

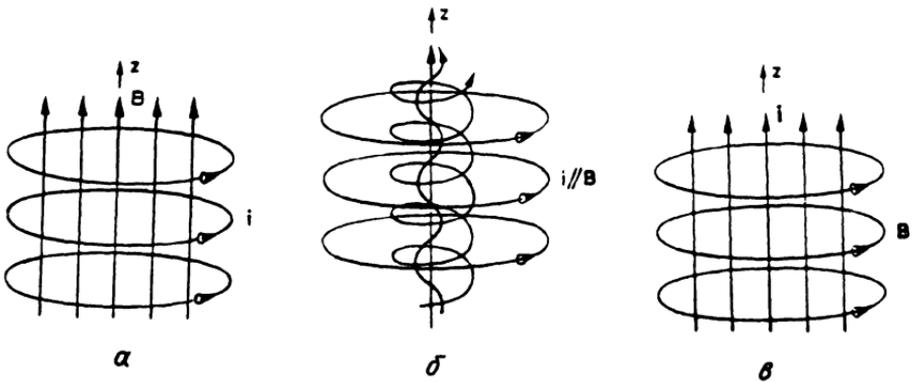


Рис. IV.7. Три частных случая стационарных, цилиндрически симметричных конфигураций тока  $i$  и магнитного поля  $B$ . а — тороидальный ток и продольное магнитное поле создают силу, препятствующую сжатию; б — бессильная конфигурация, когда  $i$  и  $B$  параллельны; в — пинч Беннета с продольным током и тороидальным магнитным полем.

посредство вязкости между ионизованной и неионизованной компонентами. Если такое взаимодействие достаточно сильное, в соотношение (15) следует добавить член  $2N_A k T_A$  (индекс  $A$  относится к неионизованной компоненте).

#### IV.8.2. Бессильные магнитные поля и образование волокон

Этот вопрос изучался в разд. II.4.4. Рассмотрим теперь плазму, находящуюся в почти бессильном магнитном поле, через которую течет спиральный ток, подобный току, изображенному на рис. IV.7, б. Предполагается, что плазма обладает высокой, но конечной проводимостью. Из этого следует, что электрическое поле  $E_z \neq 0$ . На больших расстояниях от оси магнитное поле почти тороидально и по величине равно  $B_\phi = \mu_0 I_z / 2\pi r$ . Здесь  $I_z$ , как и раньше, полный осевой ток внутри цилиндра радиуса  $r$ . Под действием электрического поля возникает дрейф к оси со скоростью

$$|v_r| = E_z / B_\phi. \quad (16)$$

Следовательно, если на больших расстояниях  $r$  плотность массы равна  $\rho$ , вещество засасывается к оси волокна со скоростью

$$\frac{dM}{dt} = 2\pi r v_r \rho = (2\pi r)^2 \rho \frac{E_z}{\mu_0 I_z} \quad (17)$$

на единицу длины. Если электрическое поле антипараллельно току, дрейф происходит наружу.

Ранее мы применяли эти результаты к солнечной короне. По-видимому, протуберанцы и спикулы имеют такую же природу.

В межзвездных облаках часто наблюдается волокнистая структура, свидетельствующая о том, что токи там текут вдоль магнитных силовых линий. Применение техники повышения контрастности к снимкам межзвездных туманностей наглядно демонстрирует наличие этой структуры (рис. II.9). Облако, которое на обычном фотоснимке выглядит как обширное и однородное скопление вещества, оказывается состоящим из сетки волокон. На основании сказанного в разд. II.4 можно сделать вывод, что эти волокна являются индикаторами нитевидных и (или) слоистых токов. Если такая ситуация типична для межзвездных облаков, можно сказать, что все однородные модели образования и эволюции этих космических облаков устарели. В данном случае предположение об однородности явилось следствием недостаточной информации.

### IV.8.3. Способствуют или противодействуют магнитные поля сжатию?

Если магнитное поле бессиловое, оно не способствует и не противодействует сжатию. Поле будет бессиловым в том случае, когда создающие его электрические токи параллельны магнитным силовым линиям. В цилиндрической геометрии силовые линии, как и линии тока, имеют вид спирали (см. рис. IV.7, б). Если увеличить угол между линиями тока и магнитными силовыми линиями от нуля на некоторое конечное значение, чтобы ток ( $i_1$  на рис. IV.8) стал более тороидальным, чем магнитное поле, то электромагнитное давление будет действовать в радиальном направлении наружу, т. е. будет противодействовать сжатию. Если же ток ( $i_2$  на рис. IV.8) становится более близким к аксиальному по сравнению с магнитным полем, электромагнитные силы сжимают плазму.

Таким образом, ответ на вопрос, сжимает или расширяет магнитное поле плазму, в задаче с осевой симметрией зависит от того, является ли магнитное поле более тороидальным, чем электрический ток, или же наоборот.

Мы уже встречали целый ряд явлений, иллюстрирующих это положение, в магнитосфере, солнечной атмосфере и гелиосфере. В этой связи представляет особый интерес попытка экстраполировать токовую модель гелиосферы на галактическую токовую систему.

Если в качестве типичного значения галактического магнитного поля взять  $B_G = 10^{-9} - 10^{-10}$  Т, а в качестве типичного линейного размера галактики  $l_G = 10^{20} - 10^{21}$  м, то галактический ток будет порядка  $I_G = B_G l_G \frac{2\pi}{\mu_0} = 10^{17} - 10^{19}$  А [59]. По аналогии с гелиосферной токовой

системой можно заключить, что этот ток должен протекать в плоскости симметрии галактики, возможно совершая волнообразные движения вверх-вниз. Токовая система может состоять из нескольких относительно замкнутых токовых областей. Не исключено, что этот ток частично течет через межзвездные облака, способствуя их формированию.

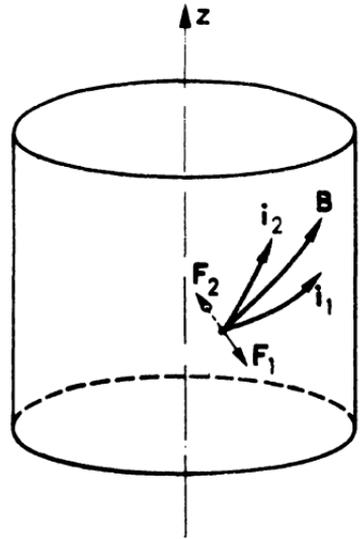


Рис. IV.8. Конфигурация тока и магнитного поля. Если ток  $i_1$  более тороидальный, чем магнитное поле, электромагнитная сила  $F_1 = i_1 \times B$  направлена по радиусу наружу. Если ток  $i_2$  более продольный, чем магнитное поле, сила  $F_2 = i_2 \times B$  направлена по радиусу к оси.

#### IV.8.4. Пинчевание темных межзвездных облаков

Важность пинч-эффекта для межзвездных облаков можно проиллюстрировать двумя примерами.

1) Рассмотрим сначала межзвездное облако с массой, равной 100 масс Солнца, т. е.  $M_c = 2 \cdot 10^{32}$  кг, занимающее объем с линейным размером  $l_c = 10^{17}$  м. Температура облака  $T_c = 10 \div 10^2$  К. Такое облако примерно соответствует туманности Ориона. Число атомов в облаке равно примерно  $10^{59}$ , средняя концентрация  $\bar{n} = 10^8$  м $^{-3}$  и число атомов на единицу длины  $N = 10^{42}$  м $^{-1}$ . Подставляя последнее значение и заданную температуру в соотношение Беннетта (15), получим, что для существенного сжатия через облако должен протекать электрический ток  $I_c \approx 5 \cdot 10^{13} - 2 \cdot 10^{14}$  А.

2) Рассмотрим теперь облако, масса которого равна одной солнечной массе,  $M_c = 2 \cdot 10^{30}$  кг, температура  $T_c = 10 \div 10^2$  К и линейный размер  $l_c = 10^{16} \div 10^{17}$  м. В таком облаке  $\bar{n} = 10^6 \div 10^9$  м $^{-3}$  и  $N = 10^{40} \div 10^{41}$  м $^{-1}$ .

Ток, необходимый для сжатия такого облака, равен  $I_c = 5 \cdot 10^{12} \div 5 \cdot 10^{13}$  А.

Значения токов, найденные выше для двух различных межзвездных облаков, приблизительно равны среднему геометрическому от значений гелиосферного ( $3 \cdot 10^9$  А) и галактического ( $3 \cdot 10^{17}$  А) токов (разд. III.4.2 и III.4.4).

Далее, магнитное поле в космическом облаке должно быть порядка  $B_c = \mu_0 I_c / 2\pi l_c = 10^{-9} \div 10^{-11}$  Т, что также вполне приемлемо.

В рассмотренных выше двух примерах предполагалось, что межзвездные облака сжимаются под действием пинч-эффекта при наличии

чисто тороидального магнитного поля и чисто аксиального тока. Согласно разд. IV.8.3, во всех магнитных конфигурациях, начиная с чисто тороидального поля вплоть до бессилового, происходит сжатие облака. Для пинчевания плазмы в этих промежуточных случаях требуются токи, превосходящие значение, следующее из соотношения Беннетта.

Итак, под действием пинч-эффекта межзвездная плазма может сжиматься в плотные облака. Это заключение очень важно для теории межзвездных облаков, потому что из него следует, что процессы образования и дальнейшей эволюции этих облаков определяются не одними только гравитационными силами. *Процессы образования и эволюции межзвездных облаков могут управляться (лучше даже сказать «по-видимому, управляются») электромагнитными эффектами.*

## IV.9. АМБИПЛАЗМА

### IV.9.1. Свойства амбиплазмы

Как будет показано в гл. VI, имеются довольно веские аргументы в пользу существования антивещества. Поэтому важно изучить свойства плазмы, состоящей из смеси коиновещества \*) и антивещества. Такую плазму обычно называют «амбиплазмой» (греческое слово «*ambi*» означает «совместный», «обоюдный»).

В общем случае амбиплазма может состоять из смеси всех элементов и антиэлементов.

Для упрощения рассуждений мы ограничимся рассмотрением амбиплазмы, состоящей всего из четырех компонент: протонов, антипротонов, позитронов и электронов, концентрации которых обозначим соответственно  $n_p^+$ ,  $n_p^-$ ,  $n_e^+$  и  $n_e^-$ . Амбиплазма, как и прочая космическая плазма, намагничена (магнитное поле в ней равно  $B$ ) и подвержена действию гравитационного поля  $\vec{g}$  (которое, конечно, действует одинаковым образом на частицы и античастицы).

Условие квазинейтральности можно записать в виде

$$n_p^+ + n_e^+ = n_p^- + n_e^-. \quad (18)$$

Особый интерес представляют три частных случая:

*Коиновещество:*

$$n_p^- = 0, \quad n_e^+ = 0, \quad n_p^+ = n_e^-. \quad (19)$$

*Антивещество:*

$$n_p^+ = 0, \quad n_e^- = 0, \quad n_p^- = n_e^+. \quad (20)$$

---

\*) Коиновещество (от греческого слова «*koinos*», означающего «обычный») — это обычное вещество. Конечно, и антивещество, и коиновещество суть материя. Они обладают массой, и на них одинаково действует гравитационное поле.

*Симметричная амбиплазма:*

$$n_p^+ = n_p^-, n_e^+ = n_e^- \quad (21)$$

#### IV.9.2. Реакции аннигиляции

Протон и антипротон могут аннигилировать друг с другом. В результате аннигиляции рождаются нейтрино и  $\gamma$ -кванты высоких энергий. После распада пионов и мюонов в среднем остаются три электрон-позитронные пары с энергиями порядка 100 МэВ. Энергетический спектр представлен на рис. IV.9.

Процесс аннигиляции зависит от начальной энергии. Реакция аннигиляции  $p^+p^-$  происходит в основном вследствие сильного взаимодействия, и в результате ее образуются преимущественно положительные, отрицательные и нейтральные пионы, которые в свою очередь очень быстро распадаются на электроны, позитроны, нейтрино и фотоны. Основная реакция между  $e^+$  и  $e^-$ , заключающаяся в прямой аннигиляции с образованием двух фотонов, происходит вследствие электромагнитного взаимодействия.

Эксперименты с антипротонами проводились для энергий в диапазоне МэВ – ГэВ, однако для большинства наших задач существенна энергия порядка тепловой, поэтому мы не располагаем экспериментально измеренными сечениями реакций аннигиляции ни для протонов и антипротонов, ни для электронов и позитронов. В связи с этим нам приходится использовать теоретические оценки для сечений, которые, естественно, содержат элемент неопределенности.

Вводя «классический радиус электрона»

$$d = \frac{\mu_0 e^2}{4\pi m} = 2,8 \cdot 10^{-15} \text{ м} \quad (22)$$

и сечение

$$\sigma_0 = \pi d^2 = 2,5 \cdot 10^{-29} \text{ м}^2, \quad (23)$$

можно выразить время жизни электрона (позитрона) в позитронном (электронном) газе через концентрацию  $n_e$ :

$$t_e = k_e t_{0e}, \quad (24)$$

где

$$t_{0e} = (n_e c \sigma_0)^{-1} = 4,2 \cdot 10^{12} n_e^{-1} \text{ лет}. \quad (25)$$

Для протонов и антипротонов

$$t_p = k_p t_{0p}, \quad (26)$$

где

$$t_{0p} = (n_p c \sigma_0)^{-1} = 4,2 \cdot 10^{12} n_p^{-1} \text{ лет}. \quad (27)$$

Зависимость от энергии содержится теперь в коэффициентах  $k_e$  и  $k_p$ . Для определения их значений необходимо, как было сказано выше, ис-

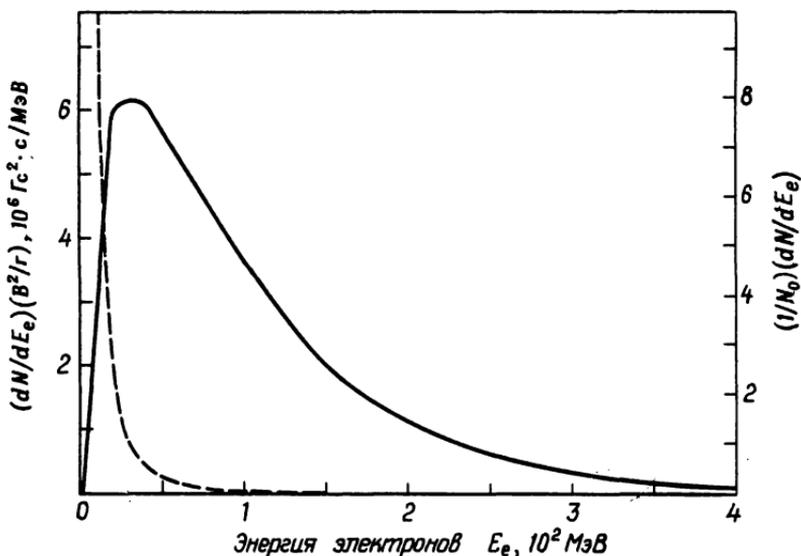


Рис. IV.9. Сплошная линия — энергетический спектр электронов и позитронов, рождающихся при протон-антипротонной аннигиляции. Штриховая линия — стационарный энергетический спектр электронов, рождающихся в процессе аннигиляции,  $dN/dE_e$ , полученный при условии постоянства скорости аннигиляции, когда электроны теряют свою энергию вследствие синхротронного излучения в магнитном поле  $B$ . (Правая шкала — в единицах  $10^{-3}$  МэВ $^{-1}$ .)

пользовать теоретические оценки. Согласно [60], эти коэффициенты в различных диапазонах кинетической энергии записываются по-разному. Так, для ультррелятивистских электронов

$$k_e = \frac{eV}{mc^2} \ln \frac{eV}{mc^2}. \quad (28)$$

Для энергий от 10 кэВ до 1 МэВ коэффициент  $k_e$  близок к единице. При энергиях меньше 10 кэВ необходимо учитывать эффект кулоновского притяжения. В результате для  $k_e$  получается выражение

$$k_e = \frac{v(1 - e^{-2\pi\alpha/v})}{c \cdot 2\pi\alpha}, \quad (29)$$

где  $\alpha = 1/137$  — постоянная тонкой структуры. Коэффициент  $k_p(v) \approx 5k_e(v)$  при энергиях ниже 1 ГэВ. Так, он равен 5 при энергиях от 10 МэВ до 1 ГэВ, а при энергиях ниже 10 МэВ

$$k_p = \frac{5v(1 - e^{-2\pi\alpha/v})}{c \cdot 2\pi\alpha}. \quad (30)$$

Приведенные выше оценки относятся к прямому процессу аннигиля-

ции. Однако при определенных условиях до аннигиляции могут произойти другие процессы взаимодействия, в результате чего эффективное сечение реакции сильно изменится.

При низких энергиях электрон-позитронная пара может претерпеть радиационный захват, в результате которого образуется связанный позитроний, который в дальнейшем аннигилирует. Этот процесс увеличивает сечение реакции аннигиляции иногда на несколько порядков. Поскольку радиационные процессы для пары  $p^+p^-$  менее эффективны, то радиационный захват для нее несуществен.

В смеси водород — антиводород, содержащей атомы и молекулы, могут происходить различные перегруппировочные реакции, существенно влияющие на скорости реакций аннигиляции  $e^+e^-$  и  $p^+p^-$ .

Сечения и времена жизни как для электрон-позитронной, так и протон-антипротонной реакций можно найти в таблицах и диаграммах, приведенных в [60].

### IV.9.3. Излучение амбиплазмы

Электроны и позитроны, образующиеся в результате протон-антипротонной аннигиляции, обладают энергией порядка  $10^8$  эВ. Космическая плазма всех известных видов замагничена, поэтому нет особых причин считать, что амбиплазма составляет в этом отношении исключение. В магнитном поле  $B$  электроны и позитроны движутся по спирали и испускают синхротронное излучение. Характерное время излучения

$$t_s = \frac{5}{B^2} \frac{1}{1 + (W/W_0)} c \quad (31)$$

(см., например, [25, стр. 84]), где  $W$  — кинетическая энергия и  $W_0 = mc^2$ . При  $W = 100$  МэВ  $= 200 W_0$

$$t_s = 2,5 \cdot 10^{-2} B^{-2}. \quad (32)$$

Если  $t_s \ll t_e$ , электроны и позитроны успевают до аннигиляции излучить практически всю свою энергию в виде синхротронного излучения. Если же  $t_s \gg t_e$ , излучение незначительно.

Максимум энергии в спектре синхротронного излучения приходится на частоту

$$\nu_{\max} = \frac{eB}{2\pi m} \left( \frac{W}{W_0} \right)^2 = 2,8 \cdot 10^{10} \left( \frac{W}{W_0} \right)^2 B. \quad (33)$$

При  $W/W_0 = 200$

$$\nu_{\max} = 10^{15} \cdot B. \quad (34)$$

Следует отметить, что если частица находится в течение большей части

своего времени жизни в поле  $B_0$  и всего лишь в течение  $1/100$  времени жизни в поле  $B_1 = 10B_0$ , половина ее энергии будет излучена в более сильном поле. Поэтому при вычислении времени жизни частицы и нахождения максимума в энергетическом спектре излучения следует брать не среднее, а максимальное значение поля.

Это замечание очень важно, так как реальная космическая плазма существенно неоднородна. Мощность синхротронного излучения может оказаться значительно выше, чем та мощность, которая получается при расчетах с использованием среднего поля  $B$ .

В космическом пространстве тормозным излучением можно, как правило, пренебречь по сравнению с синхротронным, за исключением областей, где концентрация частиц велика.

При условии  $t_s \ll t_p$  конечный результат аннигиляции протон-антипротонной пары состоит в излучении нейтрино с энергиями порядка 1000 МэВ,  $\gamma$ -квантов с энергией около 700 МэВ и электрон-позитронных пар, несущих энергию 300 МэВ. Таким образом, энергия, выделяющаяся при аннигиляции, распределяется между этими продуктами реакции в отношении 3:2:1.

Позитроны и электроны также аннигилируют с испусканием фотонов. Энергия фотонов равна 0,5 МэВ в системе центра масс аннигилирующих частиц (*в неподвижной системе отсчета*). Однако, если время  $t_s$  не очень мало, частицы проаннигилируют, прежде чем потеряют всю свою кинетическую энергию. В результате будут излучаться наблюдаемые  $\gamma$ -кванты с энергиями от нуля до максимального значения, зависящего от кинетических энергий частиц. Другими словами, будет наблюдаться излучение в широком спектральном диапазоне. Таким образом, *антивещество не обязательно должно проявлять себя в виде излучения линии 0,5 МэВ.*

Кроме  $\gamma$ -квантов, амбиплазма излучает нейтрино, однако их невозможно зарегистрировать с помощью современных приборов. Амбиплазма испускает также свет и все другие виды излучения, характерные для космической плазмы.

В бесконечном плоском слое толщины  $\Delta$  полная энергия на  $1 \text{ м}^2$  равна

$$W_M = 2m_p c^2 n_p \Delta, \quad (35)$$

где  $n_p$  — количество пар  $p^+p^-$  в единице объема.

Эта энергия излучается за время  $t_p$ , определяемое соотношением (26). Поток энергии  $\phi$  за единицу времени равен

$$\phi = W_M/t_p = 2m_p c^3 \sigma_0 n_p^2 \Delta k_p^{-1}, \quad (36)$$

или

$$\phi = 2,2 \cdot 10^{-30} n_p^2 \Delta k_p^{-1} \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}). \quad (37)$$

#### IV.9.4. Основные проблемы, связанные с амбиплазмой

Перечислим три главные проблемы, связанные с космической амбиплазмой: 1) сосуществование коиновещества и антивещества, 2) аннигиляция как источник энергии и 3) разделение коиновещества и антивещества.

1) *Сосуществование коиновещества и антивещества.* Могут ли коиновещество и антивещество сосуществовать во Вселенной? Если да, то могут ли они сосуществовать в нашей Галактике (см. разд. VI.2)?

Поскольку все старые астрофизические модели были, как правило, однородными, то и ответ на наш вопрос был раньше отрицательным. Современные представления, согласно которым космическая плазма является неоднородной, и особенно открытие ячеистой структуры пространства, изменили ситуацию.

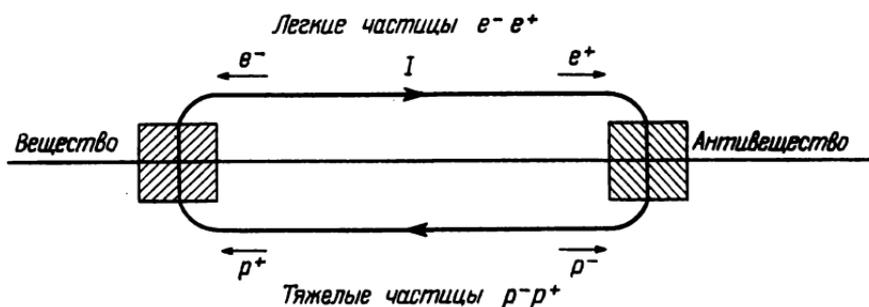
2) *Аннигиляция как источник энергии.* По-видимому, аннигиляция является единственным приемлемым источником энергии для целого ряда явлений в диапазоне крайне высоких энергий, таких, как разбегание галактик, излучение квазаров и другие явления, изучаемые в настоящее время с помощью рентгеновской и гамма-астрономии (разд. IV.10).

3) *Разделение коиновещества и антивещества.* Если придерживаться модели Клейна, согласно которой Вселенная «вначале» состояла из очень разреженной амбиплазмы, проблема разделения коиновещества и антивещества будет определяющей. Однако, если даже считать, что современная Вселенная является симметричной, из этого не следует, что мы обязаны придерживаться теории симметричной космологии Клейна. Более подробно эта проблема будет обсуждаться в гл. VI.

#### IV.9.5. Разделение вещества и антивещества

Одно гравитационное поле не способно разделить первоначально симметричную амбиплазму (содержащую равные количества вещества и антивещества) на вещество и антивещество. Однако такое разделение может в принципе произойти при наличии электромагнитных эффектов [61].

Для демонстрации этого явления рассмотрим симметричную амбиплазму, находящуюся в гравитационном поле, которое концентрирует протоны и антипротоны в нижних слоях атмосферы, а электроны и позитроны — в верхних. Предположим, что в амбиплазме течет электрический ток, параллельный полю  $\vec{g}$ . Этот ток будет уносить отрицательный заряд из верхних слоев атмосферы, а поскольку они в основном состоят из электронов и позитронов, именно электроны будут покидать эту область под действием тока. Одновременно электрический ток будет уносить отрицательный заряд и из основания атмосферы, а так как



**Рис. IV.10.** Амбиплазма в гравитационном поле  $g$  разделяется под действием электрического поля таким образом, что вещество концентрируется там, где ток антипараллелен  $\vec{g}$ , а антивещество — там, где ток параллелен  $\vec{g}$ .

в нижних областях содержатся в основном тяжелые частицы, это приведет, по существу, к потере протонов. Следовательно, под действием тока на границе между областями  $p^+p^-$  и  $e^-e^+$  будет скапливаться антивещество. Аналогичным образом под действием вертикального электрического тока, антипараллельного полю  $\vec{g}$ , на границе между областями  $p^+p^-$  и  $e^-e^+$  будет происходить концентрация обычного вещества. В результате в токовой системе, изображенной на рис. IV.10, появятся две отдельные области, одна из которых содержит вещество, а другая — антивещество.

Можно высказать возражение, что процесс такого рода противоречит основным законам статистической физики, так как под действием такого процесса система переходит из неупорядоченного состояния, когда вещество и антивещество однородно перемешаны, в упорядоченное. Однако такое возражение несостоятельно, поскольку гравитационное поле является в конечном итоге единственным источником энергии всей системы. Рассмотрим, например, падение воды с горной вершины. С помощью гидроэлектростанции можно превратить кинетическую энергию водного потока в электрическую, которую затем можно использовать для электролитического разложения части воды на водород и кислород. Рассмотренный нами процесс сходен с этим. Действительно, процесс разделения вещества и антивещества в первоначально симметричной амбиплазме можно трактовать как процесс электролиза. Количество вещества или антивещества  $m$ , выделяющееся под действием тока  $I$  за время  $t$ , равно

$$m = \left( \frac{m_H}{e} \right) It \quad (38)$$

(где  $m_H$  — масса атома водорода), что согласуется с основным законом электролиза.

Поскольку в движущейся замагниченной плазме всегда имеются электрические токи, процесс разделения является вполне естественным.

Однако полное количество вещества (или антивещества), выделяющееся в определенной замкнутой цепи, ограничено. Предположим, что вдоль оси кругового цилиндра радиуса  $r$  течет ток  $I = \pi r^2 i$ . Величина магнитного поля на поверхности цилиндра определяется выражением

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}. \quad (39)$$

Комбинируя (39) и (38), получим

$$m = m_{\text{H}} t 2\pi r B / \mu_0 e = 5 \cdot 10^{-2} t r B. \quad (40)$$

Считается, что магнитные поля в космическом пространстве не превышают  $\sim 10^{-9}$  Т, в крайнем случае  $\sim 10^{-8}$  Т. Поскольку обсуждаемое явление происходит в областях, где плотность энергии велика, следует брать большее значение магнитного поля. Время  $t$  не может, очевидно, превышать  $10^{17}$  с ( $3 \cdot 10^9$  лет). Считая, что  $B < 10^{-8}$  Т, а  $t < 10^{17}$  с, получим

$$m < 5 \cdot 10^7 r. \quad (41)$$

Следовательно, эффективность этого процесса в галактических масштабах ( $r = 10^{21}$  м) недостаточна для выделения массы вещества, равной одной солнечной массе.

Этот процесс гораздо более эффективен в малых масштабах. Если плотность среды равна  $nm_p$ , масса вещества составляет  $nm_p r^3$ . Следовательно, полное разделение произойдет при условии

$$nm_p r^3 = 5 \cdot 10^{-2} t r B \quad (42)$$

или

$$r^2 = 5 \cdot 10^{-2} \frac{tB}{m_p n} = 3 \cdot 10^{25} \frac{Bt}{n}. \quad (43)$$

Время  $t$  ограничено временем аннигиляции. Подставляя вместо  $t$  время  $t_0$  из (27), получим

$$r = 6 \cdot 10^{22} B^{1/2} n^{-1}. \quad (44)$$

При  $B > 10^{-4}$  Т и  $n = 10^2$  м $^{-3}$  имеем  $r < 10^{19}$  м и  $m < m_p n (10^{19})^3 < 10^{31}$  кг. Итак, в системе, состоящей из элементов «малого масштаба», линейные размеры которых порядка 0,1 светового года или меньше, может произойти существенное разделение вещества и антивещества. Масса вещества, выделяющегося в каждом элементе, не очень велика, однако полная разделенная масса во всей системе может составлять существенную часть всей массы амбиоплазмы.

Было предложено целый ряд плазменных процессов, приводящих к разделению вещества и антивещества (см. [62]). В работе [62] Томп-

сон предположил, что амбиплазма в общем случае находится в неустойчивом состоянии и что она самопроизвольно «коагулирует» на области вещества и антивещества. Согласно Томпсону, этот процесс и (или) последующий процесс объединения областей, содержащих вещество одного типа, могут привести к разделению амбиплазмы в галактических масштабах.

#### IV.9.6. О сосуществовании вещества и антивещества

Считается, что средняя концентрация частиц в Метагалактике составляет примерно  $1 \text{ м}^{-3}$ . Согласно вышесказанному, однородная амбиплазма такой плотности обладает очень большим временем жизни. Средняя концентрация частиц в Галактике порядка  $10^6 \text{ м}^{-3}$ . Это означает, что, если бы наша Галактика состояла вначале из однородной амбиплазмы, она бы проаннигилировала много лет тому назад. Антивещество может существовать в Галактике только в том случае, если оно отделено от вещества. Рассмотрим здесь переходную область между веществом и антивеществом.

Если, например, уронить на горячую плиту, температура которой слегка превышает  $100^\circ\text{C}$ , каплю воды, эта капля очень быстро испарится. Если же температура плиты очень высока, капля воды может просуществовать в течение пяти-десяти минут (особенно если поверхность плиты немного вогнута). В результате испарения образуется тонкий слой пара, который изолирует каплю воды от плиты. В учебниках по физике это явление называют явлением Лейденфроста. В высокотемпературных кипятильниках оно играет важную роль.

Аналогичное явление может произойти при контакте вещества и антивещества. На поверхности раздела между веществом и антивеществом под действием процесса аннигиляции может образоваться горячий слой, изолирующий вещество от антивещества, подобно тому как водяной пар в слое Лейденфроста изолирует воду от нагретой плиты.

Мы вернемся к этому явлению в гл. VI.

#### IV.10. ЯВЛЕНИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

Одна из важных и интересных проблем астрофизики состоит в том, каким образом возникает излучение высоких, а иногда чрезвычайно высоких энергий и как вещество ускоряется до скоростей, близких к скорости света. Полвека тому назад было обнаружено, что на Землю падает (почти) изотропное излучение, состоящее в основном из протонов и других ядер очень высоких энергий. Это излучение называют космическими лучами, а в настоящее время нередко именуют «галактическими» космическими лучами, хотя до сих пор не доказано, что излучение, падающее на Землю, возникает именно внутри Галактики. Прямыми измерениями были обнаружены частицы с энергиями вплоть до  $10^{11}$  эВ, а исследование некоторых больших ливней свидетельствует о том, что

исходные частицы, вызвавшие эти ливни, обладали энергией не менее  $10^{19}$  эВ.

Существует и другой тип излучения высоких энергий, которое вызывается солнечными космическими лучами и возникает во время солнечных вспышек. Энергия частиц в этом излучении достигает  $10^9$  эВ, а иногда  $10^{10}$  эВ.

Частицы высоких энергий, ионы и электроны, наблюдаются также в магнитосферах планет. Первыми были открыты радиационные пояса Земли, а затем такие же пояса заряженных частиц были обнаружены у Юпитера и Сатурна. Энергия частиц в этих поясах лежит в диапазоне  $10^6 - 10^8$  эВ. Кроме того, в зоне полярных сияний ионосфера бомбардируется пучками электронов с энергиями от  $10^3$  эВ до  $10^4$  эВ.

С развитием рентгеновской и гамма-астрономии было обнаружено большое число астрофизических объектов, испускающих фотоны высоких энергий. Некоторые виды космического излучения, особенно обычные «галактические» космические лучи, не меняются со временем или испытывают очень медленные вариации. Другие же изменяются очень быстро, с постоянными времени порядка долей секунды (всплески  $\gamma$ -излучения) (см. разд. VI.3.6).

Далее, в спектрах удаленных галактик наблюдаются красные смещения, свидетельствующие о том, что эти галактики удаляются от нас со скоростями, которым соответствует энергия порядка  $10^8$  эВ на один протон. У некоторых квазаров наблюдаются еще большие красные смещения, соответствующие значениям энергии порядка  $10^9$  эВ/протон. Полные кинетические энергии таких объектов, конечно, значительно превосходят энергию излучения.

#### IV.10.1. Источники энергии и процессы ускорения

Существует целый ряд теорий, объясняющих происхождение наблюдаемого космического излучения различными механизмами, при которых энергия черпается от двойных звезд, новых, сверхновых, пульсаров и пр. Колоссальные кинетические энергии галактик и квазаров либо считаются связанными с процессами, которые происходили, согласно теории «большого взрыва», в начальный момент образования Вселенной, либо постулируются в качестве начальных условий.

Ниже мы попытаемся выяснить, нельзя ли обойтись без таких специальных гипотез, и получить указанные высокие значения энергий, исходя из общих свойств плазмы и плазменных явлений, обоснование которых, как нам кажется, не требует выдвижения подобных гипотез.

Обсудим теперь некоторые важные механизмы ускорения.

##### IV.10.1.1. Изменяющиеся магнитные поля

В меняющемся со временем магнитном поле энергия частицы то возрастает, то уменьшается. Если при этом частица рассеивается на неоднородностях магнитного поля, то происходит необратимое возрастание энергии (так называемая магнитная накачка). С помощью такого

механизма частица может ускориться до любой энергии, позволяющей ей оставаться захваченной магнитным полем. Механизм ускорения Ферми можно рассматривать как частный случай этого общего механизма. Кроме того, существуют и родственные описанному процессы ускорения заряженных частиц различными типами волн в плазме. В результате действия перечисленных механизмов ускорения возможно образование определенных областей в космическом пространстве, заполненных частицами высоких энергий. В итоге будет наблюдаться медленно меняющееся со временем и практически изотропное космическое излучение. См. разд. IV.10.2.

#### IV.10.1.2. Ускорение в двойных слоях

Когда заряженные частицы пересекают двойной слой, на котором падение напряжения равно  $\Delta V_0$ , они набирают энергию  $ze\Delta V_0$  и, как правило, образуют монохроматический пучок. Если двойной слой взрывается, в результате чего  $\Delta V$  резко возрастает на несколько порядков величины до  $\Delta V_{\max}$ , энергия частиц в пучке будет лежать в диапазоне от  $ze\Delta V_0$  до  $ze\Delta V_{\max}$ . Однако, поскольку взрыв двойного слоя вызывает сильные возмущения в окружающем пространстве, под действием целого ряда сложных вторичных эффектов часть энергии взрыва будет передаваться другим частицам. Вместе с тем очень нерегулярные и быстро флуктуирующие магнитные поля, возникшие в результате взрыва, могут накачать энергию некоторым частицам до значений, даже превышающих  $e\Delta V_{\max}$ .

Результирующее излучение будет испытывать быстрые и случайные вариации. Тем не менее, если частицы излучения окажутся запертыми в течение длительного времени в большом объеме, вариации могут сгладиться.

#### IV.10.1.3. Аннигиляция

Как будет показано в гл. IV, имеются основания предполагать, что Вселенная состоит из равных количеств вещества и антивещества. Это означает, что в некоторых областях пространства, где коинвещество и антивещество взаимодействуют между собой, должно возникать мощное излучение высоких энергий. Используя результаты лабораторных исследований по физике элементарных частиц, можно предсказать некоторые эффекты, однако следует всегда помнить, что теория амбиплазмы носит гипотетический и умозрительный характер (разд. IV.9).

В результате протон-антипротонной аннигиляции рождаются мезоны, полная энергия которых равна  $2 \cdot 10^9$  эВ, а при последующем их распаде возникает  $\gamma$ -излучение с энергиями вплоть до  $10^8$  эВ или  $10^9$  эВ. Кроме того, рождаются электрон-позитронные пары с такими же энергиями.

Затухая, излучение высоких энергий генерирует целый ряд частиц (включая фотоны) с меньшими энергиями. В плазме, окружающей излу-

чающую область, будут происходить мощные нерегулярные движения, в результате которых под действием магнитной накачки и других обуславливающих выше процессов некоторые частицы могут приобрести энергию, превосходящие энергии первичных частиц.

Полная кинетическая энергия разбегающихся галактик соответствует наибольшему возможному значению энергии во Вселенной, за исключением ее энергии покоя. Если мы хотим объяснить наличие этой энергии стандартным научным методом, т. е. не вводя новых физических законов или сверхъестественных явлений, мы должны обратиться к процессу аннигиляции. При обычном «объяснении» эта энергия приписывается процессам, происходившим, согласно гипотезе «большого взрыва», в момент образования Вселенной. Часто утверждают, что наличие такой энергии — результат начального «взрыва» сингулярности. Однако, поскольку модель Фридмана является изотропной, в ней отсутствуют градиенты давления, способные вызвать ускорение. Фактически в теории «большого взрыва» постулируется наличие высоких скоростей в начальный момент времени и не делается никаких попыток объяснить его каким-либо физическим механизмом. Это означает, что в утверждениях, согласно которым наблюдаемое красное смещение имеет космологическое происхождение, термин «космологическое» является синонимом слова «сверхъестественное».

#### IV.10.1.4. Гравитация

Сила гравитации является, без сомнения, одной из основных сил в астрофизике. Однако, поскольку электромагнитные силы примерно в  $10^{39}$  раз превосходят гравитационные, последние играют важную роль лишь в том случае, когда электромагнитные силы уравновешивают друг друга, как это имеет место в случае больших тел. В нашей Солнечной системе гравитационные силы, по-видимому, не играют существенной роли в явлениях, происходящих при высоких энергиях.

Твердое тело (метеорит, комета или астероид), падающее на Землю с параболической скоростью, обладает энергией всего лишь порядка 1 эВ на нуклон. Для Солнца эта энергия порядка  $10^3$  эВ/нуклон. При столкновениях большая часть энергии превращается в тепло или передается фотонам низких энергий, большие же значения энергии могут получиться лишь в результате сложных и малоэффективных процессов.

Падение на небесные тела диффузных объектов, таких, как газ или плазменные облака, является еще менее эффективным процессом. Плазменное облако, приближающееся к Земле, будет остановлено магнитосферой или в крайнем случае верхними слоями ионосферы. Так же остановится и неионизованное газовое облако. В результате верхняя атмосфера нагреется, начнет расширяться и остановит более удаленные облака, падающие на Землю.

Плазменные облака низкой плотности, падающие на Солнце, будут остановлены на больших расстояниях от Солнца солнечным ветром. Нейтральное газовое облако, по-видимому, остановится, как только до-

стигнет критической скорости (см. гл. V). Это произойдет, когда облако будет находиться еще далеко от фотосферы. При этом его кинетическая энергия составит всего лишь около 10 эВ/нуклон.

Однако, даже если гравитация не может служить источником высоких энергий в ближайшей области окружающего нас космического пространства, мы не можем исключить такой возможности в случае звезд, например пульсаров, обладающих огромными параболическими скоростями. Однако падающие твердые тела теряют свою энергию в основном при неупругих столкновениях, и лишь небольшая ее часть может оказаться сконцентрированной таким образом, чтобы вызвать явления высоких энергий. Диффузные облака будут, по-видимому, также останавливаться под действием процессов, аналогичных тем, которые происходят в Солнечной системе. Таким образом, можно сделать вывод, что гравитация не может служить в качестве важного источника частиц высоких энергий, хотя и не следует сбрасывать ее со счета полностью.

Было высказано предположение, что существуют так называемые «черные дыры», в которых происходит преобразование гравитационной энергии в энергию излучения. Такая возможность не исключена.

Нет сомнения, что существует процесс преобразования, объясняющий наличие огромной энергии, проявляющейся в виде излучения различных типов, огромные скорости разбегания галактик, и еще большие скорости, характерные для квазаров. Единственными достаточно мощными источниками такой энергии являются гравитация и процессы аннигиляции. Однако аргументы в пользу процессов, происходящих в черных дырах, не очень убедительны. Впрочем, то же самое можно сказать и об аргументах в пользу самой возможности существования черных дыр. Следует провести беспристрастное сравнение двух различных подходов к нашей проблеме: либо источником энергии являются черные дыры, либо процессы аннигиляции.

### IV.10.2. Магнитная накачка

Поскольку ускорение в двойных слоях обсуждалось в гл. II, а процессы аннигиляции будут рассмотрены в гл. VI, мы ограничимся здесь описанием явления «магнитной накачки».

Процесс ускорения частиц до высоких энергий под действием вариаций магнитного поля изучался многими исследователями. Первым, кто занялся этой проблемой, был Сванн, который показал, что в нарастающем магнитном поле, например в солнечном пятне, заряженные частицы могут ускориться до очень высоких энергий. Валларта назвал этот процесс «цигнотронным» (от слова *Cygnus* — Лебедь), однако после изобретения Керстом ускорителя, работающего на сходном принципе, общепринятым стал термин «бетатронное» ускорение.

Предположим, что частица движется по спирали в однородном магнитном поле и обладает энергией  $W = W_{\perp} + W_{\parallel}$  (здесь  $W_{\perp}$  — кинетическая энергия движения поперек магнитного поля  $B_0$ ,  $W_{\parallel}$  — кинетическая энергия движения вдоль поля  $B_0$ ). Если магнитное

поле увеличится до значения  $B_1$ , энергия  $W_{\perp}$  возрастет, а  $W_{\parallel}$  останется без изменения. Если затем магнитное поле уменьшится до начального значения  $B_0$ , частица затормозится и ее полная энергия станет снова равной начальной.

Однако, если частица испытывает рассеяние, например, на неоднородностях магнитного поля, в тот момент, когда поле равно  $B_1$ , часть приобретенной «поперечной» энергии может за счет рассеяния перейти в  $W_{\parallel}$ , а когда магнитное поле станет снова равным  $B_0$ , приращение «продольной» энергии сохранится. Позже это приращение может частично перейти в  $W_{\perp}$  за счет других процессов рассеяния. Значение максимальной энергии, которую может приобрести за счет последовательных процессов магнитной накачки заряженная частица, захваченная в определенной области, ограничивается лишь величиной магнитного поля. Когда энергия частицы становится слишком большой, магнитное поле оказывается не в состоянии удерживать ее. В работе [63] исследовался случай гармонического изменения магнитного поля со временем. Было показано, что при почти изотропном распределении по импульсам

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{W_{\perp}^2 W_{\parallel}}{B^2} \right) = \frac{\nu}{3} \frac{W_{\perp} (2W_{\parallel} - W_{\perp})^2}{B^2}, \quad (45)$$

где  $W_{\parallel} = p_{\parallel}^2/2m$  и  $\nu$  — частота столкновений.

Механизм магнитной накачки используется при нагреве лабораторной плазмы. Он работает и в космическом пространстве при наблюдении вполне разумных условий: магнитное поле должно изменяться со временем и должны существовать неоднородности магнитного поля, на которых происходит рассеяние частиц (процесс накачки протекает быстро, если постоянные времени рассеяния и изменения магнитного поля — величины одного порядка).

Аналогичное ускорение частиц будет происходить, если они удерживаются между двумя сближающимися магнитными зеркалами. Это хорошо известный механизм ускорения космических лучей Ферми. Сходные механизмы ускорения частиц до энергий, характерных для космических лучей, были обнаружены, например, Ван Алленом.

Если ускоряется большое число заряженных частиц, их максимальная энергия определяется из условия равнораспределения: энергия частиц в единице объема не может превышать плотность энергии флуктуаций магнитного поля или плотность кинетической энергии плазмы.

Механизм магнитной накачки дает спектр энергий частиц, согласующийся с наблюдаемым спектром, и позволяет, по-видимому, объяснить другие наблюдаемые явления [64].

#### IV.10.3. Области ускорения космических лучей

Если принять, что механизм магнитной накачки работает в космической плазме и объясняет наблюдаемое космическое излучение, то тогда нужно установить, где происходит ускорение частиц наблюдаемых кос-

мических лучей. На первый взгляд ответ на этот вопрос несложен. Поскольку их часто называют «галактическими» космическими лучами, они, очевидно, должны рождаться в нашей Галактике. Однако научные проблемы нельзя решать, придумывая для них названия, а затем утверждая, что эти названия общепринятые. Действительно, если мы проанализируем причины, по которым эти лучи были названы галактическими, то увидим, что единственная причина состоит в наличии соответствующих моделей, которые, как и многие другие астрофизические модели, могут оказаться неверными.

В последующих разделах мы обсудим другой подход к проблеме космических лучей. Поскольку этот подход основывается на явлениях, происходящих в областях пространства, не доступных для прямых измерений, он, как и все другие подходы, является умозрительным.

#### *IV.10.3.1. Гелиосферное и галактическое космическое излучение*

Известно, что в магнитосфере Земли генерируются потоки частиц высоких энергий. То же самое происходит в магнитосферах Юпитера и Сатурна. По-видимому, такой же процесс должен происходить и в гелиосфере. Легко показать, что энергии солнечного ветра достаточно не только для восполнения ожидаемых потерь вследствие поглощения в веществе гелиосферы, но и для ускорения космических лучей. Поэтому следует лишь установить максимально возможную энергию космических лучей, при которых их частицы еще удерживаются гелиосферным магнитным полем. Поскольку магнитное поле во внешней гелиосфере или транспланетном пространстве пока не измерялось, о его величине нельзя сказать что-либо с определенностью. Экстраполяцию измеренных значений магнитного поля можно проводить различными способами, поэтому получающиеся значения весьма ненадежны. Оценить величину магнитного поля тоже можно различными методами. Радиус гелиосферы  $R$  можно считать равным примерно  $10^{12}$  м. Полагая  $B = 10^{-9}$  Т, получим  $W_h = cB\rho = 3 \cdot 10^{11}$  эВ. Если же включить в рассмотрение транспланетное пространство, в котором плазма тоже может быть замагничена, то величина  $R$  станет равной  $10^{14}$  или  $10^{15}$  м и  $W_h = 3 \cdot 10^{13}$  или  $3 \cdot 10^{14}$  эВ.

Ниже мы будем использовать значение  $W_h = 10^{13 \pm 1}$  эВ для максимальной энергии частицы, которая может быть удержана гелиосферным магнитным полем (возможно, с учетом магнитного поля в транспланетном пространстве). Обычно предполагают, что межпланетное поле переходит непрерывно в однородное межзвездное поле таким образом, что космические лучи свободно проходят через переходную область. Поскольку мы всегда сомневаемся в справедливости однородных моделей, подвергнем сомнению и последнее предположение. Более того, мы будем считать, что гелиосферное магнитное поле обладает тем же свойством, что и магнитные поля Земли, Юпитера и Сатурна, а именно что оно способно удерживать такое количество ускоряемых им частиц, которое определяется их жесткостью (значением  $B\rho$ ). Исходя из этого, можно сделать предположительный вывод, что космические лучи сред-

них энергий вплоть до  $W_h = 10^{13 \pm 1}$  эВ генерируются в гелиосфере и остаются в ней захваченными. Поэтому такие лучи следует называть «гелиосферными космическими лучами». Разумеется, их нельзя путать с «солнечными космическими лучами», которые генерируются при солнечных вспышках.

Нет никаких оснований считать, что для энергий  $< W_h$  интенсивность космических лучей вне гелиосферы такая же, как у Земли, как предполагается в целом ряде умозрительных теорий. Скорее всего, вне гелиосферы она существенно меньше, возможно на несколько порядков.

Однако космические лучи с энергиями  $> W_h$  не могут быть захваченными гелиосферным магнитным полем и обязательно выходят в межзвездное пространство. Поэтому наземные измерения в случае  $W > W_h$  дают надежную информацию об интенсивности и энергетическом спектре межзвездных космических лучей, но только, конечно, в пределах области пространства, линейные размеры которой сравнимы с ларморовским радиусом частиц.

Следующий вопрос состоит в том, может ли галактическое магнитное поле захватить космические лучи высоких энергий ( $W > W_h$ ). Положим для пробы, что значения  $\rho = 10^{20}$  м и  $B = 10^{-10}$  Т являются характерными для нашей Галактики. Тогда для  $W$  мы получим значение  $3 \cdot 10^{18}$  эВ. Поскольку оно близко к предельному значению для энергии космических лучей, то вполне вероятно, что галактическое поле может в принципе захватить космические лучи с энергиями  $> W_h$ . Поэтому разумно называть космические лучи, наблюдаемые в диапазоне энергий выше  $W_h$ , галактическими космическими лучами (конечно, этот термин может в будущем измениться, если будет доказано, что эти лучи могут выходить в межгалактическое пространство). Следует заметить, что полная энергия космических лучей с  $W > W_h$  составляет незначительную часть полной энергии гелиосферных космических лучей.

#### IV.10.3.2. Происхождение галактических космических лучей

Из трех механизмов, способных вызывать явления высоких энергий, мы можем исключить процесс аннигиляции как источник ускорения космических лучей, энергия которых превосходит  $10^9$  эВ. Механизм магнитной накачки способен генерировать гелиосферные космические лучи, а также галактические космические лучи за счет ускорения в межзвездном пространстве вплоть до энергий, существенно превышающих  $W_h$ . Тем не менее мы знаем (см. разд. II.6.3 – II.6.5), что в двойных слоях также может выделяться огромная энергия. Известно, что такой процесс реализуется во время солнечных вспышек, в результате чего генерируются космические лучи с энергиями вплоть до  $10^9 - 10^{10}$  эВ. В разд. III.4.4 мы рассматривали механизм, действующий в двойных источниках радиоизлучения, который способен генерировать космические лучи. Вопрос о том, работает ли этот механизм при энергиях вплоть до  $10^{19}$  эВ, остается открытым.

# ПРОИСХОЖДЕНИЕ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

## V.1. КАК МОЖНО РЕКОНСТРУИРОВАТЬ ПРОШЛЫЕ ЭПОХИ?

В предыдущих главах мы показали, как резко изменились наши взгляды на свойства космической плазмы после проведения первых прямых измерений в космосе. Мы также отмечали, что эти изменения коснулись не только тех областей, где непосредственно проводились измерения. Поведение плазмы в магнитосферах в основном совпадает с поведением лабораторной плазмы, и, скорее всего, свойства плазмы в удаленных областях и в более ранние эпохи аналогичны свойствам магнитосферной плазмы в настоящее время. Поэтому условия в более ранние эпохи можно получить, экстраполируя современные условия в магнитосферах (включая гелиосферу) и в верхних ионосферах.

Предполагая, что Солнце и Солнечная система образовались из пылевого облака, и уделяя особое внимание плазменным эффектам [1], можно получить модель эволюции Солнечной системы, которая согласуется с моделью, построенной исключительно на основании данных наблюдений современной Солнечной системы [2]. Таким способом можно, по-видимому, построить согласованную картину эволюционной цепи, начиная с образования и эволюции межзвездных облаков и до современного состояния Солнечной системы. Конечно, эту картину следует пока считать предварительной, поскольку многие звенья в эволюционной цепи еще неясны и требуются новые экспериментальные и теоретические данные.

## V.2. ИСТОЧНИКИ ИНФОРМАЦИИ

До совсем недавнего времени единственный метод, позволяющий исследовать раннюю стадию развития Солнечной системы, соответствующую периоду формирования небесных тел вблизи Солнца, состоял в получении информации о процессе эволюции из анализа данных наблюдений химических и особенно динамических свойств этих тел в настоящее время. Космические исследования дали нам много информации такого рода, комбинируя которую с нашими знаниями о плазме, полученными из лабораторных исследований, удалось реконструировать состояние Солнечной системы в период ее формирования [2]. (См. также работы [3 – 5], где описаны другие попытки воссоздания процесса образования Солнечной системы, в основном без учета плазменных эффектов.)

Было показано, что в период формирования и первых шагов эволюции Солнечной системы плазменные эффекты играли определяющую

роль, однако их важность уменьшилась после образования планетезималей. Более поздние эволюционные этапы определялись законами небесной механики. В настоящее время магнитогидродинамические эффекты практически не влияют на движение больших небесных тел (планет, спутников и астероидов), однако они существенны для комет и, конечно, определяют состояние магнитосфер (включая гелиосферу) и ионосфер.

В течение последних нескольких лет с развитием инфракрасной и радиоастрономии существенно обогатились наши знания, касающиеся межзвездных облаков. Поскольку Солнце и Солнечная система образовались, по-видимому, из такого облака (предположительно из темного облака), эти знания весьма ценны. Известно, что такие облака состоят из пылевой плазмы, поэтому свойства пылевых *плазменных облаков* играли определяющую роль на ранних стадиях формирования Солнца и Солнечной системы (разд. IV.7 и IV.8).

### V.3. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЯ МАГНИТОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЫ

При оценке различных подходов к проблеме эволюции мы должны основываться на материале, изложенном в гл. I — IV.

Исследования магнитосфер и лабораторной плазмы позволили нам лучше понять свойства диффузных сред. В настоящее время можно сказать, что мы в состоянии (до некоторой степени) интерпретировать наблюдаемые явления в широком диапазоне параметров (см. рис. I.3) и предсказывать свойства плазмы на основании данных, относящихся к другим значениям параметров. Из этого следует, что мы можем теперь переносить наши знания, полученные при изучении магнитосфер и лабораторной плазмы, на такие явления, как, например, эволюция межзвездных облаков.

Обычное гидродинамическое описание состояния космической среды с помощью моделей магнитного поля способно объяснить лишь некоторые из наблюдаемых явлений (см. рис. I.4). Необходимо перевести такие модели на язык электрических токов, чтобы разобраться в целом ряде явлений, играющих важную роль в процессе эволюции космической среды.

#### V.3.1. Области активной и пассивной плазмы

В космическом пространстве имеются области активной плазмы и области пассивной плазмы (разд. II.9). Кратко обрисуем их свойства.

а) В *активных областях* имеются токи, текущие вдоль магнитных силовых линий и вдоль нейтральных линий. Эти токи приводят к нагреву, передаче энергии и нередко к образованию двойных слоев, в которых может происходить ускорение частиц до очень высоких энергий.

б) В *пассивных областях* токи, текущие вдоль силовых линий, малы.

В пассивных областях могут распространяться волны и частицы высоких энергий, однако и те и другие получают свою энергию в активных областях. Хотя обычно активные области бывают малы по сравнению с пассивными, они играют определяющую роль в процессе эволюции космических облаков.

Свойства этих двух типов областей настолько различны, что при исследовании ни в коем случае нельзя использовать некие средние свойства. Поскольку активные области по размерам, как правило, существенно меньше пассивных, усреднение будет означать пренебрежение активными областями. Например, при глобальном усреднении свойств ионосферы выпадут из рассмотрения узкие зоны полярных сияний, которые играют определяющую роль во многих ионосферных явлениях. Аналогичным образом при усреднении свойств удаленных объектов можно также упустить из виду очень важные явления. При обработке фотографий методом усиления контрастности (см., например, рис. II.9) была обнаружена мелкомасштабная структура облаков, которые раньше считались однородными. Если окажется, что темные облака обладают такой же структурой (что вполне вероятно, если исходить из наших представлений о магнитосферной плазме), это существенно повлияет на понимание свойств таких облаков и возможного процесса их превращения в планетные системы.

### V.3.2. Токи, возбуждаемые сторонними источниками

Свойства космического облака, в котором протекает электрический ток, определяются не только параметрами самого облака (такими, как плотность, температура, намагниченность, состояние ионизации), но часто существенно зависят от всего контура, по которому течет ток. Следовательно, если ротор магнитного поля в облаке отличен от нуля (т. е. в нем протекает электрический ток), свойства такого облака могут зависеть от процессов, происходящих очень далеко от него. Другими словами, очень важно учитывать граничные условия. Если ток в облаке является частью общей галактической токовой системы (как это, по-видимому, нередко бывает в действительности), то может оказаться, что облако будет получать энергию от э. д. с., расположенной в другой части Галактики, а его эволюция будет определяться условиями, существующими в далекой от него области.

Рассмотрим облако, в котором течет ток, замыкающийся с помощью цепи, размеры которой значительно превышают размеры облака. (Этот ток мог в свое время вызвать начало образования самого облака.) Цепь состоит из э. д. с.  $V_b$  (которая создается, например, за счет преобразования кинетической энергии в энергию цепи), индуктивности  $L$  и сопротивления  $R_0$  (см. рис. II.16, где разрядная трубка соответствует облаку). Предположим, что  $L$  и  $R_0$  достаточно велики, чтобы поддерживать ток  $I$  в цепи постоянным. Если в какой-либо части такой цепи, например в облаке, потери энергии возрастут, можно ожидать, что плазма будет охлаждаться. Однако из лабораторных экспериментов мы знаем,

что происходит как раз обратное. Поскольку охлаждение плазмы приводит к увеличению электрического поля  $E$ , поддерживающего ток, потери энергии в облаке *увеличатся* так сильно, что электронная температура возрастет. Это необходимо для компенсации возрастающих потерь энергии, которая восполняется за счет всей цепи (в основном за счет энергии магнитного поля, запасенной в индуктивности  $L$ ).

Существует широко распространенное мнение, что *магнитное поле может быть вытолкнуто из облака* за счет уменьшения его проводимости, если в процессе эволюции температура облака падает, а его плотность возрастает. Если проанализировать это утверждение, используя язык токов, то станет очевидно, что магнитное поле не может быть «вытолкнуто» до тех пор, пока не изменится картина распределения тока. Далее, поскольку ток течет в основном в активных плазменных областях, картина распределения тока может остаться неизменной, даже если проводимость в пассивных областях изменится. Следовательно, возможность «выталкивания» магнитного поля определяется лишь условиями в активных областях.

Если применить приведенный выше анализ к нашей проблеме, то можно сделать вывод, что «выталкивание» из облака магнитного поля, черпающего свою энергию извне, является очень сложным процессом, который можно понять только в том случае, когда известны условия во всей цепи. Цепь может поддерживать намагниченность облака до тех пор, пока энергия всей цепи не диссипируется в нем. Если же гравитационные силы начинают преобладать в процессе сжатия облака, энергия цепи (а следовательно, и энергия магнитного поля) может, по-видимому, поддерживаться за счет гравитационной энергии. Таким образом, облако будет оставаться намагниченным. Следовательно, для теоретического доказательства утверждения, что магнитное поле «вытолкнуто», необходимо:

а) Изобразить всю цепь, по которой течет ток. Как правило, это очень трудно сделать, поскольку она может занимать значительную часть нашей Галактики.

б) Показать, что цепь не получает достаточного количества энергии для поддержания тока.

Таким образом, распространенное категорическое утверждение, что при изучении процесса эволюции межзвездного облака электромагнитными эффектами можно пренебречь, далеко не всегда справедливо.

Часто проводят аналогию с Землей: поскольку авроральные токи текут в верхней атмосфере, в более плотных ее слоях магнитогидродинамическими эффектами можно пренебречь. Такой вывод ошибочен. Во-первых, авроральные токи все же генерируют магнитные поля во всей атмосфере (а также внутри Земли), однако величина этих токов недостаточно большая, чтобы магнитные поля играли существенную роль. Далее, земная атмосфера находится в таком устойчивом стационарном состоянии, что даже ураганы не обладают достаточной энергией, чтобы вызвать заметные магнитогидродинамические эффекты.

В противоположность этому в сжимающемся темном облаке выделяется гравитационная энергия порядка нескольких электрон-вольт на атом, а на более поздних стадиях эволюции и на несколько порядков больше.

#### **V.4. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЭФФЕКТЫ, СПОСОБСТВУЮЩИЕ ОБРАЗОВАНИЮ И СЖАТИЮ ОБЛАКОВ**

Обычно считают, что электромагнитные силы, действующие в космических облаках, лишь препятствуют их гравитационному сжатию. Такой вывод основывается на предположении, что намагниченность облаков является довольно однородной. Это предположение, как и другие предположения об однородности, следует пересмотреть. Мы знаем, что электромагнитные силы могут не только способствовать сжатию, но даже вызывать его (разд. IV.8.3 и IV.8.4). Поэтому вполне разумно предположение, что межгалактическое облако образуется из разреженной межзвездной среды под действием пинч-эффекта [1]. Дальнейшая эволюция облака определяется как гравитацией, так и электромагнитными силами даже на последних ее стадиях, когда гравитационные силы преобладают. В облаке могут существовать небольшие области активной плазмы, в которых сосредоточен основной энергообмен. В этих областях гравитационная и кинетическая энергии могут преобразовываться в электромагнитную (разд. III.1.3), в результате чего процессы в них будут самоподдерживающимися.

#### **V.5. ХИМИЧЕСКАЯ ДИФФЕРЕНЦИАЦИЯ В ПЕРВИЧНОМ ОБЛАКЕ**

В космической среде наблюдается тенденция к *химической дифференциации*. Конденсация пылевых частиц, состоящих из наименее летучих компонент среды, приводит к такой химической дифференциации. На частицы пыли, размеры которых превышают определенное значение, электромагнитные силы практически не влияют, поэтому их движение отличается от движения ионизированной диффузной среды. В разд. IV.3 было показано, что существуют плазменные процессы, вызывающие химическую дифференциацию в космической плазме; из них наиболее важными являются следующие:

- 1) электрические токи, вызывающие образование областей с различными химическими составами в зависимости от значений потенциалов ионизации;

- 2) диффузионные процессы, происходящие в зоне перехода между областями горячей и холодной плазмы;

- 3) процесс разделения по массам, приводящий к разделению изотопов.

Как было отмечено в разд. II.4, на фотографиях межзвездных облаков, обработанных методом повышения контрастности, хорошо видна

неоднородная структура этих облаков, содержащих светлые области, которые, по-видимому, соответствуют электрическим токам. Эти токи создают тонкие области активной плазмы, которые переплетаются с более обширными и, как правило, очень холодными областями. В принципе эта структура космической плазмы совпадает со структурой, полученной при изучении магнитосфер. В разд. V.6 будет показано, что в межзвездных облаках, по-видимому, текут сильные галактические токи. Это означает, что в них могут действовать два из перечисленных выше механизмов химической дифференциации: механизм разделения по потенциалам ионизации и диффузия на границе раздела между горячей и холодной областями. Следовательно, разумно предположить, что облако такого типа обладает ячеистой структурой, хотя, может быть, и отличающейся от рассматриваемой в разд. II.10 и VI.1.3.1.

Если предположить, что первичное облако, из которого возникла наша Солнечная система, было темным пылевым облаком, то можно прийти к заключению, что в период образования Солнца последнее, вероятно, было окружено большим количеством мелких облачков различного химического состава. После ионизации этих облачков их падение на Солнце прекращается, так как этому препятствуют магнитные поля. Тем не менее достаточно крупные частицы пыли, на которые магнитные поля действуют слабо, будут падать на Солнце (разд. IV.7.2).

Таким образом, мы получаем следующую модель самой ранней стадии эволюции Солнечной системы из межзвездного облака, согласно которой Солнце

1) уже возникло за счет аккреции газа (в основном водорода) на небольшое тяжелое ядро, состоящее из частиц пыли облака (аналогичное заключение, но по другим мотивам, было сделано в работе [6]);

2) намагничено за счет такого же механизма, который генерирует магнитные поля во всех небесных телах (разд. IV.5.2);

3) не обязательно обладает очень высокой температурой и фактически может быть очень большой звездой, в которой происходит выгорание дейтерия; она окружена зоной чрезвычайно низкой плотности, поскольку большая часть вещества выпала на Солнце в процессе его формирования.

Более удаленные области первичного облака еще не успели упасть на Солнце из-за противодействия со стороны магнитного поля. Однако из этих областей продолжается выпадение частиц пыли, подобных тем, которые ранее образовали солнечное ядро.

Когда температура окружающей плазмы снизится, степень ионизации мелких облачков, из которых состоит первичное облако, уменьшится. Следовательно, магнитное поле перестанет препятствовать их падению на Солнце. В результате в область, окружающую Солнце, начнет проникать нейтральный газ, и ее химический состав будет изменяться различным образом, в зависимости от того, из какого облачка этот газ поступает.

Описанная выше картина эволюции следует из наблюдаемых свойств межзвездных облаков и данных, полученных при изучении

свойств магнитосферной плазмы. К сожалению, адекватность такой картины невозможно проверить прямыми измерениями (которые следовало проводить несколько миллиардов лет тому назад!). Однако, как мы увидим в разд. V.7, такая модель приводит к *поясной структуре Солнечной системы, сходной со структурой, наблюдаемой в настоящее время*. Это является серьезным аргументом в пользу нашей интерпретации.

Приведенный выше довод в пользу нашей интерпретации можно сформулировать иначе: модель ранней стадии эволюции Солнечной системы, полученная нами из изучения процессов эволюции межзвездных облаков, согласуется с моделью, построенной ранее на основании анализа современного состояния Солнечной системы. В обоих случаях исследование основывается на новом подходе к проблемам космической физики, в котором определяющую роль играют плазменные эффекты и эффекты неоднородности. Этот подход следует из данных наблюдений и не содержит гипотез *ad hoc*, т. е. гипотез, высказанных специально для объяснения тех или иных конкретных явлений. Этот вопрос подробно обсуждается в работе [1].

## V.6. ВНУТРЕННИЕ ТОКИ

Внутри Земли имеется токовая система, создающая земное магнитное поле. Механизм возникновения этой токовой системы называется механизмом «самовозбуждающегося динамо» (разд. IV.5.2 и IV.5.3).

Известно, что аналогичный механизм самовозбуждающегося динамо действует внутри Юпитера и Сатурна.

Условия существования механизма самовозбуждающегося динамо (произвольного вида) состоят в том, что тело должно вращаться и в его ядре должно выделяться достаточное количество энергии. По-видимому, такие условия выполняются внутри протозвездных облаков. Они вращаются, а при их сжатии высвобождается энергия порядка нескольких электрон-вольт на атом. Это намного (на несколько порядков) больше той энергии, которая может в принципе выделяться внутри планет.

Поэтому если внутри планет действует механизм динамо, он тем более должен существовать и внутри протозвездных облаков.

## V.7. ПОЯСНАЯ СТРУКТУРА И КРИТИЧЕСКАЯ СКОРОСТЬ

Со времен Лапласа считалось, что Солнечная система сформировалась из однородного диска, возникшего на промежуточной стадии эволюции. Однако доказательств справедливости такой точки зрения никогда не существовало. Более того, если изобразить на графике размазанное распределение плотности в планетной и спутниковых системах, то мы увидим, что плотность изменяется существенным образом. Действительно, имеются промежуточные области, в которых плот-

ность составляет менее  $10^{-6}$  от соответствующих значений в наиболее плотных областях, причем в последних плотность также может изменяться на несколько порядков величины (рис. V.1 и V.2). Таким образом, мы еще раз убеждаемся в несостоятельности однородных моделей. *Чрезвычайно большие вариации плотности массы, которая сконцентрирована на различных расстояниях от центрального тела, являются исключительно важным фактором, который необходимо учитывать при попытках объяснения эволюции Солнечной системы.*

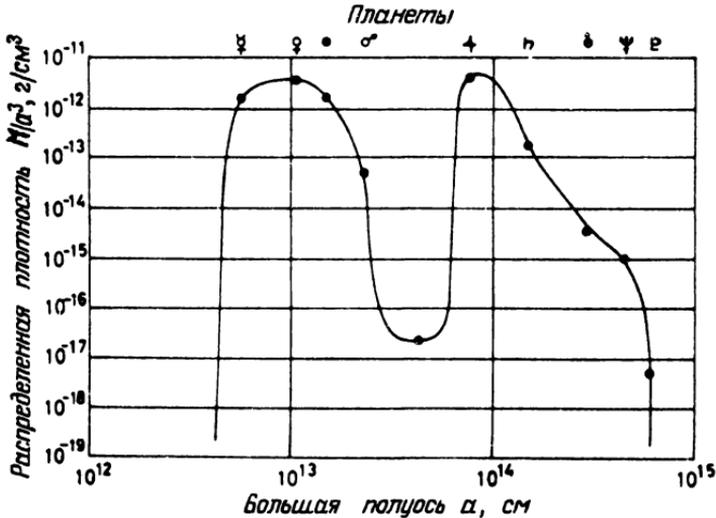


Рис. V.1. Зависимость распределенной плотности от размера большой полуоси орбиты для планет.

Поскольку вещество, из которого образуются вторичные тела (спутники или планеты), должно заимствоваться у вещества, падающего на центральное тело, вполне разумно изобразить на чертеже эти вторичные тела с их гравитационными потенциалами в зависимости от скоростей, которые они приобретают, падая с бесконечности. Когда это было впервые сделано в работе [7], то стало ясно, что Солнечная система обладает ярко выраженной *поясной структурой* (рис. V.3), которая должна играть важную роль в теории происхождения Солнечной системы (разумеется, если она не объясняется случайным совпадением).

Природа поясной структуры Солнечной системы вполне понятна, если существует механизм, который останавливает вещество, падающее с больших расстояний, в том месте, где его скорость достигает определенного критического значения  $v_c$ . Из приведенной на рис. V.3 диаграммы поясной структуры очевидно, что эти критические значения  $v_c$  для большинства обычных химических элементов соответствуют соотношению

$$\frac{mv_c^2}{2} = eV_{\text{ion}} \quad (1)$$

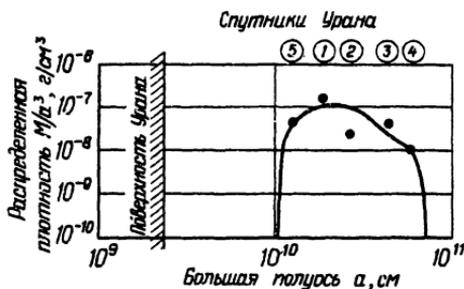
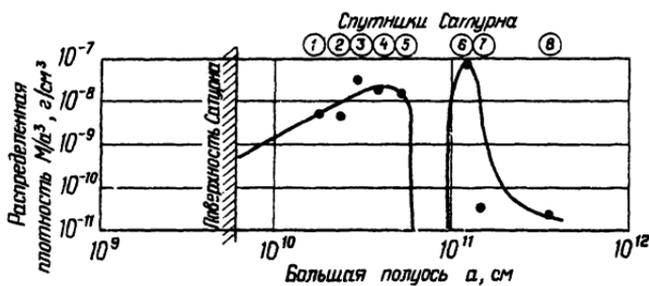
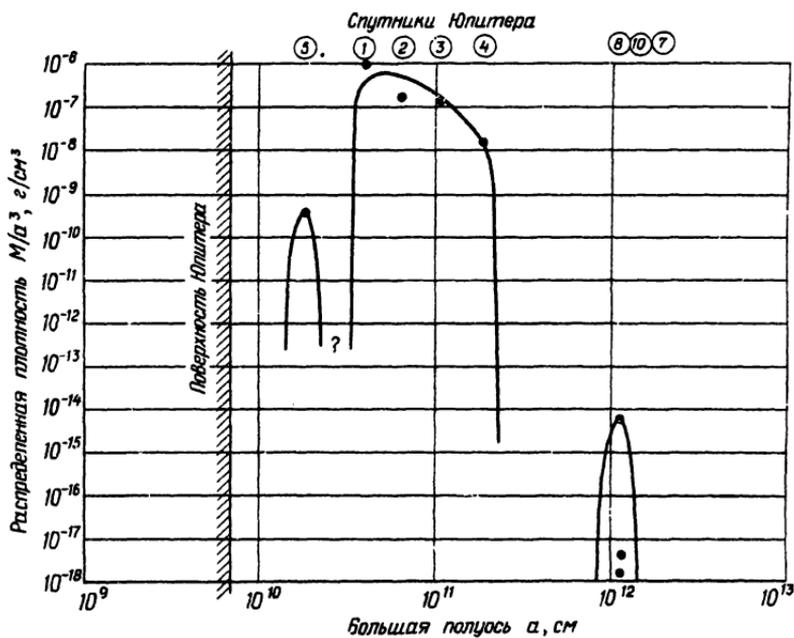


Рис. V.2. Зависимость распределенной плотности от размера большой полуоси орбиты для спутников Юпитера, Сатурна и Урана с прямым движением.

← Масса центрального тела

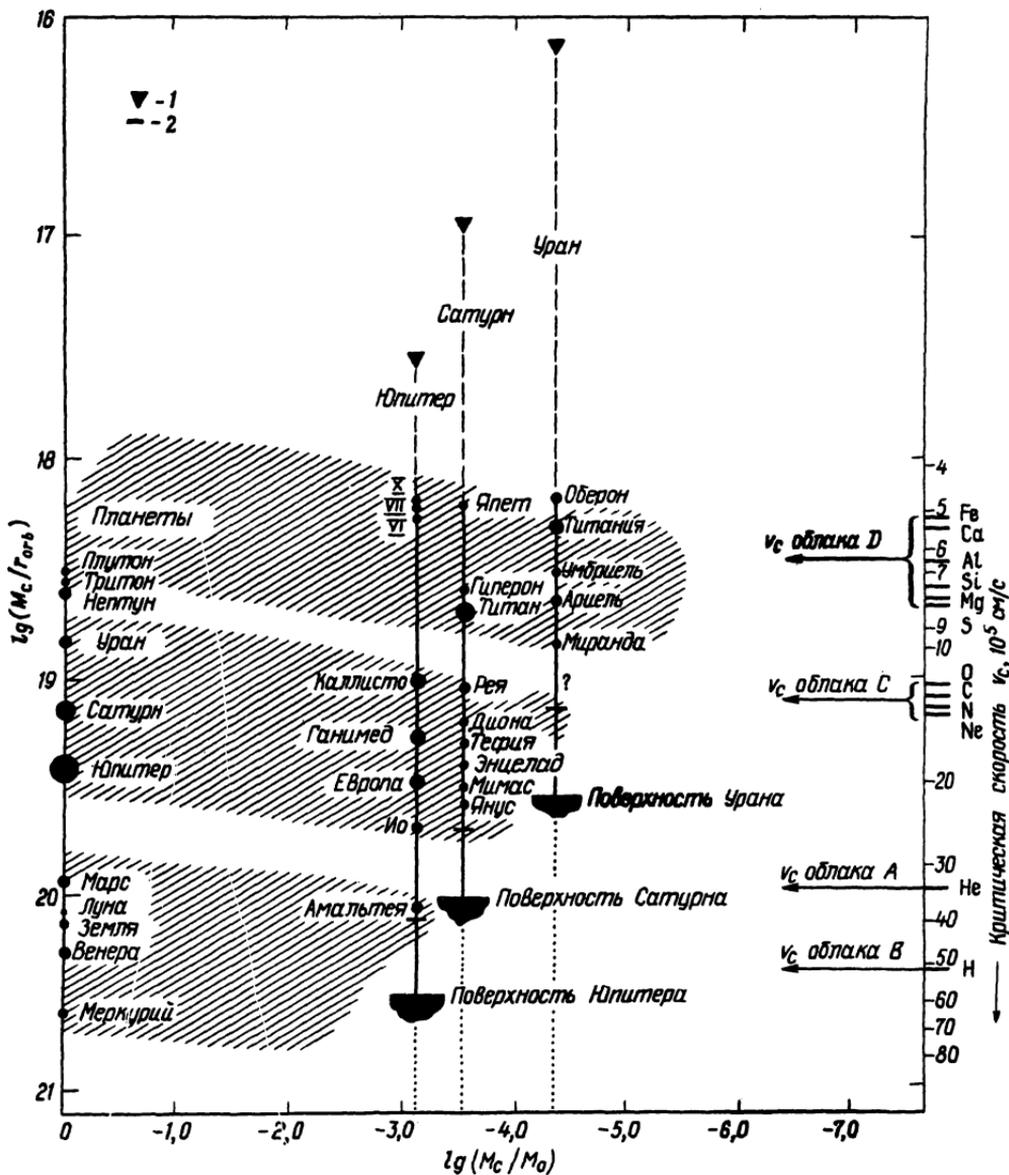


Рис. V.3. Зависимость гравитационного потенциала  $T = M_c/r_{orb}$  от массы центрального тела для планетной и спутниковых систем. На оси ординат справа отложена критическая скорость  $v_c$ , что позволяет сравнивать значения  $T$  для планет и спутников со значениями  $v_c$  для химических элементов, распространенных в Солнечной системе. 1 – точки Лагранжа (внешняя граница области образования спутников); 2 – положение планеты или спутника на синхронной орбите.

( $m$  — масса атома,  $V_{\text{ion}}$  — потенциал ионизации). Естественное объяснение заключается в том, что падающий нейтральный газ ионизируется, когда он в процессе падения набирает энергию, необходимую для ионизации.

Однако когда попытались развить теорию ионизации падающего газа (например, для случая падения сквозь тонкий слой плазмы, покоящийся в магнитном поле центрального тела) на основании классической теории, то оказалось, что при скорости газа, равной  $v_c$ , сильного эффекта ионизации не должно наблюдаться. Поскольку доверие к классической теории уже было подорвано, с развитием техники термоядерных исследований началось экспериментальное изучение этой проблемы. Эксперименты показали, что, как *только скорость неионизованного газа относительно замагниченной плазмы превышает значение  $v_c$ , газ и плазма начинают очень сильно взаимодействовать*. Это явление получило название эффекта «критической скорости» и было подвергнуто тщательному экспериментальному и теоретическому исследованиям (разд. IV.6).

*Эффект критической скорости является единственным физическим явлением, открытым после того, как его существование было предсказано теорией образования Солнечной системы.* Позднее, исходя из концепции поясной структуры, Де предсказал наличие кольца у Урана, которое было обнаружено через несколько лет [8]. Это единственный случай, когда с помощью теории образования Солнечной системы удалось предсказать существенно новую черту этой системы.

Существование кольца Юпитера не было явно предсказано, однако оно попало в один из поясов на диаграмме поясной структуры, которая была построена за несколько десятков лет до открытия этого кольца.

Кроме того, после построения диаграммы поясной структуры были открыты следующие новые небесные тела: спутники Сатурна Янус и 1979 SJ, спутник Урана Миранда и один спутник Юпитера. Оказалось, что все *регулярные спутники попадают в соответствующие пояса диаграммы*.

Было также обнаружено большое число новых астероидов. Эти астероиды не изменили старую диаграмму масса — расстояние для пояса астероидов. Их существование не противоречит полученным ранее результатам, но и не дает ничего нового в поддержку концепции поясной структуры.

Поясная структура была первоначально обнаружена при изучении строения современной Солнечной системы. Но ее можно получить и при исследовании межзвездных облаков (разд. V.), основываясь на данных об общих свойствах их космической плазмы. Эти данные получены как с помощью прямых измерений в магнитосфере, так и с помощью лабораторных исследований. Поэтому мы вправе заключить, что наличие поясной структуры не вызвано случайным совпадением. *Ее существование и важное значение очень хорошо обоснованы.*

Наличие поясной структуры является одним из нескольких фактов, иллюстрирующих важность плазменных явлений на ранних стадиях формирования Солнечной системы.

## V.8. СОЛНЕЧНАЯ СИСТЕМА В ПРОЦЕССЕ ФОРМИРОВАНИЯ

В этом разделе мы кратко обрисовем эволюцию Солнечной системы в процессе ее образования, а затем обсудим вопрос о том, с помощью каких наблюдений можно проверить наши выводы.

### V.8.1. Межзвездные облака

На основании общих свойств космической среды, которые существенно проявились за последние несколько лет магнитосферных исследований, можно высказать следующие соображения относительно свойств межзвездных облаков:

1) Как было показано в разд. IV.8, межзвездные облака *могут возникнуть под действием электромагнитных сил*, вызывающих сжатие («пинч-эффект») в областях с низкой начальной плотностью. После образования облака его плотность может возрасти под действием того же эффекта до критического значения Джинса, при котором начинается коллапс либо всего облака, либо небольшой его части. Следовательно, для возникновения гравитационного коллапса не обязательно наличие «спускового механизма» (такого, как ударные волны и т. д.). Это, конечно, не исключает необходимости «спускового механизма» в некоторых случаях, но и тогда этот механизм следует трактовать, исходя из развитой здесь новой точки зрения.

2) *Химическая дифференциация* является вполне обычным процессом в космических облаках, и этот процесс может быть существенным для объяснения наблюдаемого химического разделения элементов в Солнечной системе (разд. V.5). Безусловно, химической дифференциации противодействуют эффекты турбулентности. Однако, как было уже отмечено ранее, нет никаких указаний на то, что процесс турбулентного перемешивания играет существенную роль в магнитосферах (разд. IV.4). Изменение параметров плазмы в широком диапазоне и уширение спектральных линий могут быть связаны с плазменными волнами и волокнистыми структурами. По-видимому, нет никаких определенных доказательств, что крупномасштабная турбулентность играет важную роль в каких-либо областях космической плазмы (разд. IV.4).

3) *Волокнистая структура*. Из теории и данных наблюдений следует, что волокнистая структура является характерной чертой космических облаков (разд. II.4). А поскольку токнесущие волокна и поверхности играют исключительно важную роль в магнитосферах, следует ожидать, что их роль в межзвездных облаках тоже значительна. Последнее утверждение опровергает тот вывод, что эволюцию космического облака можно исследовать без учета электромагнитных эффектов. Это, по-видимому, согласуется с выводами, к которым пришли многие исследователи различными путями [9].

4) Поскольку под действием тока образуются *области, в которых плотность значительно превышает среднее значение* (разд. II.4.4), кон-

денсация частиц пыли и их рост могут происходить значительно быстрее (на несколько порядков величины), чем получается в расчетах, использующих средние значения плотности плазмы.

### V.8.2. Образование протозвезд

Согласно общепринятой точке зрения, протозвезды образуются в результате гравитационного коллапса. Вероятно, эта точка зрения до некоторой степени справедлива. Однако существуют по крайней мере *два эффекта*, которые могут настолько способствовать сжатию, что даже для очень малых облаков (с массой порядка одной солнечной или даже менее) коллапс станет возможным. Наличие этих эффектов делает необязательным существование спускового механизма и фрагментацию коллапсирующего облака (хотя оно и не исключает такие возможности).

1) Первым является эффект *электромагнитного сжатия*, который обсуждался в разд. V.4. За счет этого эффекта плотность облака, даже очень небольшого, может возрасти до значения, необходимого для начала гравитационного коллапса.

2) Второй эффект должен проявляться *в облаке, состоящем из пылевой плазмы* [10]. Если пыль содержит частицы, размеры которых достаточно велики, чтобы их движение не определялось электромагнитными силами, эти частицы вследствие аккреции образуют пылевой шар, который затем становится тем ядром, относительно которого газобразные компоненты облака могут сколлапсировать. (Подробности см. в работах [10, 1].)

Оба этих эффекта не обязательно вызывают немедленный коллапс всего облака. Если плотность тока в облаке неоднородная, как это обычно бывает в космической плазме, облако может разбиться на несколько небольших облачков, которые будут сжиматься вплоть до достижения предела Джинса. В результате облако окажется состоящим из ряда «стеллезималей», которые позднее образуют протозвезду с помощью механизма, аналогичного действующему при аккреции планетезималей в планеты. Подобным же образом возникают центры конденсации в том случае, когда пылевое облако неоднородно (как это обычно бывает) и гравитационный потенциал внутри него имеет несколько локальных максимумов. И в этом случае могут сформироваться стеллезимали, которые позднее образуют протозвезду. Таким образом, фрагментация облака может произойти не только *в процессе сжатия*, но и *до него*. Этот механизм, подробно исследованный Хоредтом в работе [10], приводит к одинаковым процессам образования звезд, планет и спутников. (Следует заметить, что одна из трудностей, которая беспокоит Хоредта, а именно низкая плотность межзвездных облаков, на самом деле отпадает, если учесть неоднородности, создаваемые электрическими токами.)

### V.8.3. Образование планет и спутников

Из теоретических соображений следует, что после возникновения протозвезды описанным выше способом вокруг нее образуется почти пустая область, отделяющая ее от остатков «первичного облака», из которого эта протозвезда сформировалась. Как отмечалось ранее, определяющими на этой стадии являются электромагнитные эффекты. Существуют два общих подхода к проблеме образования планет и спутников: магнитогидродинамический и лапласовский.

А) *Магнитогидродинамическая модель*. Если допустить, что часть «первичного облака», из которого образовалась протозвезда, оказывается «подвешенной» за счет электромагнитных эффектов, действующих вне пустой области вокруг протозвезды, а вещество облака в течение длительного времени выпадает на протозвезду, то планеты могут сформироваться в результате длительного полустационарного процесса. Этот процесс подробно исследовался в работе [2]. Почти такой же процесс происходит и вблизи планет, в результате чего образуются спутники. Основные стадии этого процесса следующие:

1) Химически дифференцированные малые облака нейтрального газа и пыли падают на центральное тело через область, в которой плотность газа (плазмы) невелика (порядка плотности в солнечной короне). Когда скорость газа достигает критического значения, газ ионизируется и останавливается. Этот процесс объясняет поясную структуру Солнечной системы.

2) Происходит передача момента количества движения от центрального тела плазме через посредство токовой системы, аналогичной той, которая имеется в магнитосфере (см. разд. III.3). В результате угловая скорость центрального тела уменьшается, а плазма получает момент количества движения, который затем распределяется между вторичными телами.

3) Происходит конденсация вещества из плазмы, находящейся в состоянии частичной коротации, и из падающих частиц, захваченных плазмой, в результате чего образуются *планетезимали*. Последние в результате аккреции превращаются во вторичные тела. Их массы медленно нарастают в течение всего периода выпадения вещества первичного облака. После истощения (или диссипации) всей массы облака рост вторичных тел прекращается. Они достигают своего современного состояния. Этот процесс иллюстрируется на рис. V.4.

Перечисленная выше последовательность процессов приводит к образованию планет, вращающихся вокруг Солнца, а позднее она повторяется в более мелком масштабе, в результате чего образуются (регулярные) спутники.

Б) Другой, немагнитогидродинамической моделью образования Солнечной системы является модель Лапласа. Существуют два типа подобных моделей: модели коллапса Койпера — Камерона [11] и планетезимальная модель. В работе [9] приводятся серьезные возражения против модели коллапса (см. также [2]).

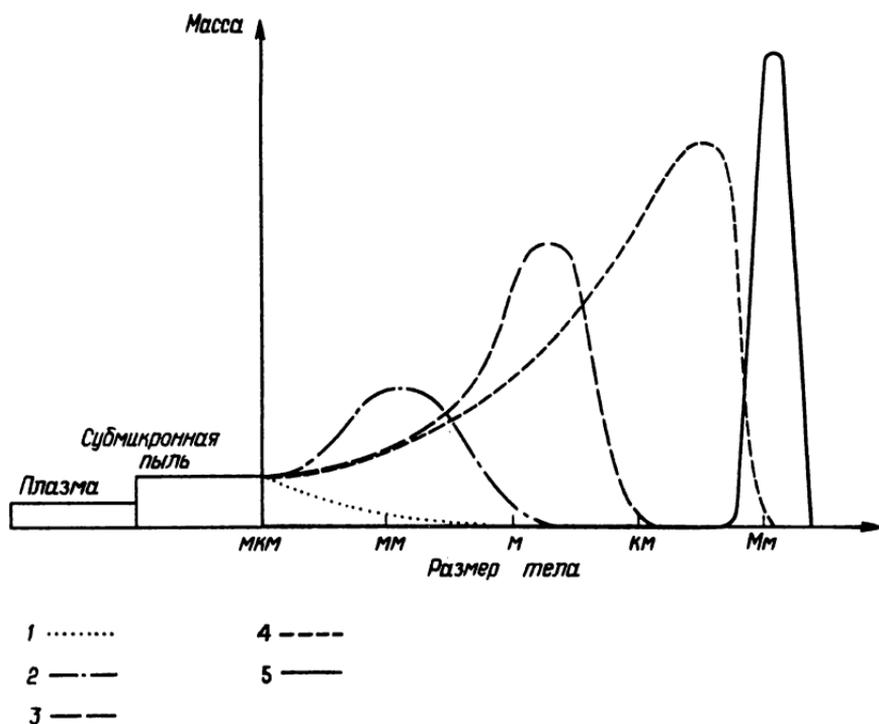


Рис. V.4. Эволюция при аккреции планетезималей. Падающие частицы захватываются плазмой, находящейся в состоянии частичной коротации, и аккумулируются в планетезимали. Последние аккрецируют во вторичные тела, которые растут и превращаются в планеты и астероиды. 1 — очень раннее состояние, 2 — раннее состояние, 3 — промежуточное состояние, 4 — «астероидное» состояние, 5 — современное состояние.

В теориях лапласовского типа, включая планетезимальную, считается, что по крайней мере вся масса современных планет была сосредоточена в туманности, которая располагалась на месте Солнечной системы. Одно из следствий такого предположения состоит в том, что плотность дисперсной среды (до возникновения планетезималей) была чрезвычайно высокой, т. е. средняя длина свободного пробега была малой, а эволюция происходила быстро. В результате мог образоваться плоский диск, например типа диска Голдрайха — Уорда [12]. Если подобные теории являются всеобъемлющими, то они должны быть в состоянии объяснить происхождение вторичных тел, в частности астероидов. При этом, очевидно, возникает трудность при объяснении больших значений эксцентриситетов и наклонов орбит. (В магнитогидродинамической модели это объяснение несложно, так как астероиды в этой модели являются промежуточным продуктом в процессе формирования планет и спутников.)

#### V.8.4. Наблюдение планетных систем, находящихся в процессе формирования

В настоящее время делаются попытки отождествления некоторых наблюдаемых астрономических объектов с планетными системами, находящимися в процессе формирования. Если они окажутся успешными, мы получим важную информацию, которая поможет нам лучше понять этот процесс. В частности, мы сможем сделать выбор из двух подходов — лапласовского и магнитогидродинамического.

С наблюдательной точки зрения модель Лапласа (в планетезимальном варианте) и магнитогидродинамическая модель весьма сходны на поздней стадии эволюции. В обоих случаях мы имеем большое количество частиц пыли, движущихся в основном по кеплеровским орбитам вокруг звезды, которая, по-видимому, находится в состоянии до главной последовательности и частично завуалирована пылью.

На ранних стадиях эволюции эти два подхода дают существенно различные картины. Модель Лапласа широко известна по многочисленным работам, содержащим ее описание, так же как известны попытки подтвердить ее с помощью наблюдений. Магнитогидродинамическая модель не получила до сих пор такой широкой известности. Она характеризуется следующими основными чертами:

1) Имеется звезда в состоянии до главной последовательности, окруженная «первичным облаком» (с размерами порядка  $10^{13}$  м или более), состоящим из вещества в ионизованном состоянии и пыли типа более или менее пылевой области III. Плазма вблизи звезды находится в «хромосферном» состоянии: она в высокой степени неоднородна и пронизана волокнами типа протуберанцев, по которым текут быстро изменяющиеся токи. Спектр излучения должен иметь «хромосферный» вид.

2) Имеются пылевые диски, состоящие из планетезималей, вращающихся по кеплеровским орбитам с главными полуосями от  $10^{10}$  до  $10^{13}$  м (если масса звезды порядка солнечной), и эти диски сосуществуют с плазмой.

3) Одновременно происходит быстрая аккреция вещества. Оно остается неионизованным, пока не достигает критической скорости (равной 52 км/с для водорода). После ионизации вещество испускает излучение со спектром, характерным для областей III. Скорость падения вещества должна быть в пределах от 50 до нескольких сотен км/с, проявляясь в виде соответствующего доплеровского сдвига. Максимальная скорость определяется параболической скоростью для данной звезды.

4) В период образования планет, а, может быть, в основном до начала этого периода, звезда должна испускать излучение типа солнечного ветра, возникающее главным образом в полярных областях.

Звезды типа Т Тельца являются возможными кандидатами на роль планетных систем, находящихся в процессе формирования, если исходить из магнитогидродинамической модели.

## В.9. ГЕТЕГОНИЯ И «ГЕТЕГОННЫЙ ПРИНЦИП»

Исследование проблемы происхождения и эволюции Солнечной системы является хорошо определенной и важной областью науки, но не имеющей до сих пор общепринятого названия. В свое время был предложен [2] термин «гетегония» (от греческого слова *εταίρος* — компаньон), поскольку основной вопрос этой области знаний состоит в том, каким образом вокруг небесных тел (например, Солнца, а позднее планет) возникают их *компаньоны* (планеты и спутники). Если считать, что темные межзвездные облака являются источниками протозвезд, то и эта область исследований будет разделом гетегонии.

Существует большое число статей, в которых делаются попытки объяснить происхождение планет земной группы, но при этом не считается, что происхождение планет-гигантов и спутников должно объясняться аналогичным образом. В других же работах объясняются частные свойства спутниковых систем, но не упоминается, что планетные системы обладают подобными же свойствами, которые, однако, не поддаются объяснению с помощью построенных в этих работах теорий.

Как было показано в целом ряде работ [7, 13–17, 2]. строения планетной системы и спутниковых систем настолько сходны в главных чертах, что для их объяснения следует создать единую теорию («гетегонный принцип»). Этот принцип фактически впервые высказал Галилей в 1610 г. после открытия спутников Юпитера, заявивший, что спутники образуют миниатюрную планетную систему.

## КОСМОЛОГИЯ

## VI.1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ КОСМОЛОГИИ

## VI.1.1. Исторический обзор

В предыдущих главах мы показали, как сильно изменились наши представления о космической плазме после развития лабораторных плазменных исследований и локальных измерений в магнитосферах. Теперь мы проанализируем, к каким последствиям (если они имеются) приводят эти изменения в космологии. В конечном итоге нас интересуют вопросы, является ли Вселенная однородной или неоднородной, ограниченной или неограниченной. Вопросы остались теми же, что и 400 лет тому назад, хотя современная Вселенная стала примерно в  $10^{15}$  раз больше.

Космология всегда была и по определению всегда останется пограничной областью между естественными науками и философией (или, как полагают некоторые, религией). Во времена Птолемея считалось, что весь мир делится хрустальной сферой на земной «подлунный» мир, размеры которого составляют всего лишь несколько радиусов Земли, и божественный, расположенный за сферой неподвижных звезд. Наука, например Аристотелева, занималась объяснением лишь земного мира, но не касалась небесного, божественного.

Работы Коперника и Галилея вдрызги разбили прекрасные хрустальные сферы, а Ньютон показал, что законы механики, управляющие поведением тел в лаборатории и его саду, применимы и к «небесной механике», которая определяет движение тел Солнечной системы.

Это привело к космологической картине, согласно которой наша Вселенная бесконечна и подчиняется «универсальному» закону Ньютона. Пространство, конечно, считалось евклидовым. Предполагалось, что Вселенная обладает крупномасштабной однородной структурой, несмотря на тот факт, что области, доступные наблюдению, были сильно неоднородными.

Хотя и не было никакой необходимости для предположения о крупномасштабной однородности Вселенной, ученые обычно придерживались такого предположения, как наиболее простого, пока не появилось убедительное свидетельство его несправедливости. Парадокс Ольберса продемонстрировал, что модель однородной бесконечной евклидовой Вселенной неприемлема. Парадокс может быть разрешен, если отбросить либо предположение об однородности, либо об евклидовости. Шарлье выбрал первую возможность и постулировал, что Вселенная обладает иерархической структурой. Он показал, что парадокс Ольберса разрешается, если считать, что средняя плотность изменяется по

закону

$$\rho = kR^\alpha, \text{ где } \alpha < -2 \quad (1)$$

(здесь  $k$  — постоянная и  $R$  — линейный размер).

Вторая возможность связана с геометрией Минковского, на базе которой строится общая теория относительности Эйнштейна. Из этой геометрии следует, что Вселенная может быть ограниченной. Леметр воспользовался моделью Фридмана (одной из нескольких релятивистских моделей) для построения космологии, свободной от парадокса Ольберса. Более того, с помощью этой модели можно было объяснить хаббловское разбегание галактик. Одним из страстных приверженцев этой модели (вернее, ее слегка модифицированного варианта) был Гамов, который считал, что с ее помощью можно объяснить все основные свойства Вселенной: не только хаббловское расширение, но и синтез всех химических элементов, космическое фоновое излучение и т. д. Эта «космология большого взрыва» стала к настоящему времени общепринятой в основном благодаря энергичному характеру самого Гамова.

Скорость хаббловского расширения определяется по красному смещению в спектрах галактик. Предполагая, что красное смещение обуславливается только продольной скоростью галактики  $v$  на расстоянии  $R$ , можно определить параметр Хаббла:

$$H_0 = \frac{v}{R} (\text{с}^{-1}). \quad (2)$$

Обычно параметр Хаббла выражается в км/(Мпс·с), так что, например, значение  $H_0 = 100$  км/(Мпс·с) означает, что  $H_0 = (10^{10} \text{ лет})^{-1} = 3,3 \cdot 10^{-18} \text{ с}^{-1}$ .

Поскольку, согласно теории «большого взрыва», параметр Хаббла должен оставаться неизменным (в пространстве), его обычно называют *постоянной Хаббла*. Такое предположение вносит элемент предвзятости, и поэтому мы не будем пользоваться этим термином. Далее, для области пространства, участвующей в хаббловском расширении, мы будем использовать старое название *Метагалактика*. Согласно теории «большого взрыва», эта область и есть вся *Вселенная*, т. е. на языке сторонников этой теории слово «Вселенная» является синонимом *Метагалактики*. Характерное время Хаббла

$$t_H = H_0^{-1} \quad (3)$$

обычно называют «возрастом Вселенной», а расстояние Хаббла

$$R_H = cH_0^{-1} \quad (4)$$

— ее характерным размером.

В своей основе модель Фридмана является однородной четырехмерной моделью. Таким образом, она принадлежит к категории моделей; отличающихся от трехмерных неоднородных моделей, рассмотренных нами в предыдущих главах.

Это, конечно, не означает, что указанные модели резко противоречат друг другу. Модель Фридмана допускает существование неоднородных

областей, если они «локальные» и не нарушают крупномасштабной однородности. С другой стороны, наблюдения, относящиеся к очень большим расстояниям, еще не настолько точны, чтобы можно было бы установить применимость неоднородных моделей даже в удаленных областях, описываемых моделью Фридмана. Следовательно, наша цель состоит до некоторой степени в установлении границы между «локальными» и «крупномасштабными» явлениями. В определенном смысле ситуация напоминает прежнее деление явлений на земные и небесные, которые считались настолько различными, что к ним применялись существенно различные законы.

В этой главе мы исследуем вопрос о том, до каких расстояний неоднородное евклидово описание предпочтительнее описания соответствующей теории «большого взрыва». Если окажется, что евклидово описание справедливо вплоть до расстояния Хаббла  $R_H$ , это будет означать, что наблюдаемая Вселенная *гораздо больше*, чем считается в теории «большого взрыва». Вопросы о том, является ли Вселенная замкнутой и подчиняется ли она общерелятивистской модели, остаются при этом открытыми (разд. VI.6).

Леметр был не только компетентным специалистом в области общей теории относительности, но и выдающимся деятелем католической церкви. Для него самого его работа «*L'Atome primitif*» была искренним синтезом общей теории относительности и томистической догмы творения *ex nihilo* «из ничего» (хотя он никогда и не высказывал этого в явном виде в своих научных статьях).

Для многих ученых идея теории «большого взрыва» привлекательна по тем же мотивам, поскольку она является синтезом астрофизики и догмы творения *ex nihilo* (см., например, [1]). Этим же, по-видимому, можно объяснить ту фанатичную нетерпимость, которую проявляют сторонники этой теории по отношению к тем, кто пытается усомниться в ее научной обоснованности.

### VI.1.2. Гипотеза «большого взрыва»

В шестидесятых годах происходила космологическая дискуссия по вопросу о том, какая из двух гипотез — гипотеза «большого взрыва» или гипотеза «непрерывного возникновения» — является более предпочтительной. Дискуссия показала, что против последней имеются решающие возражения, а возражения против первой не были высказаны достаточно убедительно. В результате после дискуссии основные усилия оказались сосредоточенными на развитии модели «большого взрыва», так что к настоящему времени эта модель стала в широких научных кругах считаться окончательным решением космологической проблемы.

В последнее время практически не было никакой дискуссии относительно справедливости основной гипотезы «большого взрыва». Из-за ее очевидных преимуществ по сравнению с моделью «непрерывного возникновения» считается, что она должна быть верной. В таких авторитетных изложениях современных представлений об эволюции Вселен-

ной, как в книгах [2, 3], полагается само собой разумеющимся не принимать во внимание другие точки зрения; такого же взгляда придерживается большинство физиков, работающих над космологическими проблемами. Наблюдения, как правило, интерпретируются на языке теории «большого взрыва», а большинство наблюдений, не согласующихся с этой теорией, либо объясняются различными искусственными (*ad hoc*) гипотезами, либо вообще не рассматриваются. К последним, например, относится давнишнее наблюдение Амбарцумяном [4], а позднее Арпом [5] выбросов из галактик, свидетельствующих о том, что существует «неизвестная сила», противодействующая гравитации. Вопрос об источниках энергии квазаров и некоторых других объектов, выделяющих огромные количества энергии, настолько важен, что любая последовательная космологическая теория должна давать на него ответ. Теория «большого взрыва» пока не способна на это.

Далее, в работе [6] было показано, что наблюдения согласуются с «иерархической космологией» типа космологии Шарлье.

Несмотря на мнение подавляющего большинства ученых, занятых космологическими проблемами, мы считаем, что в настоящее время целесообразно начать серьезную дискуссию по поводу справедливости теории «большого взрыва». Это, в частности, связано с тем фактом, что, как было показано в предыдущих главах, локальные измерения в космической плазме настолько изменили наши представления о космической физике, что эти изменения могут затронуть и космологию.

Критику теории «большого взрыва» нельзя рассматривать как попытку возрождения гипотезы «непрерывного возникновения». Тем не менее нужно отметить, что защитники этой гипотезы (особенно группа Бербиджа) выдвинули несколько возражений против теории «большого взрыва», которые заслуживают гораздо большего к себе внимания.

Если окажется, что гипотеза «большого взрыва» неверна, то образуется «космологический вакуум», который обязательно должен быть заполнен каким-либо другим подходом. Одной из кандидатур на эту роль является модель Клейна, которая основывается на дираковской симметрии между веществом и антивеществом. Этот подход заслуживает внимания только в том случае, если наша Метагалактика симметрична относительно вещества — антивещества. Как будет показано в разд. VI.2, сейчас не существует абсолютно убедительного доказательства такой симметрии, однако имеется целый ряд веских аргументов в пользу ее существования.

В этой главе мы приведем все возражения против теории «большого взрыва». Будет также показано, что имеются серьезные аргументы в пользу «симметричного» подхода к космологии. Однако следует подчеркнуть, что критика теории «большого взрыва» не связана с аргументами в пользу «симметричного» подхода.

### VI.1.3. Однородные и неоднородные модели

Как было показано в предыдущих главах, локальные измерения в плазме Солнечной системы продемонстрировали, что ее свойства коренным образом отличаются от тех свойств, которые ей приписывали

ранее (см. рис. 1.2). В астрофизике и космологии до сих пор преобладает старый подход к физике плазмы. Такая ситуация, очевидно, весьма неустойчива: невозможно серьезно утверждать, что космическая плазма в областях, не доступных измерениям с помощью космических аппаратов, по своим свойствам существенно отличается от плазмы в тех областях, где может быть использована точная диагностика (см. рис. 1.3). Поэтому мы уверены, что в ближайшем будущем произойдет коренной пересмотр не только астрофизических теорий, относящихся к более удаленным частям космического пространства, но и космологических теорий [7].

В настоящее время большое число астрофизических задач, связанных с плазмой, исследуется с помощью «однородных» моделей (предполагается, что свойства плазмы либо одинаковы внутри большого объема, либо меняются в пространстве и времени непрерывным образом). Как правило, основной мотив использования таких моделей состоит в том, что они позволяют аналитически исследовать ту или иную проблему. Однако следует заметить, что такой аргумент несостоятелен, поскольку, как сказал в свое время Френель [8], «природа безразлична к математическим трудностям».

#### *VI.1.3.1. Ячеистая структура пространства*

С точки зрения космологии наиболее важным открытием последних лет является, по-видимому, открытие *ячеистой структуры пространства*. Как было показано ранее, во всех областях пространства, доступных локальным измерениям, были обнаружены «стенки ячеек», т. е. поверхностные электрические токи, разделяющие пространство на отдельные области с различными намагниченностями, температурами, плотностями и т. д. В разд. II.10 были приведены аргументы в пользу того, что и вне областей, доступных космическим аппаратам, пространство должно обладать сходной ячеистой структурой. Если это так, то тогда вполне возможно, что половина космических объектов состоит из коиновещества, а другая половина — из антивещества (разд. II.10 и IV.9). Космологические следствия из этой возможности будут обсуждены в разд. VI.2.

#### *VI.1.3.2. Распределение массы во Вселенной*

Таким образом, следует заключить, что космическая плазма является существенно неоднородной. Если же обратиться к конденсированным небесным телам, то и здесь мы обнаружим полное отсутствие однородности.

Распределение звезд в пространстве невозможно описать однородной моделью. Достаточно взглянуть на ночное небо, чтобы убедиться в этом. Для невооруженного глаза галактика в Андромеде представляет из себя диффузную туманность, однако фотографии свидетельствуют о том, что она обладает сложной спиральной структурой. Однородная модель этой галактики была правомерной лишь до тех пор, пока ее невозможно было наблюдать в телескоп.

То же самое относится и к другим небесным объектам. Реальное распределение массы не является однородным. Оно больше согласуется с «иерархической» моделью Вокулера, являющейся существенно неоднородной моделью, в которой галактики образуют группы, или скопления, входящие в свою очередь в состав сверхскоплений. Средняя плотность таких образований (радиусом  $R$ ) подчиняется эмпирическому закону (рис. VI.1) [6]

$$\rho_V = 6 \cdot 10^{14} R^{-1.7} \text{ кг/м}^3, \quad (5)$$

справедливному вплоть до  $R \sim 10^{24} \text{ м} \approx 0,01 R_H$ .

Когда Вокулер предложил свою модель, было высказано возражение, что статистическая обработка результатов наблюдений, относящихся к различным галактикам, не дает существенного отклонения от однородности [9]. Однако обработка новыми методами (учет двухточечной и трехточечной корреляций) полностью подтвердила иерархическую структуру. Обзор этих результатов содержится в [10]. Согласно этой работе, показатель степени в выражении (5) должен равняться  $-1,75$ . В работах [11, 12] приводятся дополнительные данные в пользу иерархического распределения плотности (в виде непрерывно нарастающих скоплений), соответствующего модели Вокулера. В этих работах получено значение  $-1,77$  для показателя степени. Приведенные выше результаты наблюдений не дают никакой определенной информации об областях пространства, находящихся вне сферы радиусом порядка  $0,01 R_H$ , не опровергая и не доказывая наличия в них однородности. Однако в недавней работе [13] было ясно продемонстрировано существование иерархической структуры в этих областях. Полученные результаты справедливы до расстояний, соответствующих красному смещению\*  $z = 0,05$ .

Результаты радиоастрономических наблюдений также приводят в качестве доказательства однородности Метагалактики на больших расстояниях. Эти результаты получены в предположении, что все квазары находятся на «космологических расстояниях». Поскольку справедливость такого предположения сомнительна (разд. VI.3.7 и VI.4), и этот аргумент в пользу теории «большого взрыва» остается под вопросом.

Закон Вокулера получен эмпирическим путем, и его теоретический вывод отсутствует. Если говорить о теоретических законах, то его следует сравнить с критерием Шарлье  $\alpha < -2$  в соотношении (1), получающимся из условия сходимости крупномасштабных структур в рамках евклидовой геометрии, и с пределом Лапласа — Шварцшильда

$$\rho_{sch} = \frac{3c^2}{8\pi G} R^{-2} = 1,6 \cdot 10^{26} R^{-2}. \quad (6)$$

Значение  $-1,7$  или  $-1,77$  показателя степени в формуле Вокулера слегка превышает значение  $-2$  в выражении (6). Это означает, что, двигаясь

\* Связь между красным смещением  $z = \Delta\lambda/\lambda$  и величиной  $\beta = v/c$  дается соотношением  $1 + z = (1 + \beta)^{1/2}/(1 - \beta)^{1/2}$ .

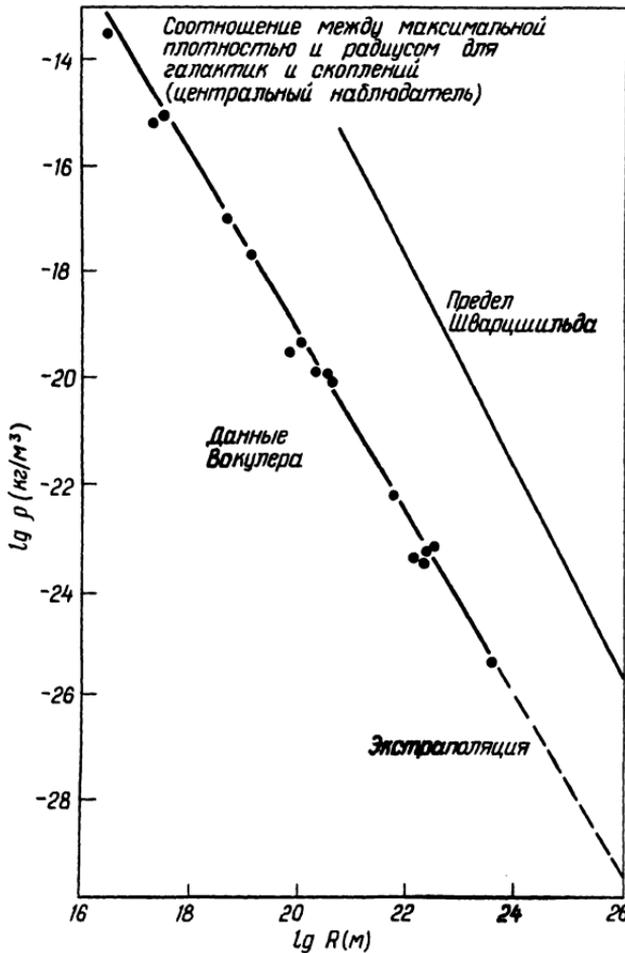


Рис. VI.1. Корреляция между средней плотностью и радиусами сфер, центры которых расположены либо внутри галактик, либо внутри скоплений галактик [6]. Кривая экстраполируется вплоть до радиуса Хаббла. Для сравнения приведена кривая, соответствующая пределу Шварцшильда. Поскольку кривая, полученная из данных наблюдений, расположена гораздо ниже кривой Шварцшильда, вполне законно использовать евклидову геометрию при рассмотрении не только галактик и скоплений галактик, но и всей Метагалактики.

наружу, мы будем приближаться к пределу Шварцшильда, но очень медленно. Действительно, если размер структуры увеличивается в  $10^6$  раз (например, от размера галактики до размера Метагалактики), мы приближаемся лишь в  $10^{6(2-1,7)} = 63$  или же в  $10^{6(2-1,77)} = 24$  раза.

Таким образом, следует сделать вывод, что результаты наблюдений, свидетельствующие в пользу предположения об однородной плотности, далеко не убедительны. Более того, имеются веские указания на спра-

ведливость иерархического распределения плотности с той точностью, которую обеспечивают результаты имеющихся наблюдений. Если экстраполировать закон Вокулера на один порядок величины (или, возможно, на два порядка), то можно прийти к заключению, что наша Метагалактика является членом иерархической системы Шарлье, настоящим «сверх-сверхскоплением» (рис. VI.1).

### VI.1.3.3. Масса Метагалактики и предел Шварцшильда

Следуя работе [14], введем параметр

$$\Omega = \frac{8\pi G}{3H_0^2} \rho_M, \quad (7)$$

где  $H_0$  – параметр Хаббла,  $G$  – гравитационная постоянная и  $\Omega$  – отношение средней плотности  $\rho_M$  к критической плотности  $\rho_{sch}$ . Если окажется, что  $\Omega \geq 1$ , то будет трудно избежать признания теории «большого взрыва». Приверженцы этой теории затратили много энергии в поисках «недостающей массы», однако до сих пор их попытки ни к чему не привели. В работе [14] проводится критический анализ выбора наиболее разумного значения параметра  $\Omega$ . Там показано, что *верхнее предельное* значение  $\Omega$  равно 0,06. Поскольку это значение получено в предположении однородной плотности, при использовании распределения массы согласно закону Вокулера оно окажется намного меньше. Так, экстраполируя формулу (5), получим, что  $\Omega < 10^{-3}$  (или еще меньше, если для показателя степени взять значение  $-1,77$ ). Это означает, что размер Метагалактики, который был меньше в более ранние эпохи (что следует из хаббловского расширения), мог составлять  $10^{-3}$  от ее современного размера, а плотность вещества Метагалактики при этом не превосходила предел Шварцшильда.

## VI.1.4. Хаббловское расширение Метагалактики

### VI.1.4.1. Параметр Хаббла

За неимением другой возможности мы считаем, что наблюдаемые красные смещения в спектрах галактик связаны с эффектом Доплера (продольным и поперечным). Если пренебречь поперечным доплеровским смещением, что не очевидно, если не придерживаться теории «большого взрыва», то можно сделать вывод, что в настоящее время наша Метагалактика находится в состоянии постоянного расширения. В течение длительного времени наиболее точные измерения параметра Хаббла свидетельствовали о его постоянстве (в пространстве). Вера в его постоянство стала настолько сильной, что его окрестили «постоянной Хаббла». Со временем стали накапливаться данные против его постоянства, так что сейчас к этим данным следует относиться серьезно. Например, в работе [14] значение параметра Хаббла меняется от

$2,5 \cdot 10^{-18} \text{ с}^{-1}$  (70 км/с·Мпс) до  $3,5 \cdot 10^{-18} \text{ с}^{-1}$  (110 км/с·Мпс)\* для галактик, наблюдаемых по различным направлениям, в то время как в [16, 17] приводится значение  $1,8 \cdot 10^{-18} \text{ с}^{-1}$  (55 км/с·Мпс). Ссылки смотри в работах [16, 17].

Приведенные выше данные, полученные весьма авторитетными наблюдателями, свидетельствуют о том, насколько неопределенными являются результаты наблюдений, на основании которых потом делаются далеко идущие космологические выводы.

Если параметр Хаббла не постоянен, то тогда линейная экстраполяция назад по времени не приведет к заключению, что в некоторый момент времени все вещество Метагалактики (отождествленной со Вселенной) было сконцентрировано в очень малом объеме. Вместо этого получится, что Метагалактика в указанный момент времени должна обладать минимальным размером, который может оказаться достаточно большим. Это показано на рис. VI.2, б, построенном в работе [18] на основании данных табл. 5 из статьи [16]. Для реконструкции движения в прошлом каждой отдельной галактики использовалась линейная формула

$$R = R_n - vt, \quad (8)$$

в которой значения скоростей разлета  $v$  определялись по измеренным красным смещениям [16] скоплений галактик, значения расстояний  $R_n$  оценивались, а время отсчитывалось от настоящего момента. Линейная экстраполяция правомерна лишь в том случае, когда движения скоплений не возмущаются гравитационными эффектами. Это условие, по-видимому, выполняется. На рис. VI.2, б изображена зависимость  $|R|$  от времени.

Рисунок показывает, что скопления находились на минимальном расстоянии друг от друга при  $t$ , равном примерно  $-t_n$ , однако получающийся минимальный размер составляет приблизительно 13% от современного. Другие группы галактик или скопления дают аналогичные результаты.

Конечно, измеренные расстояния содержат существенные неопределенности, так что можно утверждать, что полученные результаты связаны с погрешностями измерений. Поэтому следует сказать, что данная диаграмма *не опровергает* теорию «большого взрыва», согласно которой все тела во Вселенной должны сойтись в одну точку при  $t = -t_n$ , но и не дает решающего аргумента в ее пользу. Диаграмма Хаббла для тех же скоплений приведена на рис. VI.2, а.

Если эти результаты типичны для всех измерений, относящихся к соотношению между расстоянием и красным смещением (а похоже, что это действительно так, судя по целому ряду других таких же исследований), то единственный вывод, который можно сделать на основании данных наблюдений, состоит в том, что при  $t \approx -t_n$  размер нашей Ме-

\* Мы считаем, что сейчас, когда простые американцы собираются отказаться от «футов» и «унций», людям, занимающимся космологией, следует отказаться от единицы км/(с·Мпс).

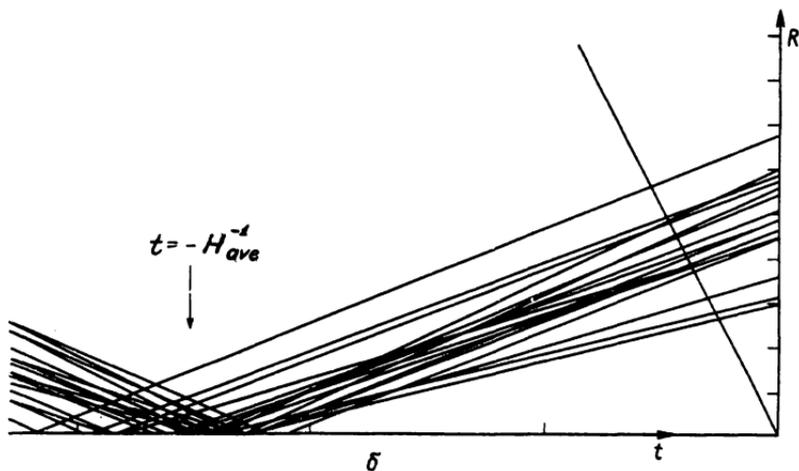
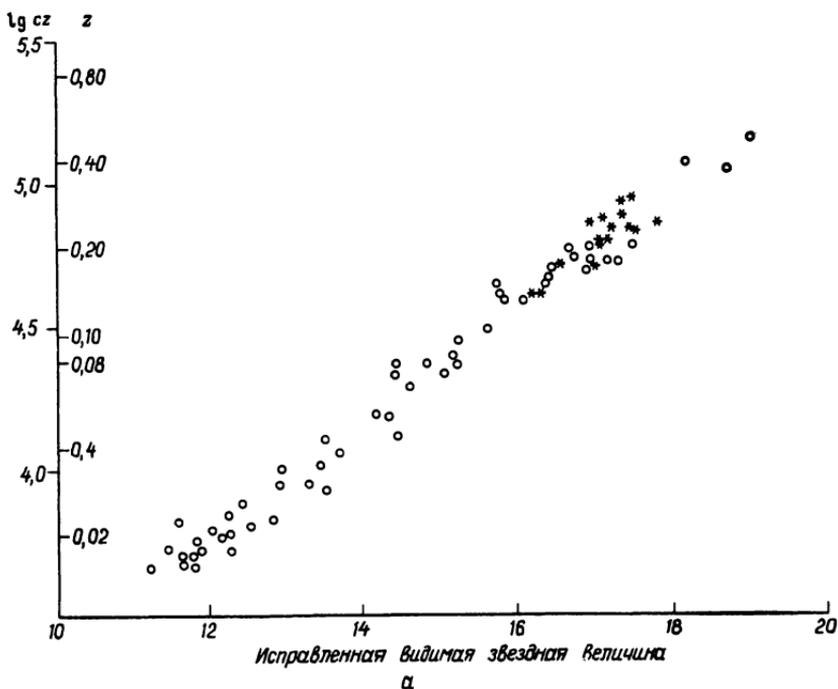


Рис. VI.2. а – Обычная диаграмма Хаббла. Если данные наблюдений представлять в логарифмическом масштабе, то может создаться впечатление, что  $H_0 = \text{const}$  (в пределах ошибок измерений), что подтверждает теорию «большого взрыва». б – Диаграмма в линейном масштабе. Те же данные наблюдений создают другое впечатление, если из каждого наблюдения находить скорость разбегания  $V$  и расстояние  $R_n$ , делать линейную экстраполяцию  $R = R_n + Vt$ , а затем откладывать на графике значение  $|R|$  [18]. Данные наблюдений не дают оснований для заключения, что размеры нашей Метагалактики когда-либо составляли меньше 10% от ее современных размеров.

та галактики составлял приблизительно 10% от ее современного размера. Если к тому же учесть большие вариации параметра Хаббла, обнаруженные Вокулером и другими, то минимальный размер окажется существенно больше.

Это означает, что до тех пор, пока не будет строго доказано, что параметр Хаббла действительно постоянен, *нельзя считать, что хаббловское расширение Метагалактики свидетельствует в пользу гипотезы «большого взрыва»*. Конечно, всегда можно ввести специальные (*ad hoc*) предположения для объяснения любых расхождений между теорией и действительностью. Однако подобно тому, как в свое время космология Птолемея становилась все менее правдоподобной с увеличением количества необходимых эпициклов, так и правдоподобность теории «большого взрыва» уменьшается с каждым новым специальным (*ad hoc*) предположением.

#### VI.1.4.2. Евклидова модель эволюции Метагалактики

Если параметр  $\Omega \geq 1$ , то современную Метагалактику необходимо исследовать с помощью общей теории относительности, и гипотеза «большого взрыва» тогда, по-видимому, неизбежна. Если же считать, согласно работе [14], что  $\Omega < 0,06$ , то можно сделать вывод, что наша Метагалактика весьма далека от замкнутой, и тогда евклидово описание ее современного состояния является разумным первым приближением. Из иерархической структуры следует, что  $\Omega < 10^{-3}$  (разд. VI.1.3.3), т. е. нет никакого смысла использовать общую теорию относительности, за исключением нахождения малых поправок. Если положить, что размер и масса ядра галактики равны соответственно  $10^{20}$  м и  $10^{40}$  кг, то окажется, что ее плотность меньше предела Шварцшильда в  $10^6$  раз. Если бы в формуле Вокулера (5) показатель степени равнялся не  $-1,7$  (или  $-1,77$ ), а  $-2$ , то Метагалактика была бы не ближе к пределу Шварцшильда, чем наша Галактика. Меньшее (по абсолютной величине) значение показателя степени приблизит Метагалактику к пределу Шварцшильда, но всего лишь на один или два порядка величины (чего все равно недостаточно). Таким образом, теоретические исследования галактик не обязательно должны основываться на общей теории относительности. То же самое относится и к исследованиям скоплений галактик и сверхскоплений. *С наблюдательной точки зрения нет необходимости в переходе от евклидова к релятивистскому описанию для сверхскоплений и «сверх-сверхскопления», т. е. Метагалактики.*

Цель настоящей главы состоит в попытке реконструировать состояние, которое мы будем называть *прото-Метагалактикой*, т. е. состояние нашей Метагалактики при  $t \approx -t_H$ , когда ее размер был порядка  $0,1 R_H$  (разд. VI.5). При таком размере прото-Метагалактика была в 10 раз ближе к пределу Шварцшильда, чем в настоящее время. Но даже при  $\Omega < 0,06$  ее плотность была по-прежнему меньше предельной. В качестве первого приближения можно использовать евклидово описание, вводя существенные релятивистские поправки. Если же  $\Omega \leq 10^{-3}$ , как это сле-

дует из разд. VI.1.3.3, то прото-Метагалактика будет настолько далека от предела Шварцшильда, что поправки общей теории относительности составят всего лишь примерно 1%.

Таким образом, эволюция Метагалактики из состояния прото-Метагалактики до ее современного состояния может быть описана в рамках евклидовой геометрии; в первом приближении поправками общей теории относительности можно пренебречь. (Конечно, формализм специальной теории относительности остается необходимым.)

Ни один наблюдатель, если, конечно, он не находится под большим влиянием теории «большого взрыва», не изменит общего подхода к результатам наблюдений, относящихся к расстояниям от  $10^{20}$  м до  $10^{26}$  м.

Трактовка данных наблюдений в рамках евклидовой геометрии даст картину, которая гораздо прозрачней и более независима от какой-либо теории, чем картина, получаемая с использованием четырехмерной общей теории относительности. Поэтому в качестве стартовой площадки для начала космологической дискуссии следует использовать весь наблюдательный материал.

## VI.2. СОСУЩЕСТВОВАНИЕ ВЕЩЕСТВА И АНТИВЕЩЕСТВА

### VI.2.1. Симметрия вещество — антивещество

Открытия позитрона и антипротона привели к мысли, что антивещество может в принципе существовать во Вселенной. Поскольку спектры излучения небесных тел, состоящих из антивещества и обычного вещества (коиновещества), неразличимы, с расстояния невозможно определить, из чего состоит то или иное тело (разд. IV.9). Доказательства за или против существования антивещества могут быть лишь косвенными [19, 20].

Оскар Клейн [21] предложил космологию, часто называемую *симметричной космологией*, согласно которой во Вселенной содержатся одинаковые количества коиновещества и антивещества (рис. VI.3.). Хотя такая симметрия и притягательна для большинства ученых, у них всегда возникает естественное сопротивление обсуждению теории, приводящей к обязательному пересмотру целого ряда современных теорий космической физики, включая космологию. На самом же деле все современные теоретические построения были унаследованы нами от тех времен, когда считалось общепринятым, что все вещество во Вселенной является обычным. Поскольку в настоящее время очевидно, что Вселенная в принципе может быть симметричной, мы обязаны пересмотреть с этой точки зрения все разделы астрофизики, чтобы увидеть, к каким последствиям приводит такая симметрия.

### VI.2.2. Ячейки вещества и антивещества

Мы знаем, что ячеистая структура характерна для тех областей пространства, которые доступны для космических аппаратов. Однако, по-

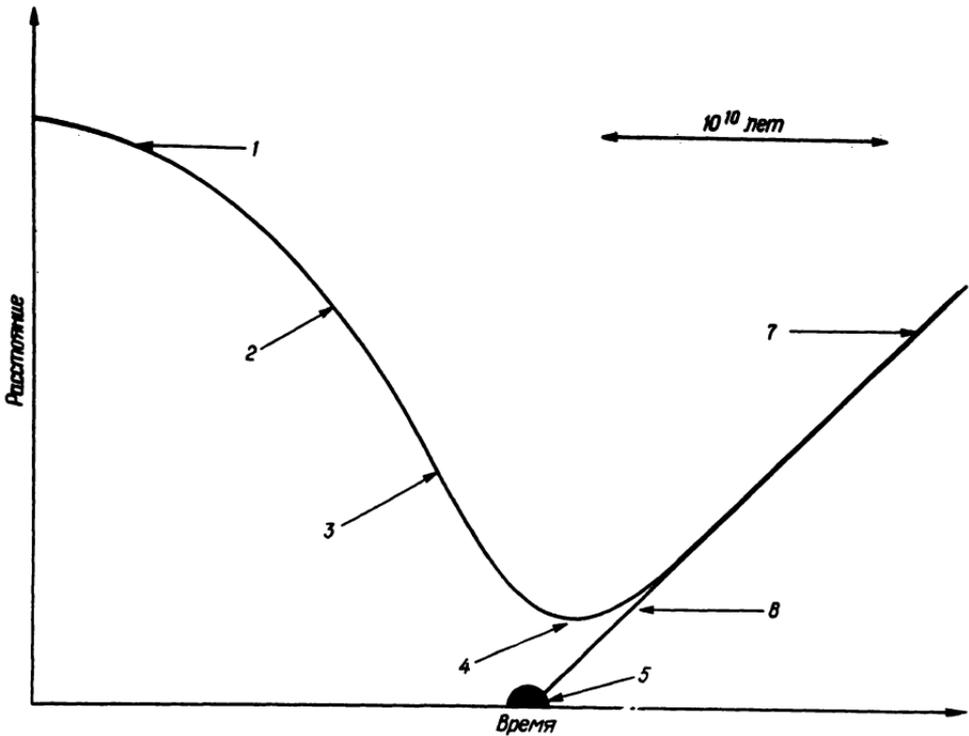


Рис. VI.3. Эволюция Метагалактики в модели Клейна (вверху указан примерный временной масштаб). Гравитационное притяжение в исходной смеси вещества и антивещества приводит ее в состояние, когда аннигиляция вызывает расширение, которое сейчас наблюдается в виде красного смещения. 1 — очень разреженная смесь вещества и антивещества; 2 — сжатие, вызванное гравитационными силами; 3 — аннигиляция становится заметной; 4 — давление излучения, возникающего при аннигиляции, становится настолько большим, что сжатие переходит в расширение; 5 — взрывающаяся сингулярность в теории «большого взрыва», 6 — расширение согласно теории «большого взрыва», 7 — современное состояние: расширение Метагалактики, наблюдаемое в виде красного смещения.

скольку такую структуру невозможно обнаружить с большого расстояния, у нас нет определенной информации о ее существовании в более удаленных областях пространства. С другой стороны, нет никаких причин для предположения, что ячеистая структура имеется лишь в тех областях, в которые проникли к настоящему времени космические аппараты. Поскольку теперь мы начинаем понимать, как образуются ячейки, можно с достаточной степенью уверенности заключить, что как межзвездное, так и межгалактическое пространства должны обладать ячеистой структурой. К сожалению, размер ячеек трудно найти теоретически и невозможно определить с помощью наблюдений.

Легко видеть, насколько важным для вопроса о существовании антивещества во Вселенной является открытие ячеистой структуры пространства. Требование симметрии будет удовлетворено, если Метага-

лактика или даже наша собственная Галактика состоят из большого числа ячеек, половина из которых содержит коиновещество (обычное вещество), а другая половина — антивещество. В разд. IV.9 было показано, что ячейки, содержащие эти две разновидности материи, должны разделяться слоями Лейденфроста, т. е. тонкими слоями, в которых имеются электроны и позитроны высоких энергий, возникающие при аннигиляции протонов и антипротонов (или других ядер) на границе раздела двух ячеек (рис. VI.4). В теории таких слоев, развитой Ленертом [22], показано, что в космических условиях их толщина может быть всего лишь порядка  $10^8$  м (или порядка  $10^{-8}$  светового года). Вследствие аннигиляции в слое происходит взаимоуничтожение коино- и антивещества, в результате чего возникает градиент плазменного давления, который уравнивается силой, действующей на электрические токи в плазме со стороны магнитного поля. Эта сила расталкивает плазменные области, занятые различными видами материи, в результате чего скорость аннигиляции уменьшается до тех пор, пока не наступает квазистационарное состояние. Такой слой, как и слой, отделяющий магнитосферу от межпланетного пространства, очень трудно обнаружить до тех пор, пока космический аппарат не пересечет его. Интенсивность излучения, сопровождающего аннигиляцию, слишком мала, чтобы его можно было зарегистрировать с помощью современных измерительных устройств. Таким образом, нельзя исключить возможности, что вещество и антивещество, разделенные между собой системой слоев Лейденфроста, сосуществуют во Вселенной. Такая возможность не противоречит никаким наблюдаемым явлениям.

### VI.2.3. Размер ячеек: порядка размеров галактики или меньше?

Требование симметрии можно удовлетворить различными способами. Можно считать, что каждая вторая галактика (или каждая вторая группа галактик) состоит из коиновещества, остальные — из антивещества. Если, например, окажется, что галактика в созвездии Андромеды состоит из антивещества и отделена от нашей слоем Лейденфроста, то это будет иметь исключительно важное значение с точки зрения космологии, но от этого внутригалактические явления практически не изменятся. Такая модель, с одной стороны, избавит нас от нескольких возражений против существования антивещества, но, с другой стороны, лишит нас возможности рассматривать процесс аннигиляции как источник энергии некоторых наблюдаемых явлений, например выделения энергии квазарами. Такая модель не очень привлекательна (хотя о ней и не следует забывать), так как возражения против существования антивещества все равно слабы (разд. VI.2.5), а привлечение аннигиляции в качестве источника энергии настоятельно необходимо (разд. VI.3). Гораздо интереснее для пробы исследовать вопрос о том, что было бы, если бы каждая галактика была симметричной относительно коиновещества и антивещества. При этом мы не будем слишком детализировать

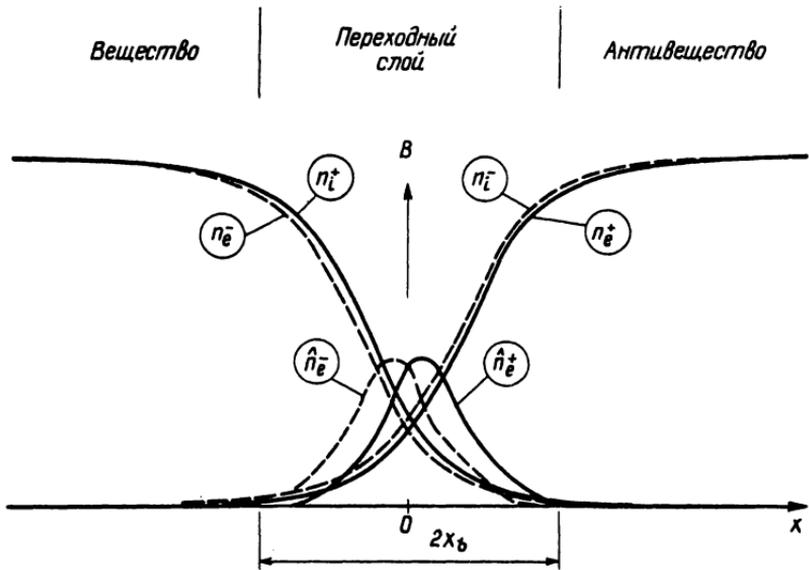


Рис. VI.4. Слой Лейденфроста, разделяющий области, занятые антивеществом и коинновеществом [22].  $n_i^+$  — протоны (низких энергий);  $n_e^-$  — электроны (низких энергий);  $\hat{n}_e^-$  — электроны (высоких энергий);  $n_i^-$  — антипротоны (низких энергий);  $n_e^+$  — позитроны (низких энергий);  $\hat{n}_e^+$  — позитроны (высоких энергий).

нашу модель. Например, одинаково возможны случаи, когда одна часть галактики состоит из коинновещества, а другая — из антивещества или когда ячейки имеют размер порядка размеров звездного скопления. Предельным является случай, когда ячейка совпадает с объемом ( $\sim 10^{50} \text{ м}^3$ ), занятым одной звездой и принадлежащей ей системой (планетами, кометами, звездным ветром и т. д.). Наиболее неожиданный и поразительный результат такого исследования состоит в том, что мы не знаем с определенностью, состоят ли наши ближайшие соседи в пространстве (скажем, звезда  $\alpha$  Центавра) из вещества или антивещества. Оставляя за собой право выбора размеров ячеек, мы в дальнейшем сконцентрируем наше внимание на модели, в которой средний объем ячейки считается приблизительно равным  $10^{50} \text{ м}^3$ .

## VI.2.4. Строение симметричной галактики

### VI.2.4.1. Солнечная система

С учетом сказанного выше попытаемся построить пробную модель нашей Галактики. Легко понять, что в нашей собственной Солнечной системе практически все тела должны состоять из коинновещества (Солнце, планеты, спутники и по крайней мере большинство комет и метеоритов). Возможно, что некоторые метеориты и состояли из антивещества,

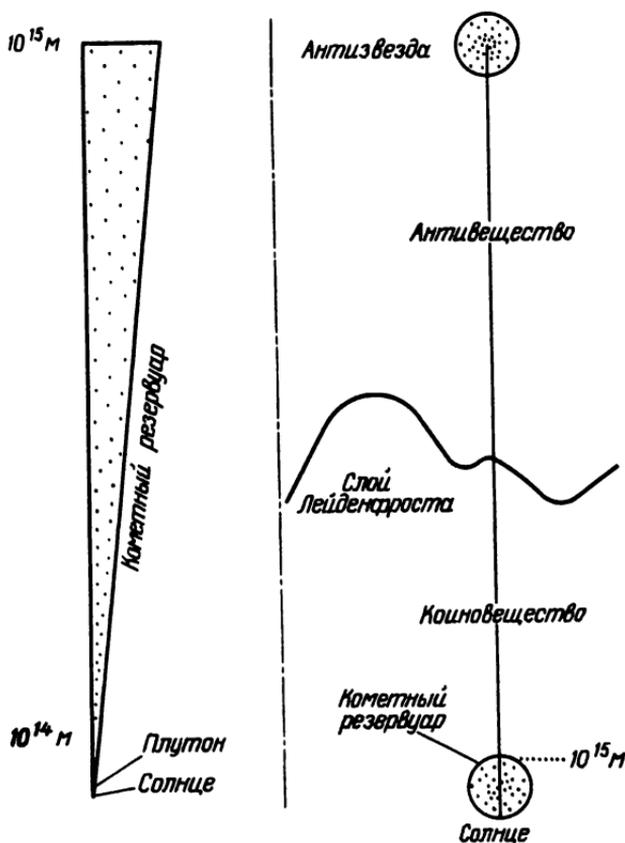


Рис. VI.5. Слева — кометный резервуар, окружающий планетную систему; справа — разделение вещества, расположенного вокруг Солнца, и антивещества соседней антизвезды.

однако все попытки доказать это не имели успеха. Что касается комет, из которых примерно  $10^{10}$ – $10^{11}$  находятся в так называемом «кометном резервуаре» Оорта, расположенном на расстоянии порядка  $10^{14}$ – $10^{15}$  м от Солнца (рис. VI.5), то нет никаких указаний, что хотя бы одна из них состоит из антивещества, хотя такую возможность нельзя полностью исключить. Известно, что солнечный ветер, который, конечно, состоит из коиновещества, проникает в те области пространства, куда долетают космические аппараты, однако вопрос о том, достигает ли он кометного резервуара, остается открытым.

Даже если считать, что все вещество, содержащееся в сфере радиусом  $10^{15}$  м вокруг Солнца, является коиновеществом, нельзя забывать, что это расстояние составляет лишь несколько процентов расстояния до ближайшей звезды (рис. VI.5). Поэтому для возможного слоя Лейденфроста, отделяющего область, принадлежащую Солнцу, от областей, принадлежащих другим звездам, вполне достаточно места. Мы не всту-

шим в противоречие ни с какими данными наблюдений, если предположим, что одна или несколько ближайших к нам звезд состоят из антивещества. Более того, если предположить, что каждая вторая звезда в нашей Галактике состоит из антивещества, то это предположение невозможно в настоящее время ни доказать, ни опровергнуть. Каждая звезда в нашей Галактике будет тогда окружена областью плазмы, состоящей из такого же типа вещества, как и сама звезда. Топология разделяющих слоев Лейденфроста представляет в этом случае интересную проблему, до сих пор не исследованную.

Для многих кажется неестественным постулировать существование этих слоев Лейденфроста повсюду во Вселенной. Однако для тех физиков, занимающихся космической плазмой, у которых открытие Кахиллом тонкой поверхности разрыва в магнитопаузе вызвало в свое время шок, кажется более неестественным отвергнуть предположение о существовании таких слоев.

Был высказан целый ряд аргументов для доказательства того, что в нашей Галактике не может быть антивещества. Эти аргументы будут обсуждены в разд. VI.2.5.

#### VI.2.4.2. Кометный резервуар

Если половина звезд в нашей Галактике состоит из антивещества, то представляет интерес исследовать вопрос о том, что произойдет, когда коинзвезда и антизвезда пройдут вблизи друг друга. Вероятность столкновения двух звезд очень мала, но является конечной величиной. Если обе звезды окружены планетными системами (включая кометные резервуары), подобно нашему Солнцу, то вероятность столкновения звезды с планетой, принадлежащей другой звезде, будет больше, но еще более вероятно столкновение с кометами из «чужого» резервуара. Поскольку считается, что в резервуаре находится примерно  $10^{10} - 10^{11}$  комет, то вероятность столкновения кометы с «чужой» звездой достаточно велика.

В процессе сближения двух «солнечных» систем слой Лейденфроста, разделяющий две различные плазменные области, может двигаться таким образом, что большое число комет окажется в разреженной плазме противоположного типа. Частицы этой плазмы будут сталкиваться с кометами, однако, как показывают элементарные вычисления, это не приведет ни к каким существенным эффектам, если, конечно, плотность плазмы не будет превышать на много порядков плотность обычной межзвездной плазмы.

Если две звезды, состоящие из вещества одинакового или противоположного типа, проходят друг мимо друга на таком расстоянии, что ни одна из них не пересекает кометный резервуар другой, то одно лишь гравитационное возмущение может оказаться настолько сильным, что некоторые кометы из резервуара могут вырваться в межзвездное пространство.

В работе [23] проведена оценка скорости разрушения кометного ре-

зервуара Оорта под действием тесных сближений с другими звездами и показано, что вследствие кумулятивной дисперсии нижний предел половины времени жизни кометной системы составляет примерно  $10^9$  лет, т. е. порядка возраста Солнечной системы. Поэтому следует ожидать, что существует определенное число блуждающих комет и что звезда может столкнуться с кометой (возможно, состоящей из вещества другого типа), даже не пересекая кометный резервуар другой звезды.

### VI.2.5. Возражения против существования антивещества

Любое серьезное обсуждение такой существенной ревизии космической физики, которую вызывает признание существования антивещества, встретит, конечно, яростное сопротивление со стороны приверженцев старых общепринятых теорий. В относительно недавних работах [24, 25] были выдвинуты более конкретные возражения.

Когда Клейн впервые высказал идею о существовании антивещества, на основании измеренного верхнего предела космического  $\gamma$ -излучения был сделан вывод, что лишь небольшая доля вещества нашей Галактики может быть антивеществом. Однако такой вывод зависит от выбранной модели: авторы этого вывода считали, что коиновещество и антивещество образуют однородную смесь. С учетом всего, что было сказано в разд. II.9, II.10 и IV.9 относительно однородных моделей, можно заключить, что выдвинутое возражение несостоятельно.

Другое возражение таково: аннигиляция не может являться источником энергии сильно излучающих объектов, так как практически не наблюдается жесткое  $\gamma$ -излучение, возникающее при аннигиляции. Этот вывод тоже зависит от выбранной модели. Если, например, аннигиляция вызывается твердым (или газообразным) телом, падающим на звезду, состоящую из вещества противоположного типа, то аннигиляция будет происходить на поверхности этого тела, и если тело состоит из достаточного количества вещества,  $\gamma$ -излучение будет им поглощено (см. разд. VI.3.3 и рис. VI.8).

Далее, в качестве возражения против существования антивещества приводится тот факт, что в излучении отсутствует  $\gamma$ -линия 0,5 МэВ. И снова этот вывод зависит от выбора модели. Линия 0,5 МэВ излучается лишь в том случае, когда электрон-позитронный газ охлажден до нерелятивистских энергий, что может оказаться крайне редким явлением, за исключением звездных атмосфер (разд. IV.9.3). Аннигиляция электрон-позитронных пар, обладающих большой кинетической энергией, дает непрерывный  $\gamma$ -спектр.

Другое зависящее от модели возражение состоит в том, что в космических лучах низких и средних энергий отсутствуют античастицы. Это возражение основывается на предположении, что межпланетное магнитное поле позволяет космическим лучам свободно распространяться в гелиосфере и вне ее. Из развитой в разд. III.4 модели гелиосферы видно, что такое предположение несостоятельно.

Недавно в работе [26] был проведен анализ всех возражений, вклю-

чая те, которые были выдвинуты в [24, 25], против существования антивещества и было показано, что ни одно из них не является решающим. Авторы этой работы привели целый ряд причин, по которым антивещество ведет себя так «скромно» и не оставляет легко различимых следов.

Однако такое его поведение вовсе не доказывает, что наша Вселенная не может быть симметричной. В этой главе мы используем некоторые результаты работы [26].

## VI.3. АННИГИЛЯЦИЯ КАК ИСТОЧНИК ЭНЕРГИИ

### VI.3.1. Аргумент в пользу существования антивещества

В нашей Метагалактике после энергии покоя второй по величине следует кинетическая энергия хаббловского расширения. В зависимости от выбранной модели она составляет от 5 до 20% от энергии покоя (табл. VI.1).

Эта энергия, очевидно, слишком велика, чтобы ее можно было объяснить обычными ядерными реакциями. Поэтому, если мы хотим объяснить ее происхождение с помощью обычных законов физики, нам ничего не остается, как признать, что *аннигиляция является единственным возможным источником такой энергии*. Следует заметить, что хаббловское расширение *не может* быть вызвано взрывом сингулярности, предполагаемой в космологической теории «большого взрыва» (как часто ошибочно утверждают в популярных изложениях космологии «большого взрыва»), так как модель Фрийдмана однородна и в ней отсутствуют градиенты давления, способные выбросить вещество. Существование скорости Хаббла просто *постулируется*.

Кроме аргумента, связанного с хаббловским расширением Метагалактики, существуют и другие свидетельства в пользу аннигиляции. За последнее десятилетие был обнаружен целый ряд небесных объектов, в которых выделяющаяся энергия слишком велика, чтобы ее можно было объяснить с помощью обычных ядерных реакций. Если не вводить новых физических законов, то можно утверждать, что существуют лишь два возможных источника такой энергии: энергия аннигиляции и гравитационная энергия (разд. IV.10.1). Был предложен целый ряд теорий, в которых считалось, что энергия поставляется за счет аннигиляции (см., например, [19, 20, 27 – 29]). Однако в дискуссии последнего времени интерес настолько сосредоточился на гравитации как источнике энергии, что эти теории, как правило, даже не упоминаются. В предыдущих разделах было показано, что запрет на аннигиляцию не обоснован.

Мы сначала кратко охарактеризуем сложившуюся ситуацию, а затем (в разд. VI.3.6 и VI.3.7) обсудим некоторые качественные модели высвобождения энергии аннигиляции.

Таблица VI.1

Радиус Хаббла	$R_H = 10^{26}$ м				
Время Хаббла	$t_H = R_H/c = 10^{10}$ лет				
Объем Хаббла	$V_H = \frac{4}{3} \pi R_H^3 = 4,2 \cdot 10^{78}$ м <sup>3</sup>				
Плотность	$\rho = 2 \cdot 10^{-29}$ кг/м <sup>3</sup>				
Предполагается, что для галактик					
$R_G = 10^{20}$ м,	$M_G = 2 \cdot 10^{40}$ кг,		$\rho = 5 \cdot 10^{-21}$ кг/м <sup>3</sup>		
	$\beta_{\text{eff}}$	0,4	0,5	0,6	
	$z_{\text{eff}}$	0,53	0,73	1	
Эффективный радиус Метагалактики		4	5	6	$10^{25}$ м
$R_{\text{eff}} = R_H \beta_{\text{eff}}$					
Масса покоя					
$M_M = 8,4 \cdot 10^{49} \beta_{\text{eff}}^3$		5,38	10,5	16,5	$10^{48}$ кг
$N_{\odot}^M = \frac{M_M}{M_{\odot}} = 4,2 \cdot 10^{16} \beta_{\text{eff}}^3$		2,70	5,28	8,24	$10^{15}$
$N_G^M = \frac{M_M}{M_G} = 4,2 \cdot 10^6 \beta_{\text{eff}}^3$		2,70	5,28	8,24	$10^5$
Энергия покоя					
$W_M = 7,35 \cdot 10^{66} \beta_{\text{eff}}^3$		483	944	1489	$10^{63}$ Дж
Кинетическая энергия					
$W_k = 0,25 W_M$		19,3	59,0	141	$10^{63}$ Дж
$B^2 = 2 \cdot 10^{66} \beta_{\text{eff}}^3$					
Энергия микроволнового излучения					
$W_{\mu} = 6 \cdot 10^{64} \beta_{\text{eff}}^3$		3,84	7,50	11,8	$10^{63}$ Дж
Для сравнения:					
Гравитационная энергия Метагалактики					
$\sim 10^{62}$ Дж					
Плотность по формуле (2.2) Вокулера $\rho =$		1,79	1,22	—	$10^{-29}$ кг/м <sup>3</sup>

### VI.3.2. Тожественность электромагнитных излучений двух различных типов вещества

*Тип вещества, из которого состоит какое-либо небесное тело, невозможно установить, изучая его электромагнитное излучение.*

Знак некоторых магнитных эффектов (эффекта Зеемана и фарадеевского вращения) зависит не только от типа вещества, но и от направления магнитного поля. Однако, поскольку невозможно измерить независимо направление магнитного поля, по этим эффектам нельзя определить тип вещества.

### VI.3.3. Излучение при аннигиляции

При смешивании двух типов вещества образуются *нейтрино,  $\gamma$ -лучи и релятивистские электроны и позитроны (разд. IV.9)*. Была высказана

точка зрения (см. [24.25]), что если бы в нашей Вселенной имелось большое количество антивещества, то интенсивность возникающего излучения превосходила бы минимальный доступный для измерений уровень. Такой вывод не верен (см. [26]). Конечно, если считать, что межзвездное пространство состоит из весьма однородной плазмы, находящейся в турбулентном состоянии, то можно прийти к выводу, что в нашей Галактике антивещество практически отсутствует. Однако, как было показано в первых четырех главах этой книги, последние наблюдения в магнитосфере и гелиосфере заставили нас резко изменить старую точку зрения на строение космического пространства.

#### VI.3.4. Слои Лейденфроста и аннигиляция в стенках ячеек

Как было показано в разд. II. 10, в последние годы был обнаружен целый ряд поверхностей, разделяющих области с различными намагниченностями, плотностями, температурами, распределениями электронов по скоростям и даже химическими составами. Это например, магнитопауза и токовый слой в хвосте магнитосферы, гелиосферный экваториальный слой (ранее ошибочно называвшийся секторной структурой) и аналогичные слои в магнитосферах Юпитера, Сатурна и Венеры, а также, возможно, слои, существующие в хвостах комет.

Эти слои образуются поверхностными электрическими токами. Иногда они бывают чрезвычайно тонкими (порядка нескольких ларморовских радиусов). Их почти невозможно обнаружить с расстояния. Как правило, космический аппарат не обнаруживает существования этих слоев до тех пор, пока не пересекает какой-либо из них.

Как уже отмечалось ранее, вряд ли космическая плазма обладает такими свойствами только в тех областях, которые доступны для диагностики с помощью космических аппаратов. Следовательно, естественно предположить, что космическое пространство вообще обладает *ячейстой структурой*. Пересмотр наших представлений о свойствах межзвездного (и межгалактического) пространства неизбежен при тщательной ревизии теории астрофизической плазмы в свете последних открытий в магнитосфере [7].

Новая картина строения космического пространства отклоняет все возражения против возможного существования антивещества в нашей Галактике. Мы не окажемся в противоречии с какими-либо данными наблюдений, если предположим наличие ячеек, состоящих из антивещества, которые примыкают к ячейкам из коиновещества, отделяясь от последних слоями Лейденфроста (разд. VI.2.2). Такие слои изучались теоретически в работах [22, 30] (см. рис. VI.4). В первой работе предполагается наличие однородного магнитного поля, параллельного поверхности раздела, а во второй исследуется комбинация слоя Лейденфроста и токового слоя, сходного с магнитопаузой. Из наблюдений известно, что токовые слои в магнитосфере и гелиосфере крайне устойчивы, поэтому можно ожидать, что такой слой даже в комбинации со слоем

Лейденфроста останется устойчивым. Предположим, например, что солнечный ветер состоит из антивещества. Тогда, достигнув магнитопаузы, он будет отклоняться точно так же, как и обычный солнечный ветер (см. разд. III.6.7 и рис. III.1, в), причем через магнитопаузу проникнет крайне малое количество антивещества.

### VI.3.5. Аннигиляция в космических облаках

Если наша Вселенная симметрична относительно коинвещества — антивещества или если в ней содержится существенное количество антивещества, может возникнуть ряд ситуаций, в которых аннигиляция будет играть важную роль.

Прежде всего следует рассмотреть случай, когда сталкиваются два космических облака, состоящих из противоположных типов вещества.

Вследствие процессов аннигиляции между облаками возникает отталкивающая сила и образуется более или менее стационарный слой Лейденфроста [26], сходный с теми слоями, которые исследовались Лернером в [22, 30]. Было рассчитано полное излучение такого слоя и показано, что измеримая интенсивность  $\gamma$ -лучей может возникнуть лишь при весьма неординарных условиях.

### VI.3.6. Тела, падающие на звезду, состоящую из вещества противоположного типа

В качестве второго примера рассмотрим падение небольшого тела (например, с размерами астероида или ядра кометы, т. е. с массой  $\sim 10^{14} - 10^{16}$  кг) на звезду. Когда твердое тело достигает фотосферы звезды, оно «сгорает» в течение нескольких минут. Этим можно объяснить наблюдаемые всплески рентгеновского и  $\gamma$ -излучения [31 — 33]. Постоянные времена быстрых вариаций интенсивности  $\gamma$ -лучей (рис. VI.6) и полная энергия излучения по порядку величины соответствуют ожидаемым значениям, а частота таких всплесков согласуется с ожидаемой частотой столкновений.

В распределениях по размерам для большинства групп небесных тел наблюдается быстрый рост количества тел с уменьшением их размеров [34]. Поэтому можно ожидать большого количества очень слабых всплесков  $\gamma$ -излучения. Такие всплески действительно наблюдаются — в основном с помощью шаров-зондов (см., например, [35]).

При рассмотрении более крупных тел следует помнить, что в Солнечной системе число комет оценивается величиной порядка  $10^{11}$ , в то время как наблюдаемых астероидов всего примерно  $10^4$ . Число тел с размерами спутников и планет существенно меньше. Если считать, что такое распределение по размерам характерно для всей нашей Галактики, то можно ожидать, что при столкновении с ней случайно движущейся звезды вероятность столкновения этой звезды с каким-либо телом Галактики будет резко уменьшаться с увеличением массы тела. Одновременно увеличивается поток  $\gamma$ -излучения, так что  $\gamma$ -вспышки стано-

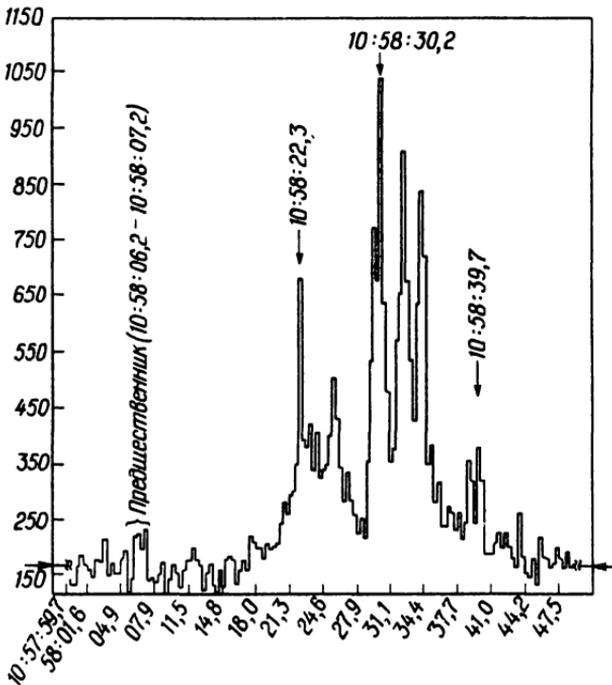


Рис. VI.6. Типичная картина всплеска  $\gamma$ -излучения. Полная продолжительность равна 50 с (стрелки в нижней части рисунка показывают средний уровень интенсивности по данным 40 измерений).

вятся более заметными. Однако при обычной вспышке  $\gamma$ -излучения интенсивность излучения ограничивается поглощением в газовом облаке, возникающем при испарении малого тела [36], так что наблюдаемое  $\gamma$ -излучение в основном обусловлено вторичными процессами, происходящими в облаке. Размер газового облака тем больше, чем больше размер налетающего тела, причем с увеличением размеров возрастает и время «сгорания» тела. Следовательно, полное сгорание должно происходить уже под массивными слоями верхней фотосферы, в результате чего должно наблюдаться насыщение интенсивности  $\gamma$ -вспышки (рис. VI.7).

В релятивистском электрон-позитронном газе, возникающем в результате процессов аннигиляции, такого насыщения не происходит. Как будет показано ниже, такой газ будет выходить даже с больших глубин в виде струй и пузырей и распространяться в области, окружающей небесное тело. При наличии магнитного поля этот газ будет излучать синхротронное излучение, которое можно зарегистрировать в радиодиапазоне или даже в диапазоне более коротких длин волн. Следовательно, можно ожидать, что вспышки  $\gamma$ -излучения должны сопровождаться радиовспышками, интенсивность которых также должна увеличиваться с уменьшением частоты их следования.

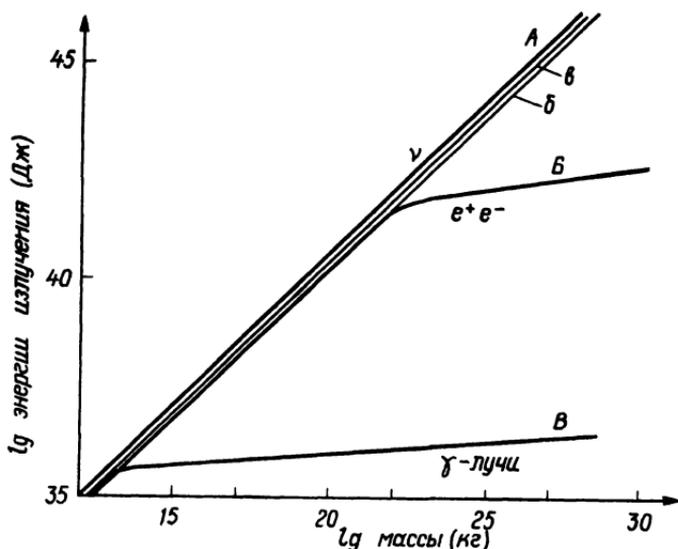


Рис. VI.7. Энергия излучения  $W$ , выделяющаяся при аннигиляции конденсированного тела массой  $m$  внутри звезды. А)  $W = mc^2$  — энергия нейтрино плюс энергия всех остальных частиц — показывает верхний предел энергии излучения (включая энергию светового излучения) амбизвезды. б)  $W = mc^2/3$  — энергия, выделяющаяся в виде электрон-позитронного релятивистского газа. Б) Большинство электрон-позитронных пар излучается, однако за счет их взаимной аннигиляции энергия этого излучения достигает значения насыщения при  $M \sim 10^{22}$  кг. Кривая показывает верхний предел энергии синхротронного излучения, а также вклада непрерывного фонового рентгеновского излучения. в)  $W = 2mv^2/3$  — энергия  $\gamma$ -лучей. В) Из-за поглощения в конденсированном теле и в облаке, образующемся при испарении тела, энергия  $\gamma$ -излучения достигает насыщения примерно при  $m \sim 10^{13}$  кг.

Конечно, нейтринное излучение поглощается существенно слабее, однако, поскольку наши приемники еще не обладают достаточной чувствительностью, мы пока не можем получить какую-либо информацию с помощью нейтринного излучения [26].

В следующем разделе мы рассмотрим два случая столкновений между конденсированными телами: столкновение звезды солнечных размеров с телом средней величины (порядка размеров Земли) и столкновение двух тел звездных размеров.

### VI.3.7. Модель амбизвезды

Поскольку наши знания, относящиеся к взаимодействию коинвещества и антивещества, находятся еще в зачаточном состоянии, невозможно построить реалистическую модель амбизвезды. Мы можем лишь обсудить упрощенную качественную модель с целью выяснения вопроса о том, какие основные процессы следует принимать во внимание при анализе. Такое обсуждение было проведено в работе [37]. В этой работе

рассматривалось столкновение звезды солнечных размеров с гораздо меньшим телом (модель I) и с телом таких же размеров, как и звезда (модель II), причем звезда и тело считались состоящими соответственно из вещества и антивещества. Данные наблюдений, которые использовались для сравнения с теорией, были взяты в основном из работы [38] и ряда статей, опубликованных в журнале «Physica Scripta» [39].

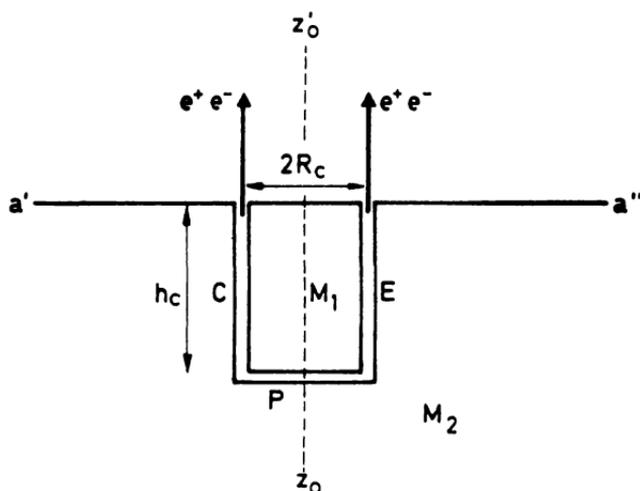
### VI.3.7.1. Модель I амбизвезды

В этой модели предполагается, что звезда сталкивается с телом, состоящим из вещества противоположного типа, размеры которого гораздо меньше размеров звезды, однако достаточно велики, чтобы тело не могло мгновенно стореть (масса тела должна, по-видимому, быть  $\geq 10^{20}$  кг). После очень бурной, но кратковременной начальной фазы (длительностью в несколько минут) вещество налетающего тела становится частью составной звезды (амбизвезды), состоящей из вещества и антивещества, которые разделены слоем Лейденфроста. После окончания переходного периода (длящегося, по-видимому, менее 100 лет) поток энергии внутрь амбизвезды может стать квазистационарным. В разделяющем слое вследствие аннигиляции будут образовываться нейтрино,  $\gamma$ -лучи и релятивистский электрон-позитронный газ. Из-за высокой температуры эта область будет, по-видимому, оставаться на поверхности амбизвезды. Напомним, что мы рассматриваем очень сильно упрощенную модель.

На рис. VI.8 фотосфере амбизвезды соответствует плоскость  $a'a''$ . Предполагается, что вещество  $M_1$  падающего тела остается внутри кругового цилиндра радиуса  $R_c$  и высоты  $h_c$ . Оно отделяется от вещества звезды  $M_2$  круговым слоем Лейденфроста  $P$ , который именуется *производящей областью*, где происходят все процессы аннигиляции, и цилиндрической оболочкой толщины  $\Delta$ , которая называется *выходным каналом*  $E$ . Аннигиляция, происходящая в этой оболочке, не учитывается.

Предполагается, что звезда имеет магнитное поле и вращается, и считается, что цилиндр, состоящий из вещества противоположного типа, может оказаться в состоянии равновесия вблизи оси вращения.

Более детальные расчеты этой модели показали, что она обладает следующими свойствами. Возникающие при аннигиляции нейтрино покидают амбизвезду, не вызывая никаких важных процессов. Далее, образующееся  $\gamma$ -излучение в основном поглощается в ближайшей окрестности производящей области, вызывая сильный разогрев и появление вторичных электронов и позитронов. Поскольку аннигиляция происходит в основном в производящей области, которая заэкранирована от окружающего пространства толстым слоем вещества, можно ожидать, что интенсивность  $\gamma$ -излучения *будет весьма низкой*. Электроны и позитроны, особенно те, которые возникли непосредственно при аннигиляции, будут также приводить к сильному нагреву, однако под действием магнитного поля они будут группироваться в газовые облака и уходить в пространство через выходные каналы. Значительная часть



**Рис. VI.8.** Модель 1 амбизвезды. Вблизи поверхности  $a'a''$  звезды, состоящей из вещества одного типа, имеется объем, занятый веществом другого типа, который ограничен круговой поверхностью  $P$  и цилиндром  $C$  с осью симметрии  $z_0z_0'$ . Вещество и антивещество разделены слоями Лейденфроста. Релятивистский электрон-позитронный газ (с энергией  $\sim 10^8$  эВ) излучается в основном по нормали к поверхности звезды. Если высота цилиндра настолько велика, что плотность массы превышает  $\sim 10^3$  кг/м<sup>2</sup>, практически все  $\gamma$ -излучение поглощается. Из-за интенсивного выделения энергии область вблизи поверхности цилиндра сильно нагревается, в результате чего из этой области выходит мощное световое излучение.

электрон-позитронного газа будет излучаться вблизи оси в виде более или менее сформировавшегося пучка. Двигаясь в магнитном поле звезды, электроны и позитроны генерируют мощное синхротронное излучение. Сильный разогрев плазмы на обеих сторонах выходного канала также приводит к эмиссии как коинновещества, так и антивещества внутрь конуса, ось которого совпадает с осью вращения звезды. Расчеты показывают, что ожидаемая мощность излучения может быть порядка  $10^{36}$  Вт.

### VI.3.7.2. Столкновения звезд

Рассмотрим теперь случай, когда массы сталкивающихся тел, состоящих из различных типов вещества, соизмеримы.

Сначала изучим сам момент столкновения. В некоторых отношениях столкновение двух звезд, состоящих из вещества и антивещества, сходно со столкновением двух звезд, одинаково состоящих из вещества. Последняя задача, важная для понимания процесса образования очень массивных звезд, особенно в ядрах галактик, привлекла внимание многих специалистов и была исследована в работах [40—44] (краткий обзор этих работ имеется в [45]).

Поскольку различные авторы использовали различные модели, их

результаты немного противоречат друг другу. Очевидно, такое столкновение является в высшей степени неупругим, и вполне вероятно, что в результате столкновения образуется комбинированная звезда, масса которой не намного меньше суммы масс сталкивающихся звезд. Комбинированная звезда сильно нагревается, в результате чего значительно возрастает выделение ядерной энергии и возбуждаются мощные колебания. Однако, поскольку время столкновения невелико ( $\sim 10^3$  с), колебания в основном затухают за время, существенно меньшее, чем характерные времена интересующих нас процессов.

При столкновении двух звезд, состоящих из вещества и антивещества, начальная фаза столкновения, по-видимому, останется такой же короткой. Поскольку аннигиляция является поверхностным процессом, происходящим в основном в слое толщиной порядка нескольких длин свободного пробега, освобождающейся при аннигиляции энергии может оказаться недостаточно для существенного изменения процесса столкновения (аналогично выделению ядерной энергии).

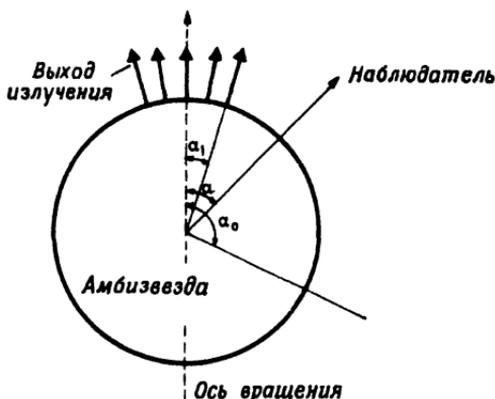
### II.3.7.3. Модель II амбизвезды

Ситуацию, возникающую после завершения всех переходных процессов, нелегко рассчитать с какой-либо степенью определенности. По причинам, которые обсуждаются в работе [37], разумный выбор модели (рис. VI.9) должен основываться на предположении, что свойства амбизвезды, образующейся при столкновении двух звезд сравнимых масс, совпадают со свойствами амбизвезды в модели I. Таким образом, излучение амбизвезды направлено вдоль оси вращения и состоит из электрон-позитронной плазмы, синхротронного и светового излучения. В результате отдачи амбизвезда приобретает направленное вдоль оси вращения ускорение. Если начальные количества вещества и антивещества почти равны и такое же количество амбиплазмы излучается, то может произойти почти полное «сгорание». Тогда под действием реактивного ускорения оставшаяся масса амбизвезды может достигнуть очень высоких скоростей и *в принципе любого значения красного смещения  $z$* .

Следует подчеркнуть, что такие большие ускорения возникают крайне редко. Это происходит лишь при таких столкновениях двух звезд, состоящих из вещества и антивещества, когда массы звезд почти равны между собой. Следовательно, *все новорожденные квазары*, а также многие из старых квазаров должны обладать очень малыми скоростями относительно своих родительских галактик.

### II.3.7.4. Свойства амбизвезды, доступные наблюдениям

Рассмотренная нами амбизвезда чрезвычайно несимметрична. Это означает, что к ней неприменимы обычные модели звезд. Ее наблюдаемые свойства зависят от угла между осью вращения амбизвезды и направлением на наблюдателя (рис. VI.9). Мощное световое излучение



**Рис. VI.9.** Очень сильно упрощенная модель амбизвезды. Из сильно нагретой полярной области ( $\alpha < \alpha_1$ ) излучаются плазма, электрон-позитронный газ и свет. Спектр светового излучения смещен в красную сторону для наблюдателя, расположенного при  $\alpha < \alpha_0$ , и в голубую сторону при  $\alpha > \alpha_0$ . Амбизвезда выглядит как квазар, если наблюдатель видит ярко светящуюся полярную шапку, поэтому спектры квазаров всегда должны быть смещены в красную сторону. Если спектр наблюдаемого излучения амбизвезды смещен в голубую сторону, амбизвезда выглядит как вполне обычная звезда.

происходит в основном в конус, ось которого совпадает с осью вращения и угол раствора которого равен  $\alpha_0$ , так что если наблюдатель находится при  $\alpha < \alpha_0$ , то мощность наблюдаемого излучения будет на много порядков величины превышать мощность излучения в том случае, когда наблюдатель находится при  $\alpha > \alpha_0$ . Следовательно, для наблюдения такого мощного излучения и отождествления амбизвезды с квазаром наблюдатель должен находиться при  $\alpha < \alpha_0$ . Если  $\alpha > \alpha_0$ , то амбизвезда будет выглядеть как объект почти нормального блеска: ярче, чем обычная звезда с такими же размерами, но несравненно слабее, чем квазар.

### VI.3.7.5. Голубое смещение

Один из наиболее важных аргументов против идеи о собственном ускорении квазаров до огромных скоростей (эта идея противоположна общепринятой концепции «космологического» происхождения красного смещения) состоит в том, что известно очень малое число квазаров (если вообще такие имеются), в которых наблюдается голубое смещение. Модель II амбизвезды снимает это возражение. Конечно, излучение амбизвезды может быть с равной вероятностью смещено как в красную, так и в голубую сторону, однако мы примем ее за квазар только в том случае, если она видна со стороны, где работает ее «реактивный двигатель». Если направление ускорения совпадает с осью вращения, то в излучении амбизвезды будет в основном наблюдаться красное смещение.

## VI.3.7.6. Эволюция квазаров

Считая, что аннигиляция является источником энергии квазаров, и используя модель II амбизвезды, можно прийти к следующей картине эволюции таких объектов [37].

1) Квазар образуется в результате столкновения коинозвезды и антизвезды. Скорее всего, это может произойти в плотном ядре галактики, где вероятность столкновения звезд наибольшая.

2) Само столкновение не очень сильно отличается от столкновения двух звезд, состоящих из обычного вещества. К сожалению, этот процесс столкновения еще не понят до конца, однако из существующих моделей, по-видимому, следует, что после очень бурного периода, продолжающегося несколько минут или часов, образуется составная звезда, если скорость столкновения была не слишком большой. По всей вероятности, масса этой звезды составляет не менее 90% от суммы масс сталкивающихся звезд. Поскольку кинетическая энергия столкновения переходит во внутреннюю энергию, составная звезда вначале будет иметь очень высокую температуру и совершать мощные колебания. Высокая температура ускорит протекание ядерных реакций внутри звезды, однако выделившаяся за короткий период столкновения ядерная энергия будет существенно меньше кинетической энергии и практически не повлияет на сам процесс столкновения. Через промежуток времени порядка нескольких лет или более составная звезда приобретает свойства обычной звезды с такой же массой.

3) Эти результаты можно применять и для короткого периода образования амбизвезды. Дело в том, что процесс аннигиляции, происходящий в очень тонком слое между веществами различных типов, вряд ли способен существенно изменить характер столкновения. В разд. VI.3.6 были описаны причины, побудившие нас представить две пробные эмпирические модели амбизвезды, первая из которых соответствует столкновению двух тел с резко различающимися массами, а вторая — столкновению двух тел со сравнимыми массами. Последняя модель, по-видимому, описывает типичный квазар.

4) Вещество и антивещество внутри амбизвезды разделены слоем Лейденфроста, в котором происходит интенсивная аннигиляция. При аннигиляции рождаются нейтрино, которые быстро покидают амбизвезду,  $\gamma$ -лучи, которые в основном поглощаются внутри амбизвезды, и электрон-позитронные пары, большая часть которых излучается в направлении, параллельном (или антипараллельном) оси вращения. Вблизи оси происходит интенсивный разогрев, в основном вследствие поглощения  $\gamma$ -лучей. Наиболее разогретой областью может быть либо круг вблизи оси вращения (как в модели I), либо вся полярная шапка. Будет происходить испускание плазмы в основном из наиболее разогретой области, которая простирается, например, до угла  $\alpha_1$ , отсчитываемого от полюса. Как и в случае солнечного ветра, скорость выброса будет изменяться, в результате чего возникнут вариации плотности и образуется целый ряд отдельных облаков.

5) При определенных условиях сила отдачи излученного электрон-позитронного газа, светового излучения и выброшенной плазмы может сообщить амбизвезде эффективное *реактивное ускорение*. «Выхлопные газы» будут выходить из круговой области вблизи оси, ограниченной полярным углом  $\alpha_1$  (рис. VI.9).

6) Большинство квазаров не будут испытывать очень сильное ускорение. Поэтому красное смещение в их спектрах будет таким же, как у покинутой ими родительской галактики.

7) При особых условиях, когда две сталкивающиеся звезды обладают почти одинаковыми массами, амбизвезда под действием силы отдачи может ускориться очень сильно, так что ее скорость может оказаться даже близкой к скорости света. Поскольку размер ядра галактики обычно бывает порядка  $10^{20}$  м, амбизвезда, движущаяся со скоростью  $\sim 3 \cdot 10^8$  м/с, будет оставаться внутри него в течение примерно  $10^{20} \cdot (3 \cdot 10^8 \cdot 3 \cdot 10^7)^{-1} = 10^4$  лет. Амбизвезда может уйти из ядра галактики, если она рождается во внешних его областях и ее время жизни достаточно продолжительно.

8) Если световое излучение амбизвезды имеет форму пучка, то ее наблюдаемые свойства зависят от положения наблюдателя относительно ее оси вращения. Следовательно, *должны существовать амбизвезды с голубым смещением в спектре излучения*, однако они должны выглядеть почти так же, как обычные звезды. Из-за аннигиляционного разогрева их светимость будет, возможно, в 10 или 100 раз больше, чем светимость нормальной звезды, однако их *невозможно принять за квазары*, светимости которых обычно в  $\gg 10^6$  больше (например, порядка  $10^{35}$  Вт, в то время как светимость Солнца равна  $4 \cdot 10^{26}$  Вт).

Таким образом, *отсутствие наблюдений голубого смещения не является аргументом против нашей модели локального ускорения*.

9) Из рис. VI.9 следует, что квазар должен выглядеть как очень яркое пятно с выходящей из него струей излучения (хотя мы не уверены, что эту струю легко наблюдать). Имеется ряд наблюдений квазаров, с которыми связаны струи (см. например, [46 – 48]).

10) До сих пор количество энергии, выделяемой квазаром, рассчитывалось в предположении, что его излучение изотропно. Из нашей модели следует, что это излучение крайне неизотропно, поэтому обычные значения выделяемой энергии следует уменьшить примерно на один порядок величины. Далее, поскольку квазары могут находиться на расстояниях, существенно меньших, чем «космологические» расстояния, значения выделяемой ими энергии можно, по-видимому, уменьшить еще на один, а иногда и на несколько порядков величины.

11) Квазар превращается в обычную звезду, когда меньшая по массе компонента полностью аннигилирует. Время жизни квазара не может превышать значение  $t = 2M_s c^2 / P_{QSO}$ , где  $M_s$  – масса меньшей из сталкивающихся звезд и  $P_{QSO}$  – мощность, выделяющаяся при аннигиляции. Если в качестве примера выбрать весьма произвольные значения  $M_s = 10^{30}$  кг и  $P_{QSO} = 10^{35}$  Вт, то для  $t$  получим значение  $2 \cdot 10^{12}$  с =  $10^5$  лет.

Поскольку полное число известных квазаров порядка  $10^3$ , каждый год должно происходить более  $10^{-2}$  звездных столкновений, приводящих к образованию наблюдаемых квазаров.

### VI.3.7.7. Непрерывное фоновое рентгеновское излучение

Релятивистский электрон-позитронный газ, выбрасываемый амбизвездами, будет распространяться и постепенно заполнять все межгалактическое пространство. Как показано в работах [49, 50], его там можно наблюдать, так как под действием падающего на него света звезд образуются рентгеновские лучи в результате обратного эффекта Комптона. Таким способом можно объяснить наблюдаемое непрерывное фоновое рентгеновское излучение, не вводя при этом никаких специальных (*ad hoc*) гипотез. Полученный теоретически спектр излучения хорошо согласуется с наблюдаемым в диапазоне энергий от 1 до 100 кэВ, а найденная теоретически интенсивность по порядку величины вполне допустима.

В работе [24] были выдвинуты возражения против такой интерпретации, однако авторы [50] показали, что эти возражения не верны (см. также [26]).

## VI.4. ХАББЛОВСКОЕ РАСШИРЕНИЕ В ЕВКЛИДОВОМ ПРОСТРАНСТВЕ

### VI.4.1. Некосмологические красные смещения некоторых квазаров

Наш вывод о том, что при особых обстоятельствах амбизвезды за счет внутренних эффектов, например, реактивной отдачи, могут ускориться до скоростей, близких к  $c$ , подтверждается целым рядом данных наблюдений. В течение длительного времени Арп (см., например, [51, 52, 5]) настаивал на том, что квазары с очень большими значениями красного смещения настолько часто обнаруживаются вблизи галактик с гораздо меньшими значениями красного смещения, что эти квазары и соответствующие галактики должны быть генетически связанными, несмотря на большие различия в их красных смещениях. В работах [53, 54] подытожены результаты Арпа и других и делается вывод, что во многих случаях квазар и близкая к нему галактика обладают одинаковыми красными смещениями, но имеется также много случаев, когда красное смещение квазара намного превышает красное смещение соседней к нему галактики. В некоторых случаях, наблюдаемых Арпом, скорость квазара относительно родительской галактики превышала 0,8  $c$ . Кинетическая энергия тела, движущегося с такой скоростью, составляет  $(1 - \beta^2)^{-1/2} - 1 = 0,67$  от его энергии покоя. Единственное разумное объяснение такой колоссальной кинетической энергии состоит, по-видимому, в том, что тело испустило излучение или/и плазму вдоль определенной оси и получило ускорение под действием результирующей реактивной силы подобно тому, как это обсуждалось в разд. VI.3.7.

Энергию, необходимую для такого ускорения, следует сравнивать с выделяемой энергией, которую в любом случае нужно предполагать большой для объяснения высокой светимости квазаров. Если две компоненты амбизвезды обладают почти одинаковыми массами, то при полном «сгорании» амбизвезда будет обладать кинетической энергией, близкой к ее энергии покоя.

Мы приходим к выводу, что по крайней мере в некоторых случаях излучаемая энергия может быть такого же порядка, как и энергия, необходимая для ускорения квазара, скажем, солнечной массы до скоростей, соответствующих очень большим значениям  $z$ .

Таким образом, *не вводя никаких других предположений, кроме предположения о том, что источник энергии квазара является внутренним, мы находим, что наблюдаемая энергия его излучения и энергия, необходимая для его реактивного ускорения до релятивистских скоростей, должны быть одного порядка.* Этот вывод можно проверить наблюдениями, если сравнивать выделяемую квазаром энергию с его кинетической энергией (при разумных предположениях относительно его времени жизни и массы).

Существенно полуэмпирическая модель, которая обсуждалась выше, по-видимому, дает разумное объяснение природы некоторых наблюдаемых явлений. Следует сделать вывод, что только аннигиляция может быть источником необходимой энергии.

Еще раз нужно подчеркнуть, что квазары приобретают большие ускорения только при особых условиях. *Многие квазары, например те, которые только что родились, или те, которые возникли в результате столкновения двух звезд с существенно различными массами, будут обладать скоростями, практически совпадающими со скоростями их родительских галактик.*

Итак:

- 1) полагая, что многие, *но не все* квазары находятся на «некосмологических» расстояниях,
- 2) считая, что источник энергии должен быть внутренним,
- 3) предполагая, что энергия излучается в определенном направлении (это необходимо для объяснения отсутствия голубого смещения),
- 4) предполагая, что масса квазара сравнима с солнечной массой, можно заключить, что некоторые квазары могут ускоряться до релятивистских скоростей.

Важно подчеркнуть, что космологические выводы этой главы *не связаны* с проблемой существования антивещества. Они не изменятся, если в качестве источника энергии использовать любой другой внутренний источник, удовлетворяющий упомянутым выше условиям.

#### VI.4.2. Следствия из некосмологической интерпретации красных смещений квазаров

Если допустить, что красные смещения некоторых квазаров имеют некосмологическое происхождение, т. е. считать, что эти квазары ускорились за счет выделения собственной энергии, то такая точка зрения

приведет к далеко идущим следствиям космологического характера. В этом случае природа не только самих квазаров, но и облаков, вырывающихся из амбизвезды в процессе ускорения (которые иногда наблюдаются либо как объекты, поглощающие излучение квазаров, либо как струи), должна объясняться процессом высвобождения собственной энергии, происходящим внутри квазаров. Следовательно, те квазары, которые обладают очень большими значениями красного смещения  $z$ , не следует учитывать при анализе общего хаббловского разбегания галактик. Это означает, что крупномасштабную структуру Метагалактики нужно получать, используя лишь измерения, относящиеся к объектам, о которых можно с уверенностью сказать, что они не связаны с квазарами.

Наибольшие значения красного смещения, которые с определенностью принадлежат галактикам, составляют  $z = 0,806$ ;  $0,811$  и  $0,890$  [55]. Этим значениям соответствуют  $\beta = 0,53$ ;  $0,53$  и  $0,57$ .

Вокулер определяет эффективный радиус  $R_{\text{eff}}$  скопления или сверхскопления из условия, что половина их членов обладает проективными радиусами, меньшими  $R_{\text{eff}}$ . Поэтому даже если считать, что параметр Хаббла постоянен вплоть до предельного расстояния Хаббла  $R_H$ , то в качестве  $R_{\text{eff}}$  нашей Метагалактики нельзя брать радиус Хаббла, так как это будет означать, что многие галактики должны разбежаться со скоростями  $v > c$ . Если же положить  $\beta_{\text{eff}} = R_{\text{eff}}/R_H = 0,5$  (что соответствует  $z_{\text{eff}} = 0,73$ ), то и в этом случае вне  $R_{\text{eff}}$  окажется больше вещества, чем внутри. Следовательно, наблюдаемые значения  $\beta$  хорошо согласуются с  $R_{\text{eff}} = 0,5R_H$ , а возможно, даже с  $R_{\text{eff}} = 0,4R_H$  ( $z = 0,52$ ) или с еще меньшим значением.

В нашей модели мы будем использовать значение  $\beta_{\text{eff}} = 0,5$  ( $z = 0,73$ ). В этом случае возможно существование некоторого числа галактик с красным смещением  $z$  около 1 или несколько больше. Значение  $R_{\text{eff}}$  можно увеличить только в том случае, когда мы будем уверены, что количество вещества в области, соответствующей  $z > 0,73$ , больше, чем в области  $z < 0,73$ . (Следует отметить, что наши выводы практически не изменятся, если значение  $R_{\text{eff}}$  станет равным, например,  $0,6R_H$ , т. е.  $z = 1,0$ .)

## VI.5. МОДЕЛЬ ЭВОЛЮЦИИ МЕТАГАЛАКТИКИ

Результаты, полученные на основании вышеописанных предположений, представлены в табл. VI.1. Значения  $R_H$  и  $t_H$  (время Хаббла) взяты из работы Вокулера. Значения плотности соответствуют верхнему пределу для случаев  $\beta = 0,4$ ;  $0,5$  и  $0,6$ . Величина кинетической энергии  $W_k$  зависит от того, будем ли мы считать плотность постоянной или распределенной по определенному закону внутри Метагалактики. Коэффициент  $0,25$ , стоящий в формуле для кинетической энергии, постулируется. Плотность электромагнитной энергии  $w = 1,53 \cdot 10^{-16}$  Дж/м<sup>3</sup> соответствует плотности излучения абсолютно черного тела при температуре 3 К.

### VI.5.1. Прото-Метагалактика

Представляет интерес вопрос о том, как далеко назад во времени мы можем проследить за эволюцией нашей Метагалактики, используя современные наблюдения и *не опираясь ни на какие космологические теории*.

На основании хаббловского расширения можно прийти к заключению, что ранее наша Метагалактика была меньше, чем в настоящее время. Однако, поскольку у наблюдателей существуют разногласия относительно значения  $H_0$  и его постоянства, мы не можем с определенностью установить минимальный размер Метагалактики. Как показано на рис. VI.2, даже из наблюдений, претендующих на доказательство постоянства параметра Хаббла, следует, что минимальный размер Метагалактики примерно равен 0,1 от ее современного размера. Поскольку существуют разногласия относительно абсолютного значения параметра Хаббла и его постоянства в различных направлениях, не исключено, что минимальный размер Метагалактики на самом деле был больше.

Ниже мы будем считать, что в далеком прошлом Метагалактика находилась в состоянии *прото-Метагалактики*, когда ее размер составлял 0,1 от ее современного размера.

До этого Метагалактика а) могла быть существенно меньше (как считается в теории «большого взрыва»), б) могла не изменять своих размеров (по крайней мере в течение какого-то промежутка времени) или в) могла сжиматься (как считает Клейн).

Для лучшего обсуждения этих трех возможностей следует сначала реконструировать состояние прото-Метагалактики, т. е. состояние нашей Метагалактики приблизительно  $0,9t_H$  лет тому назад, когда ее размер был равен примерно

$$R_{PM} = a \cdot R_H, \quad (9)$$

где  $a = 0,1$ .

На основании сказанного в разд. VI.1.4.2 при реконструкции мы можем спокойно использовать геометрию Евклида. При  $\Omega < 10^{-3}$  (разд. VI.1.3.3) поправки общей теории относительности не превышают 1%. (Даже при  $\Omega < 0,06$  евклидово описание возможно, но релятивистские поправки будут, конечно, больше.)

Сейчас еще преждевременно давать подробное описание состояния прото-Метагалактики. Мы не будем пытаться выяснить, состояла ли она из галактик или же из более однородных скоплений звезд или облаков. В разд. VI.5.3 будет дано краткое описание ее возможного происхождения.

Единственное свойство прото-Метагалактики, которое необходимо обсудить ввиду его чрезвычайной важности, состоит в том, способны ли существовавшие в ней условия вызвать хаббловское расширение.

### VI.5.2. Кинетическая энергия хаббловского расширения Метагалактики

Для осуществления возможностей б) и в) необходимо, чтобы прото-Метагалактика была способна произвести кинетическую энергию хаббловского расширения, которая по величине стоит на втором месте после энергии покоя.

В популярных изложениях теории «большого взрыва» часто утверждается, что хаббловское расширение происходит в результате «взрыва», однако такое утверждение не верно, так как в модели Фридмана отсутствуют градиенты давления. На самом деле высокие скорости в этой теории постулируются, а при попытках их объяснения приписываются наличию сверхъестественных сил, характерных для идеи творения мира *из ничего*. Поскольку наш подход основывается на предположении, что нет необходимости во введении новых законов природы, мы не можем удовлетвориться подобным «объяснением». Наша цель состоит в том, чтобы, используя обычный научный метод, выяснить, какое физическое явление служит источником энергии, обеспечивающим хаббловское расширение Метагалактики.

Как отмечалось в разд. IV.10.1, источниками, способными выделить такую колоссальную кинетическую энергию, могут быть только гравитация и аннигиляция. Конечно, гравитация определяет протекание очень многих астрофизических явлений. Однако ни одно из них не способно совершить превращение энергии в таком масштабе, чтобы масса, сравнимая с массой Метагалактики, могла ускориться до скоростей хаббловского расширения. Процессы, способные к крупномасштабному превращению энергии, часто связывают с черными дырами.

Однако известно, что наибольшее выделение энергии происходит в квазарах. Поэтому, даже не ссылаясь на какую-либо конкретную модель квазара, можно предположить, что в прото-Метагалактике происходило выделение энергии, сходное с тем, которое наблюдается внутри квазаров.

Приняв некосмологическую интерпретацию наблюдаемых скоростей квазаров (разд. VI.4), мы установили, что внутри этих объектов должен действовать механизм, способный ускорить большие массы до релятивистских скоростей, характерных для квазаров и вырывающихся из них газовых облаков. Этот механизм может быть ответственным и за генерацию кинетической энергии хаббловского расширения.

Расчеты показывают, что требуемая для этого активность квазаров существенно больше, чем современная. Однако она не выглядит неразумно высокой. Фактически при такой активности в нашей Галактике, состоящей, скажем, из  $10^{10}$  солнечных масс, должна «расходоваться» примерно одна солнечная масса в течение года [56].

Если считать, что квазары возникают при столкновениях звезд, то в прото-Метагалактике, плотность которой в  $10^3$  больше, чем плотность современной Метагалактики, они должны происходить гораздо чаще.

### VI.5.3. Образование прото-Метагалактики

На основании вышеизложенного можно установить некоторые свойства прото-Метагалактики. В табл. VI.2 приведены некоторые возможные численные значения. Обсуждение других свойств прото-Метагалактики можно найти в работе [56]. Таким образом, мы приходим к заключению, что прото-Метагалактика не обязательно должна была возникнуть в результате «большого взрыва» сингулярности. Пути б) и в), описанные в разд. VI.5.1, тоже не исключаются, так как кинетическая энергия хаббловского расширения могла быть обусловлена активностью квазаров (или каким-либо подобным процессом), когда размер Метагалактики был равен  $R_{PM}$ . Преимущество такого предположения об источнике энергии состоит в том, что оно основывается на реально наблюдаемом явлении.

Таблица VI.2

#### Свойства прото-Метагалактики

Радиус	$R_{PM} = 5 \cdot 10^{24}$ м
Масса (равна современной массе, увеличенной менее чем на 50 %)	$M_{PM} = (0,3 \div 1,0) \cdot 10^{49}$ кг
Плотность	$\rho = (0,6 \div 2) \cdot 10^{-26}$ кг/м <sup>3</sup>
Параболическая скорость	$(2GM/R)^{1/2} = (1 \div 2) \cdot 10^7$ м/с $\sim 0,05 c$
Предел Лапласа — Шварцшильда	$R_{Sch} = 10^{22}$ м
Поправки общей теории относительности	$\approx R_{Sch}/R_{PM} \approx 1\%$
Поправки специальной теории относительности (за исключением явлений, связанных с квазарами)	$\approx \beta^2 \approx 25\%$

Любая попытка выяснить вопрос о том, как возникла сама прото-Метагалактика, немедленно заводит нас в дебри космологических спекулятивных рассуждений. Выяснение этого вопроса не входит в задачу данной монографии. В евклидовой модели время не ограничено, поэтому после выяснения состояния Метагалактики в какой-нибудь более ранний период времени сразу же встает проблема выяснения состояния в еще более ранний период. Чем дальше мы двигаемся назад во времени, тем меньше определенности в наших суждениях. Космология как естественная наука должна заниматься выяснением условий во все более отдаленных областях пространства и времени, обсуждение же возможной «первопричины» является предметом философии или религии.

Следует, однако, напомнить, что Клейн в свое время выдвинул предположение, согласно которому прото-Метагалактика образовалась в результате выпадения вещества в чрезвычайной большой, но конечной сфере, состоящей из однородной амбиплазмы (смеси коинновещества и антивещества). Такое предположение согласуется с возможностью в) из разд. VI.5.1, за исключением того факта, что модель Клейна является

однородной. Теперь мы знаем, что большинство старых однородных астрофизических моделей не верно и их следует заменить на неоднородные. Это важно учитывать, рассматривая нашу проблему, так как выпадение вещества и антивещества может происходить в любой период времени. Поэтому возможно, что такой процесс происходит в течение всей эволюции Метагалактики, как в ранние ее периоды, так и в более поздние, включая современный, когда основным динамическим процессом является хаббловское расширение.

#### VI.5.4. Другие космологические проблемы

Существует целый ряд других важных космологических проблем, которые рано или поздно следует разрешить с помощью евклидова подхода к космологии. Некоторые из них решаются непосредственно, если использовать принцип симметрии вещества и антивещества. Мы уже обсуждали проблемы *всплесков  $\gamma$ -излучения* (разд. VI.3.6) и *рентгеновского фонового излучения* (разд. VI.3.7.7). Эти явления объясняются в теории «большого взрыва» введением целого ряда сомнительных специальных предположений.

*Образование тяжелых элементов* может происходить в квазарах, где температура колеблется от обычных внутризвездных температур до исключительно высоких температур порядка 50 МэВ в электрон-позитронном газе, находящемся в слое Лейденфроста. В современных теориях требуются как относительно умеренные температуры внутризвездных областей, так и очень высокие температуры «большого взрыва» и сверхновых. Обе эти возможности осуществляются внутри квазаров.

Очень интересной проблемой иерархической космологии является проблема генерации *микроволнового излучения*. Как следует из табл. VI.1, выделяемой энергии вполне достаточно для генерации микроволнового излучения, так что основная проблема состоит в нахождении механизма превращения энергии, дающего чрезвычайно изотропное излучение. Из всех мыслимых механизмов, которые до сих пор серьезно не обсуждались, упомянем лишь один или два. Изотропность может быть результатом того, что превращение энергии происходит внутри какой-либо оболочки или коконообразной структуры. Мы знаем, что в результате взрыва новой или сверхновой вокруг них образуются расширяющиеся оболочки. Они состоят из пыли и газа, который, по-видимому, находится в молекулярном состоянии. Такие же оболочки были недавно обнаружены и вокруг галактик [57]. До сих пор неизвестно, содержат ли они частицы пыли или молекулы, которые могут изотропизировать микроволновое излучение. Вопрос о том, существуют ли еще большие оболочки, скажем окружающие скопления галактик или сверхскопления, остается открытым.

Во всем спектре электромагнитного излучения миллиметровый диапазон является наименее изученным. Еще рано говорить о теории микроволнового фонового излучения, соответствующего излучению абсо-

лотно черного тела при температуре 3 К, пока не выяснена структура и химический состав таких оболочек и не проведено тщательное исследование свойств миллиметрового излучения.

Другой предварительный подход к микроволновому фоновому излучению предложен в следующем разделе.

С развитием рентгеновской и  $\gamma$ -астрономии было обнаружено большое количество объектов высоких энергий. Часто считают, что источниками их энергии являются «черные дыры». Механизм излучения энергии из черных дыр чрезвычайно сложен. Поэтому нам кажется, что более вероятным источником энергии (по крайней мере во многих случаях) является аннигиляция.

## VI.6. ДРУГИЕ МЕТАГАЛАКТИКИ

Интересная особенность евклидовой космологии состоит в том, что она допускает наличие других метagalactic вблизи нашей. Евклидова космология принципиально допускает бесконечную Вселенную. (Конечно, открытая модель Фридмана тоже бесконечна с математической точки зрения, однако с физической точки зрения она конечна, так как в ней ничего не может существовать вне современного расстояния Хаббла.) Можно себе представить, что целый ряд метagalactic образует в иерархической космологии скопление более высокого порядка (которое было названо «терагалactic»). Если микроволновое излучение с плотностью  $1,5 \cdot 10^{-14} \text{ Дж/м}^3 = 1,4 \cdot 10^{-31} \text{ кг/м}^3$  заполняет не только Метagalactic, но и более удаленные области пространства, предел Лапласа – Шварцшильда будет достигнут при  $R = 3 \cdot 10^{28} \text{ м}$ . Следовательно, терагалactic таких размеров может оказаться замкнутой лишь за счет массы микроволнового излучения. В этой в высшей степени гипотетической модели евклидова геометрия неприменима для всей Вселенной, но применима лишь для ее отдельных малых частей, размеры которых порядка размеров метagalactic или немного больше.

## VI.7. ДИСКУССИЯ

Приверженцы теории «большого взрыва» часто утверждают, что евклидова космология должна быть обязательно «антропоцентричной», или «докоперниканской», поэтому с философской точки зрения она «несостоятельна». Это, возможно, справедливо по отношению к однородной евклидовой модели, но никак не относится к иерархической, поскольку в последней модели центр просто отсутствует.

Далее, в модели Коперника наша Земля занимает положение, близкое к центральному, так как ее расстояние от Солнца составляет всего одну десятую среднего расстояния планет от Солнца. Если положить, что внешняя граница Солнечной системы находится на расстоянии 40 а. е., то тогда получится, что радиус земной орбиты составляет всего

одну стотысячную часть этого расстояния. Если же в Солнечную систему включить и кометный резервуар, граница которого находится на расстоянии  $10^4 - 10^5$  а. е. от Солнца, то эта доля уменьшится до  $10^{-12} - 10^{-15}$ . То есть, говоря на языке приверженцев теории «большого взрыва», система Коперника тоже «неприятно антропоцентрична».

Более того, наше Солнце расположено в десять раз дальше от центра Галактики, чем средняя звезда. Наша Галактика тоже не занимает центрального положения в Местной группе галактик, которая в свою очередь находится на периферии нашего скопления галактик, а это скопление расположено далеко от центра нашего сверхскопления. Следовательно, даже если бы и был справедливым упрек в том, что евклидова модель отводит нашему сверхскоплению центральное положение в Метагалактике, то такую картину все равно нельзя было бы назвать антропоцентричной. Однако к евклидовой космологии неприменим даже этот упрек, так как мы знаем, что наше сверхскопление движется с довольно большой скоростью относительно микроволнового фона. Кроме того, относительная скорость может равняться нулю, если и сверхскопление, и фоновое излучение испытывают одинаковое расширение. Следует отметить, что в прото-Метагалактике значение интегральной концентрации по лучу зрения таково, что возможно некоторое взаимодействие между веществом и излучением.

Наконец, в евклидовой космологии ставится под сомнение вывод о том, что наша Метагалактика и есть вся Вселенная, как утверждают сторонники теории «большого взрыва». По-видимому, такая постановка вопроса вовсе не свидетельствует о стремлении сделать нашу Вселенную, реальную бесконечную Вселенную, более антропоцентричной.

## VI.8. ВЫВОДЫ

В первых четырех главах данной монографии был дан обзор тех существенных изменений в теории космической плазмы, которые были вызваны либо результатами локальных измерений в космосе, либо переносом результатов лабораторных исследований в космическую физику. Плазменные явления следует описывать не только с помощью моделей топологии магнитных полей, но и непосредственно с учетом электрических токов и цепей, по которым эти токи протекают. Указанный пересмотр физики космической плазмы не может относиться только к тем областям пространства, которые доступны для локальных измерений, но должен рано или поздно затронуть и более удаленные области. Были рассмотрены некоторые следствия такого пересмотра применительно к различным проблемам, включая проблему образования Солнечной системы (гл. V).

В последней главе мы рассмотрели вопрос о том, каковы следствия (если таковые имеются) указанного пересмотра космической физики для космологии. Было получено два важных вывода.

1) Формализм электрических токов подчеркивает взаимодействие ме-

жду токами, приводящее к появлению неоднородной структуры. Если к этому добавить, что и гравитационным силам свойственна такая же тенденция, то можно сделать вывод, что *неоднородные модели должны играть определяющую роль в астрофизике*. Наблюдения недвусмысленно подтверждают этот вывод. Более того, однородные модели нередко приводят к неверным результатам даже в первом приближении.

Наиболее важной областью астрофизики, где однородные модели считаются общепринятыми, является космология. Действительно, модель Фридмана, объясняющая хаббловское расширение, является *однородной* и, более того, *четырёхмерной*. Показано, что не существует данных наблюдений, свидетельствующих в пользу обязательности такой модели. Свойства нашей Метагалактики («Вселенной») описываются более адекватно с помощью *неоднородных евклидовых моделей* типа тех, которые обычно используются в других областях астрофизики.

2) Независимо от критики гипотезы «большого взрыва» обсуждается вопрос о возможной симметрии Вселенной относительно вещества и антивещества. Открытие ячеистой структуры пространства и иерархического распределения плотности в Метагалактике, по-видимому, свидетельствует в пользу такой симметрии.

Анализ, проведенный в данной монографии, можно рассматривать как попытку выяснить вопрос о том, до какой степени можно разобратся в наблюдаемых космических явлениях, не вводя новых основных физических законов. Нам кажется, что ни одно из обнаруженных до сих пор явлений не требует для своего объяснения новых законов. Основные свойства плазмы, по-видимому, везде одинаковы, начиная с лаборатории и кончая областями, удаленными от нас на расстояние Хаббла.

# ЛИТЕРАТУРА

## Глава I

1. *Birkeland K.* The Norwegian Polaris Expedition 1902–1903, Vol. 1, Sect. 1, Aschehoug, Oslo, 1908.
2. *Dessler A. J.* Chapman Conference on Magnetospheric Boundary Layers, Historical Review, Alpbach, 1979.
3. *Potemra T. A.* *Astrophys. Space Sci.* **58**, 207, 1978.
4. *Akasofu S.-I. and Chapman, S.* *Solar-Terrestrial Physics*, Clarendon Press, Oxford, 1972. [Имеется перевод: Акасофу С. И., Чепмен С. Солнечно-земная физика. — М.: Мир, 1975.]
5. *Fälthammar C.-G.* *Space Sci. Rev.* **15**, 803, 1974.
6. *Block L. P.* In: *Williams D. J. (ed.), Physics of Solar Planetary Environments*, Proc. AGU Symp., Boulder, Col., 1976.
7. Nagoya University Institute of Plasma Physics, Research Report, Workshop on Relation Between Laboratory and Space Plasmas, IPPJ-286, Nagoya, Japan, 1977.
8. Nagoya University Institute of Plasma Physics Research Report, Second Workshop on Relation Between Laboratory and Space Plasmas with Particular Reference to the Heliosphere, IPPJ-365, Nagoya, Japan, 1979.
9. *Alfvén H., Fälthammar C.-G.* *Cosmical Electrodynamics*, Int. Series of Monographs on Physics, Clarendon Press, Oxford, 1963. [Имеется перевод: Альвен Г., Фельтхаммар К.-Г. Космическая электродинамика. М.: Мир, 1967.]
10. *Siscoe G. L.* In: *Batrick B. (ed), Magnetospheric Boundary Layers*, Proc. Chapman Conf., Alpbach, June 1979, European Space Agency SP-148, Noordwijk, Holland, 1979.
11. *Wurm, K.* In: *Middlehurst B. M., Kuiper G. P. (eds), The Moon, Meteorites and Comets*, Univ. of Chicago Press, Chicago, 1963.
12. *Mendis D. A.* *The Moon and the Planets* **18**, 361, 1978.
13. *Alfvén H. and Arrhenius G.* *Evolution of the Solar System*, NASA Sp.-345, Washington, D. C, 1976. [Имеется перевод: Альвен Х., Аррениус Г. Эволюция Солнечной системы. — М.: Мир, 1979.]
14. *Motley R. W.* *Q Machines*, Academic Press, New York, 1975.
15. *Krall N. A. and Trivelpiece A. W.* *Principles of Plasma Physics*, International Series in Pure and Applied Physics, McGraw-Hill, New York, 1973.
16. *Fälthammar C.-G., Akasofu S.-I. and Alfvén H.* *Nature* **275**, 185, 1978.
17. *Кадомцев Б. Б.* Турбулентность плазмы. — В кн.: *Вопросы теории плазмы; Под ред. М. А. Леонтовича*, т. 4 — М.: Атомиздат, с. 188, 1964.

## Глава II

1. *Giovanelli R. G.* *Phil. Mag.* **40**, 206, 1949.
2. *Dreicer H.* *Phys. Rev.* **115**, 238, 1959.
3. *Dreicer H.* *Phys. Rev.* **117**, 329, 1960.

4. *Alfvén H. and Fälthammar C.-G.* Cosmical Electrodynamics, Int. Series of Monographs on Physics, Clarendon Press, Oxford, 1963. [Имеется перевод: Альвен Г., Фельтхаммар К.-Г. Космическая электродинамика. М.: Мир, 1967.]
5. *Wolf R. A.* Space Sci. Rev. **17**, 537, 1975.
6. *Alfvén H.* Rev. Geophys. Space Phys. **15**, 271, 1977.
7. *Heikkila W. J.* Planet. Space Sci. **26**, 121, 1978.
8. *Mendis D. A.* The Moon and the Planets **18**, 361, 1978.
9. *von Engel A. and Steenbeck M.* Elektrische Gasentladungen, I, Springer, Berlin, 1932.
10. *von Engel A. and Steenbeck M.* Elektrische Gasentladungen, II, Springer, Berlin, 1934.
11. *Bennett W. H.* Phys. Rev. **45**, 890, 1934.
12. *Murty G. S.* Ark. f. Fysik **21**, 203, 1961.
13. *Marklund G.* TRITA-EPP-78-09, Royal Inst. of Technology, Stockholm, 1978.
14. *Elphic R. C., Russell C. T., Slavin J. A. and Brace L. H.* 'Observations of the dayside ionopause and ionosphere of Venis', (submitted to J. Geophys. Res.), 1979.
15. *Hill T. W. J.* Geophys. Res. **80**, 4689, 1975.
16. *Coakley P., Hershkovitz N., Hubbard R. and Joyce G.* Phys. Rev. Letters **40**, 230, 1978.
17. *DeGroot J. S., Barnes C., Waltstead A. E., and Buneman O.* Phys. Rev. Lett. **38**, 1283, 1977.
18. *Hubbard R. F. and Joyce G. J.* Geophys. Res. **84**, 4297, 1979.
19. *Leung P., Wong A. Y. and Quon B. H.* Phys. Fluids **22**, No. 12, 1979.
20. *Quon B. H. and Wong A. Y.* Phys. Rev. Letters **37**, 1393, 1976.
21. *Block L. P.* Astrophys. Space Sci. **55**, 59, 1978.
22. *Fälthammar C.-G.* Invited lecture for the Workshop on Acceleration Mechanisms in Astrophysics, La Jolla, January 1979, TRITA-EPP-78-17, Royal Institute of Technology, Stockholm, 1979.
23. *Torvén S.* In: Parmadesso P. and Papadopoulos K. (eds.), Wave Instabilities in Space Plasmas, Proc. URSI Symp., Helsinki, August 1978, Reidel, Dordrecht, Holland, 1979.
24. *Torvén S.* Proc. Int. Conf. on Plasma Physics, invited paper. Nagoya, April 1980 (in press), 1980.
25. *Carlqvist P.* In: Palmadesso P. and Papadopoulos K. (eds.), Wave Instabilities in Space Plasmas, Proc. URSI Symp., Helsinki, August 1978, Reidel, Dordrecht, Holland, 1979.
26. *Лутченко Е. И., Середа Н. Д., Концовой Л. М.* ЖТФ, **45**, 789, 1975.
27. *Coakley P., Johnson L. and Hershkovitz N.* Phys. Lett. **70A**, 425, 1979.
28. *Torvén S. and Andersson, D. J.* Phys. D. Appl. Phys. **12**, 717, 1979.
29. *Baker K. D., Block L. P., Kist R., Kampa W., Singh N., Thiemann H.* (submitted to J. Plasma Phys.), 1980.
30. *Carlqvist P.* Solar Phys. **7**, 377, 1969.
31. *Block L. P.* Cosmic Electrodyn. **3**, 349, 1972.
32. *Torvén S. and Lindberg L.* TRITA-EPP-80-02, Royal Institute of Technology, Stockholm, 1980.
33. *Andersson D., Babic M., Sandahl S., and Torvén S.* Proc. 9th Int. Conf. on Phen. in Ionized Gases, Editura Academii Republicii Socialista Romania, Bucharest, 1969.

34. *Shawhan S. D., Fälthammar C.-G. and Block L. P.* J. Geophys. Res. **83**, 1049, 1978.
35. *Lennartsson W.* TRITA-EPP-79-16, Royal Institute of Technology, Stockholm (accepted for publication in Planetary Space Sci.), 1979.
36. *Spicer D. S.* Solar Phys. **53**, 305, 1977.
37. *Carlqvist P.* Cosmic Electrodyn, **3**, 377, 1972.
38. *Carlqvist P.* TRITA-EPP-73-05, Royal Institute of Technology, Stockholm, 1973.
39. *Carlqvist P.* Solar Phys. **63**, 353, 1979.
40. *Boström R.* In: McCormac B. V. (ed.), Magnetospheric Physics, Reidel, Dordrecht, Holland, 1974.
41. *Ip W.-H. and Mendis D. A.* Icarus **29**, 147, 1976.
42. *Gurnett D. A.* In: Dyer E. R. (ed.), Critical Problems of Magnetospheric Physics, Proc. Joint COSPAR, IAGA, URSI Symp., Madrid, May 1972, IUCSTP, Washington, D. C., 1972.
43. *Mozer F. S., Carlson C. W., Hudson M. K., Torbert R. B., Parady B., Yatteau I., and Kelly M. C.* Phys. Rev. Letters **38**, 292, 1977.
44. *Maynard N. G.*, Geophys. Res. Lett. **5**, 617, 1978.
45. *Smiddy M., Kelley M. C., Curke W., Rich F., Sagalyn R., Shuman B., Hays R., and Lai S.* Geophys. Res. Lett. **4**, 543, 1977.
46. *Marklund G., Block L. and Lindqvist P.* - A. TRITA-EPP-79-22, Royal Institute of Technology, Stockholm, 1979.
47. *Haerendel G., Rieger E., Valenzuela A., Föppl H., Stenbaek-Nielson H. C., and Wescott E. M.* European Programmes on Sounding-Rocket and Balloon Research in the Auroral Zone. European Space Agency SP-115, Noordwijk, Holland, 1976.
48. *Wescott E. M., Stenbaek-Nielson H. C., Hallinan T. J., Davis T. N. and Peek H. M. J.* Geophys. Res. **81**, 4495, 1976.
49. *Block L. P. and Fälthammar C.-G. J.* Geophys. Res. **73**, 4807, 1968.
50. *Marklund G.* Nature **277**, 370, 1979.
51. *Boström R.* In: Hultqvist B. and Stenflo L. (eds.), Physics of the Hot Plasma in the Magnetosphere, Plenum Press, New York, 1975.
52. *Heikkila W. J.* In: Hultqvist B. and Stenflo L. (eds.), Physics of the Hot Plasma in the Magnetosphere, Plenum Publ. Co., New York, 1975.
53. *Heikkila W. J. and Block L. P.* Geophysica **14**, 2, 1977.
54. *Smith E.* In: Battrick B. (ed.), Magnetospheric Boundary Layers, Proc. Chapman Conf., Alpbach, June 1979, European Space Agency SP-148, Noordwijk, Holland, 1979.
55. *Akasofu S.-I., Lee L. C. and Gray P. C.* A model of the interplanetary magnetic field configuration, (private communication), 1979.
56. *Gringauz K. I.* Proc. COSPAR Symp. on Planetary Magnetospheres, Budapest, June 1980, 1980.
57. *Kan J. R., Akasofu S.-I. and Lee L. C.* In: Akasofu S.-I. (ed.), Dynamics of the Magnetosphere, Proc. Chapman Conf., Los Alamos, October 1978, Reidel, Dordrecht, Holland, 1980.
58. *Dungey J. W.* Phys. Rev. Letters **6**, No. 2, 47, 1961.
59. *Dungey J. W.* Space Sci. Rev. **4**, 199, 1964.
60. *Fälthammar C.-G., Akasofu S.-I. and Alfvén H.* Nature **275**, 185, 1978.
61. *Russell C. T., Elphic R. C. and Slavin J. A.* In: Battrick B. (ed.), Magnetospheric Boundary Layers, Proc. Chapman Conf., Alpbach, June 1979, European Space Agency SP-148, Noordwijk, Holland, 1979.

## Глава III

1. *Block L. P. and Fälthammar C.-G.* Ann. Geophys. **32**, 161, 1976.
2. *Ohyabu N., Okomura S. and Kawashima N.* Phys. Fluid **17**, 2009, 1974.
3. *Alfvén H. and Fälthammar C.-G.* Cosmical Electrodynamics, Clarendon Press, Oxford, 1963. [Имеется перевод: *Альвен Г., Фельтхаммар К.-Г.* Космическая электродинамика. — М.: Мир, 1967.]
4. *Zmuda A. J. and Armstrong J. C.* J. Geophys. Res. **79**, 4611, 1974.
5. *Potemra T. A.* Rev. Geophys. Space Phys. **17**, 640, 1979.
6. *Potemra T. A., Iijima T., and Saflekos N. A.* In: Akasofu S. I. (ed.), Dynamics of the Magnetosphere, Proc. Chapman Conf., Los Alamos, October, 1978, Reidel, Dordrecht, Holland, 1980.
7. *Krimigis S. M., Venkatesan D., Barichello J. C. and Sarris E. T.* Geophys. Res. Lett. **5**, 961, 1978.
8. *Boström C. O., Sarris E. T., Krimigis S. M., Iijima T., and Armstrong T. P.* EOS: Trans. AGU **57**, 314, 1976.
9. *Alfvén H. and Arrhenius G.* Evolution of the Solar System, NASA SP-345, Washington, D. C., 1976. [Имеется перевод: *Альвен Х., Аррениус Г.* Эволюция Солнечной системы. — М.: Мир, 1979.]
10. *Burlaga L. F., Lemaire J. F., and Turner J. M. J.* Geophys. Res. **82**, 3691, 1977.
11. *Rosenberg R. L. and Coleman P. J., Jr.* J. Geophys. Res. **74**, 5611, 1969.
12. *Rosenberg R. L.* Solar Phys. **15**, 72, 1970.
13. *Rosenberg R. L., Kivelson M. G., and Hedgecock P. C.* J. Geophys. Res. **82**, 1273, 1977.
14. *Smith E. J., Tsurutani B. T., and Rosenberg R. L.* EOS Trans. AGU **57**, 997, 1977.
15. *Hargrave P. J. and Ryle M.* Monthly Notices Roy. Astro. Soc. **166**, 305, 1974.
16. *Alfvén H.* Astrophys. Space Sci. **54**, 279, 1979.
17. *Boström R.* In: McCormac B. M. (ed.), Magnetospheric Physics, Reidel, Dordrecht, Holland, 1974.
18. *Mende S. B., Eather R. H. and Weber E. J.* In: Akasofu S.-I. (ed.), Dynamics of the Magnetosphere, Proc. Chapman Conf., Los Alamos, October 1978, Reidel, Dordrecht, Holland, 1980.
19. *Mendis D. A.* The Moon and the Planets **18**, 361, 1978.
20. *Gringauz K. I.* Proc. COSPAR Symp. on Planetary Magnetospheres, Budapest, June 1980, 1980.
21. *Elphic R. C., Russell C. T., Slavin J. A., and Brace L. H.* Observations of the dayside ionopause and ionosphere of Venus, J. Geophys. Res., **85**, NA 13, 7679, 1980.
22. *Cole K.* Planet. Space Sci. **22**, 1975, 1974.
23. *Cole K. A. G.* U. Chapman Symposium, Yosemite, Feb. 1976, 1976.
24. *Alfvén H.* In: Battrick B. (ed.), Magnetospheric Boundary Layers, Proc. Chapman Conf., Alpbach, June, 1979, European Space Agency SP-148, Noordwijk, Holland, 1979.
25. *Alfvén H.* Kungl. Sv. Vet.-Akademiens Handl. (3), **18**, No. 3, 1939.
26. *Alfvén H.* Tellus **7**, 50, 1955.
27. *Armstrong J. C.* In: McCormac B. M. (ed.), Magnetospheric Physics, Reidel, Dordrecht, Holland. Baum, P.J., Bratenahl, and Kamin, G. Astrophys. J. **226**, 286, 1974.
28. *Dungey J. W.* Phys. Rev. Letters **6**, 47, 1961.
29. *Dungey J. W.* Space Sci. Rev., **4**, 199, 1964.

30. *Lennartson W.* *Astrophys. Space Sci* **51**, 461, 1977.
31. *Whipple E. C., McIlwain C. E. and Alfvén H.* A three-ring circuit model of the magnetosphere, *Astrophys and Space Sci.*, **76**, N 1, 35–47, 1981.
32. *Alfvén H. and Carlqvist P.* *Solar Phys.* **1**, 220, 1967.
33. *Moreton G. E. and Severny A. B.* *Solar Phys.* **3**, 282, 1968.
34. *Carlqvist P.* *Solar Phys.* **7**, 220, 1969.
35. *Carlqvist P.* TRITA-EPP-73-05, Royal Institute of Technology, Stockholm, 1973.
36. *Heyvaerts J. J. de Physique*, suppl. Colloque 7, **40**, C7-37, 1979.
37. *Carlqvist P. and Alfvén H.* *Astrophys. Space Sci.* (in press), 1980.

## Глава IV

1. *Lindberg L. and Kristoferson L.* *Cosmic Electrodyn.* **2**, 305, 1971.
2. *Lindberg L.* *Astrophys. Space Sci.* **55**, 203, 1978.
3. *Tanaka U., et al.* *Physical Soc. Japan* **32**, No. 2, 1972.
4. *Komori A., Sato N., Sugai H., and Hatta Y.* *Plasma Physics* **19**, 283, 1977.
5. *Lehnert B.* *Nuclear Fusion* **8**, 173, 1968.
6. *Lehnert B.* *Cosmic Electrodyn.* **1**, 397, 1970.
7. *Lehnert B.* *Nuclear Instr. and Methods* **129**, 31, 1975.
8. *Hirschberg J.* *Rev. Geophys. Space Phys.* **11**, 115, 1973.
9. *Zwickl R. D., Roelof E. C., Gold R. E., Krimigis S. M., and Armstrong T. P.* *Astrophys. J.*, **225**, 281, 1978.
10. *Briggs P. R., Armstrong T. P. and Krimigis S. M.* *Astrophys. J.* **228**, L83, 1979.
11. *Lehnert B.* *Astrophys. Space Sci* **49**, 225, 1976.
12. *Fisk L. A.* *Astrophys. J.* **224**, 1048, 1973.
13. *Цытович В. Н.*, Теория турбулентной плазмы — М.: Атомиздат, — 1971.
14. *Heikkila W. J., Dyer E. R.* (ed.), *Critical Problems of Magnetospheric Physics*, Proc. Joint COSPAR, IAGA, URSI Symp., Madrid, May 1972, IUCSTP, Washington, D. C., 1972.
15. *Risbeth H. and Garriott O. K.*: *Introduction to Ionospheric Physics*, Academic Press, N. Y., p. 1.
16. *Belcher J. W., and Davis J. R. J.* *Geophys. Res.* **76**, 3534, 1971.
17. *Hollweg J. V.* *Rev. Geophys. Space Phys.* **13**, 263, 1975.
18. *Кадомицев Б. Б.*, Турбулентность плазмы. — В кн.: Вопросы теории плазмы; под ред. М. А. Леонтовича, т. 4, М.: Атомиздат, с. 188, 1964.
19. *Alfvén H. and Arrhenius G.* *Evolution of the Solar System*, (ESS), NASA SP-345, Washington, D. C., 1976. [Имеется перевод: Альвен Х., Аррениус Г. Эволюция Солнечной системы. — М.: Мир, 1979.]
20. *Srnka L. J. and Merrill R. B.* (eds.) *Phys. Earth Planet. Inter.* **20**, Nos. 2–4, 1979.
21. *Lindberg L., Witalis E. and Jacobsen C. T.* *Nature* **185**, 452, 1960.
22. *Lindberg L. and Jacobsen C.* *Astrophys. J.* **133**, 1043, 1961.
23. *Alfvén H.* *Tellus* **6**, 74, 1950.
24. *Alfvén H.* *Astrophys. J.* **133**, 1049, 1961.
25. *Alfvén H. and Fälthammar C.-G.* *Cosmical Electrodynamics*, Int. Series of Monographs on Physics, Clarendon Press, Oxford, 1963. [Имеется перевод: Альвен Г., Фельтхаммар К.-Г. Космическая электродинамика. — М.: Мир, 1967.]
26. *Alfvén H. and Lindberg L.* *The Moon* **10**, 323, 1974.
27. *Fowler T. K. and Coensgen F. H.* 9th Eur. Conf. Controlled Fusion and Plasma Physics, Invited paper, Oxford, Sept., 1979, 1979.

28. *Goldenbaum G. C., Irby I. H., Chong Y. P. and Hart G.* 9th Eur. Conf. Controlled Fusion and Plasma Physics, Contributed paper, Oxford, Sept., 1979.
29. *Alfvén H.* Stockholm Observatoriums Annaler **14**(2), 3, 1942.
30. *Danielsson L.* Phys. Fluids **13**, 2288, 1970.
31. *Danielsson L.* Astrophys. Space Sci **24**, 459, 1973.
32. *Himmel G., Möbius E. and Piel A.* Z. Naturforsch. **31a**, 934, 1976.
33. *Himmel G., Möbius E. and Piel A.* Z. Naturforsch. **32a**, 577, 1977.
34. *Möbius E., Piel A. and Himmel G.* Z. Naturforsch **34a**, 405, 1979.
35. *Axnäs I.* Astrophys. Space Sci. **55**, 139, 1978.
36. *Axnäs I.* 'Experimental Comparison of the Critical Velocity in Atom and Molecular Gases', TRITA-EPP-78-09, Royal Inst. of Technology, Stockholm, 1978.
37. *Sherman J. C.* Astrophys. Space Sci. **24**, 487, 1973.
38. *Raadu M. A.* TRITA-EPP-75-28, Royal Inst. of Technology, Stockholm, 1975.
39. *Raadu M. A.* Astrophys. Space Sci. **55**, 125, 1978.
40. *Varma R. K.* Astrophys. Space Sci. **55**, 113, 1978.
41. *Piel A., Möbius E. and Himmel G.* Astrophys. Space Sci. (in press), 1980.
42. *Lehnert B.* Phys. Fluids **10**, 2216, 1967.
43. *Möbius E., Boswell R. W., Piel A. and Henry D.* Geophys. Res. Lett **6**, 29, 1979.
44. *Freeman J. W., Fenner M. A., Lindeman R. A., Medrano R. and Meister J.* Icarus **16**, 328, 1972.
45. *Lindeman R. A., Vondrak, R. R., Freeman, J. W. and Snyder C. W.* J. Geophys. Res. **79**, 2287, 1974.
46. *Gold T. and Soter S.* Planet. Space Sci **24**, 45, 1976.
47. *Srnka L. J.* Phys. Earth Planet. Inter. **14**, 321, 1977.
48. *Mendis D. A. and Ip W.-H.* Space Sci. Rev. **20**, 145, 1977.
49. *Petelski E. F., Brenning N., Ripken H. W., Fahr H. J. and Axnäs I.* 'Enhanced interaction of the solar wind and the interstellar neutral gas by virtue of a critical velocity effect', Astron. Astrophys. (in press.), 1980.
50. *Raadu M. A.* Proc. Int. Workshop on Relation Between Laboratory and Space Plasma, Tokyo, April 1980, 1980.
51. *Mendis D. A.* Astrophys. Space Sci. **65**, 5, 1979.
52. *Hill J. R. and Mendis D. A.* Moon and the Planets **21**, 3, 1979.
53. *Hill J. R. and Mendis D. A.* 'Charged dust in outer planetary magnetospheres. II: Trajectories and spatial distribution', Moon and the Planets (in press), 1980.
54. *De Forest S. E. J.* Geophys. Res. **77**, 651, 1972.
55. *Reasoner D. L., Lennartsson W., Chappell C. R., Rosen A.* (eds.) Spacecraft Charging by Magnetospheric Plasmas, Amer. Inst. of Aeronautics & Astronautics, N. Y., p. 89, 1976.
56. *Rose D. J. and Clark M. Jr.* Plasmas and Controlled Fusion, MIT Press, Cambridge, Mass., p. 331, 1961.
57. *Murty G. S.* Ark. f. Fysik **21**, 203, 1962.
58. *Bennett W. H.* Phys. Rev. **45**, 890, 1934.
59. *Alfvén H.* Rev. Geophys. Space Phys. **15**, 271, 1977.
60. *Morgan D. L. and Hughes V. W.* Phys. Rev. **D2**, 1389, 1970.
61. *Alfvén H. and Klein O.* Ark. f. Fysik **23**, 187, 1962.
62. *Thompson W. B.* Astrophys. Space Sci. **55**, 15, 1978.
63. *Schlüter V. A.* Z. Naturforsch. **12a**, 822, 1975.
64. *Fälthammar C.-G.* In: B. Peters (ed.), Proc. Int. School of Physics «Enrico Fermi», Course XIX, Academic Press, New York, 1963.

## Глава V

1. *Alfvén H. and Carlqvist P.* *Astrophys. Space Sci.* **54**, 279, 1978.
2. *Alfvén H. and Arrhenius G.* *Evolution of the Solar System*, NASA SP-345, Washington, D. C., 1976. [Имеется перевод: *Альвен Х., Аррениус Г.* Эволюция Солнечной системы. — М.: Мир, 1979.]
3. *Сафронов В. С.* Эволюция планетного облака и образование Земли и планет. — М.: Наука, 1969.
4. *Reeves H. (ed.)* *Proc. Symp. on the Origin of the Solar System*, CNRS, Paris, 1972.
5. *Gehrels T. (ed.)* *Protostars and Planets*, U. of Arizona Press, Tucson, 1978. [Имеется перевод: Протозвезды и планеты/Под ред. Т. Герелса. — М.: Мир, 1982.]
6. *Prentice A. J. R.* *Astron. Astrophys.* **50**, 59, 1976.
7. *Alfvén H.* *Stockholm Observatorium Annaler*, I 14, No. 2, 1942.
8. *De B.* *Moon and the Planets* **18**, 339, 1978.
9. *Larson R. B.* in *T. Gehrels (ed.)*, *Protostars and Planets*, U. of Arizona Press, Tucson, 1978. [Имеется перевод: Протозвезды и планеты/Под ред. Герелса Т. — М.: Мир, 1982.]
10. *Horedt G. P.* *Astrophys. Space Sci.* **45**, 353, 1976.
11. *Cameron A. G. W.* in *S. F. Dermott (ed.)*, *Origin of the Solar System*, Proc. NATO Adv. Study Inst. Newcastle upon Tyne, March, 1976, Wiley, New York, 1978.
12. *Goldreich P. and Ward W. E.* *Astrophys. J.* **183**, 1051, 1973.
13. *Alfvén H.* *Stockholm Observatorium Annaler*, II 14, No. 5, 1943.
14. *Alfvén H.* *Stockholm Observatorium Annaler*, III 14, No. 9, 1946.
15. *Alfvén H.* *On the Origin of the Solar System*, Oxford University Press, Oxford, 1954.
16. *Alfvén H.* *Astrophys. J.* **137**, 981, 1963.
17. *Alfvén H. and Wilcox J. M.* *Astrophys. J.* **136**, 3, 1962.

## Глава VI

1. *Jastrow R.* *God and the Astronomers*, Norton & Co., New York, 1978.
2. *Sciama D. W.* *Modern Cosmology*, Cambridge University Press, Cambridge, 1971.
3. *Weinberg S.* *The First Three Minutes*, Basic Books, New York, 1977.
4. *Ambartzumian V. A.* in *R. Stoops (ed.)*, *Onzieme Conseil de Physique Solvay Bruxelles*, 1958.
5. *Арт Г.* Выбросы из галактик и образование галактик. — В сб.: Вопросы физики и эволюции космоса; под ред. Л. В. Мирзояна. — Академия наук Армянской ССР, Ереван, 1978, с. 81.
6. *de Vaucouleurs G.* *Science*, **167**, 1203, 1970.
7. *Fälthammar C.-G., Akasofu S.-I. and Alfvén H.* *Nature* **275**, 185, 1978.
8. *Fresnel A.* *Oeuvres complètes d'Augustin Fresnel* (Publ. par de Senarmont, Verdet et Fresnel), Impr. Impériale, Paris, 1826.
9. *Sandage A., Tammann G. A. and Hardy E.* *Astrophys. J.* **172**, 253, 1972.
10. *Groth E. J., Peebles P. J. E., Seldner M. and Soneira R. M.* *Sci. American*, Nov. 1977, 76, 1977.
11. *Groth E. J. and Peebles P. J. E.* *Astrophys. J.* **217**, 385, 1977.
12. *Fry J. N. and Peebles P. J. E.* *Astrophys. J.* **221**, 19, 1978.
13. *Tarenghi M., Chincarini G., Rood H. J. and Thompson, L. A.* *Astrophys. J.* **235**, 724, 1980.

14. *Gott J., Gunn E., Schramm N. and Tinsley M.* *Astrophys. J.* **194**, 543, 1974.
15. *de Vaucouleurs G. and Bollinger J.* *Astrophys. J.* **233**, 433, 1979.
16. *Kristian J., Sandage A. and Westphal J. A.* *Astrophys. J.* **221**, 383, 1978.
17. *Sandage A., Tammann G. A. and Yahil A.* *Astrophys. J.* **232**, 352, 1979.
18. *Bonnevier B.* Private communication; 1980, TRITA-EPP (in press), 1978.
19. *Alfvén H.* *Rev. Modern Physics* **37**, **4**, 652, 1965.
20. *Alfvén H.* *Physics Today* **24**, **(2)**, 28, 1971.
21. *Alfvén H. and Klein O.* *Arkiv för fysik* **23**, 187, 1962.
22. *Lehnert B.* *Astrophys. Space Sci* **46**, 61, 1977.
23. *Nezhinskij E. M.* In G. A. Chebatorev, E. I. Kazimirchak-Polonskaya, and B. G. Marsden (eds.), 'The Motion, Evolution of Orbits, and Origin of Comets', IAU Symp. 45, 1972.
24. *Steigman G.* *Nature*, **262**, 821, 1976.
25. *Steigman G.* *Annual Reviews*, 339, 1976.
26. *Rogers S. and Thompson W. B.* *Astrophys. Space Sci.* (in press), 1980.
27. *Alfvén H.* In G. Ekspog and S. Nilsson (eds.), *Antinucleon-Nucleon Interactions* (Wenner-Gren Volume 29), Pergamon Press, Oxford, 1977.
28. *Elvius A.* In D. S. Evans (ed.), 'External Galaxies and Quasi Stellar Objects', IAU Symp. **44**, 306, 1970.
29. *Omnès R.* *Astron. Astrophys.* **10**, 228, 1971.
30. *Lehnert B.* *Astrophys. Space Sci.* **53**, 459, 1978.
31. *Sofia S. and Van Horn H. M.* *Astrophys. J.* **194**, 593, 1974.
32. *Sofia S. and Van Horn H. M.* *Ann. N. Y. Acad. Sci.* **262**, 197, 1975.
33. *Vincent J. R.* TRITA-EPP-76-12, Royal Institute of Technology, Stockholm, 1976.
34. *Dohnanyi J. S.* in H. Elasser and H. Fechtig (eds.), *Interplanetary Dust and Zodiacal Light*, Springer-Verlag, 1976.
35. *White R. S., et al.* *Nature*, **271**, 635, 1978.
- 36a. *Thompson W. B.* Частное сообщение 1978.
- 36b. *Thompson W. B.* *Astrophys. Space Sci.* **55**, 15, 1978.
37. *Alfvén H.* *Astrophys. Space Sci.* **64**, 401, 1979.
38. *Burbidge G. R., et al.* *Astrophys. J.* **193**, 43, 1974.
39. *Physica Scripta* **17**, No. 3, 1978.
40. *Spitzer L. and Saslaw W. C.* *Astrophys. J.* **143**, 400, 1966.
41. *Mathis J. S.* *Astrophys. J.* **147**, 1050, 1967.
42. *Colgate S. A.* *Astrophys. J.* **150**, 1967.
43. *Sanders R. H.* *Astrophys. J.* **162**, 791, 1970.
44. *Seidl F. G. P. and Cameron A. G. W.* *Astrophys. Space Sci.* **15**, 44, 1972.
45. *Saslaw W. C.* In A. Hayli (ed.), 'Dynamics of Stellar Systems', IAU Symp. **69**, 379, 1975.
46. *Burbidge E. M., et al.* *Astrophys. J.* **219**, 400, 1978.
47. *Readhead A. C. S., Cohen M. H. and Blandford R. D.* *Nature*, **272**, 131, 1978.
48. *Pearson T. J., Readhead A. C. S. and Wilkinson P. N.* *Astrophys. J.* **236**, 714, 1980.
49. *Carlqvist P. and Laurent B.* *Nature* **260**, 225, 1976.
50. *Carlqvist P. and Laurent B.* *Nature* **262**, 822, 1976.
51. *Arp H.* *Science* **151**, 1214, 1966.
52. *Arp H.* In *Colloq. Int. No. 263*, CNRS, Paris, 1977.
53. *Burbidge G. R.* *Nature Physical Science* **246**, 17, 1973.
54. *Burbidge G. R.* *Nature* **282**, 451, 1979.
55. *Smith H. E., et al.* *Astrophys. J.* **231**, 307, 1979.
56. *Alfvén H.* *Astrophys. Space Sci.* **66**, 23, 1979.
57. *Malin D. F. and Carter D.* *Nature* **285**, 643, 1980.

# ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие редактора перевода . . . . .	5
Предисловие . . . . .	7
<b>Глава I. Обзор . . . . .</b>	<b>8</b>
I.1. Экспериментальный и теоретический подходы к физике плазмы . . . . .	8
I.2. Плазменные явления в лаборатории и космическом пространстве . . . . .	11
I.2.1. Преобразования подобия . . . . .	13
I.2.2. Модельные эксперименты . . . . .	13
I.2.3. Сопоставление лабораторных и космических исследований . . . . .	14
I.3. Описание плазмы с помощью полей и частиц . . . . .	14
I.4. Современное состояние классической теории . . . . .	16
I.5. Граничные условия. Влияние внешней цепи . . . . .	18
I.6. Проблемы космологии и происхождения Солнечной системы . . . . .	18
I.7. Цели данной монографии . . . . .	19
<b>Глава II. Электрические токи в космической плазме . . . . .</b>	<b>20</b>
II.1. Дуализм в физике . . . . .	20
II.2. Плазменные явления, описываемые на языке частиц . . . . .	21
II.3. Магнитные силовые линии . . . . .	22
II.3.1. Описания магнитосферы на языках магнитных полей и электрических токов . . . . .	23
II.3.2. Движение частиц в магнитосфере . . . . .	25
II.3.3. Выводы относительно «пересоединения магнитных силовых линий» и «слияния магнитных полей» в стационарной магнитосфере . . . . .	26
II.4. Волокнистые структуры . . . . .	26
II.4.1. Наблюдения волокнистых структур . . . . .	26
II.4.2. Сжимающийся разряд . . . . .	33
II.4.3. Пинч-эффект. Соотношение Беннетта . . . . .	34
II.4.4. Нитевидные токи в бессиловых магнитных полях . . . . .	35
II.4.5. Теория «магнитных жгутов» . . . . .	38
II.4.6. «Ионные насосы» . . . . .	39
II.4.7. «Магнитные жгуты» в ионосфере Венеры . . . . .	39
II.5. Локальные свойства плазмы и эквивалентные цепи . . . . .	39
II.5.1. Граничные условия . . . . .	41
II.5.2. «Невидимая» передача энергии . . . . .	41
II.5.3. Теории «слияния магнитных полей» . . . . .	41
II.6. Электрические двойные слои . . . . .	42

II.6.1.	Общие свойства двойных слоев . . . . .	42
II.6.2.	Двойные слои в магнитосфере . . . . .	47
II.6.3.	Выделение энергии в двойных слоях . . . . .	48
II.6.4.	Взрывающиеся двойные слои . . . . .	48
II.6.5.	Цепь, содержащая двойной слой . . . . .	49
II.7.	«Каблирование» токов, текущих вдоль магнитных силовых линий . . . . .	50
II.8.	Расширяющаяся цепь . . . . .	52
II.9.	Различные типы плазменных областей . . . . .	52
II.9.1.	«Пассивные» плазменные области . . . . .	52
II.9.2.	«Активные» плазменные области . . . . .	53
II.9.3.	Плазменные кабели . . . . .	53
II.9.4.	Проекция активных и пассивных плазменных обла- стей на ионосферу . . . . .	54
II.9.5.	Граничные токовые слои . . . . .	55
II.10.	Ячеистая структура пространства . . . . .	56
II.11.	Тонкая структура активных плазменных областей . . . .	57
<b>Глава III.</b>	<b>Электрические цепи . . . . .</b>	<b>59</b>
III.1.	Важное значение токовых моделей . . . . .	59
III.1.1.	Описание на языке частиц . . . . .	59
III.1.2.	Различные типы электрических токов . . . . .	60
III.1.3.	Передача энергии между электрической цепью и движущейся плазмой . . . . .	62
III.2.	Авроральные электрические цепи . . . . .	67
III.3.	Намагниченное тело, вращающееся в плазме . . . . .	71
III.4.	Гелиосферная токовая система . . . . .	73
III.4.1.	«Секторная структура» и экваториальный токовый слой . . . . .	73
III.4.2.	Построение гелиосферной токовой модели . . . . .	73
III.4.3.	Свойства гелиосферной цепи . . . . .	76
III.4.4.	Применение полученных результатов к галактиче- ским масштабам: двойные радиоисточники . . . . .	77
III.5.	Эквивалентные цепи хвоста магнитосферы, комет и Венеры 80	80
III.5.1.	Цепь для хвоста магнитосферы и магнитные суб- бури . . . . .	80
III.5.2.	Кометная токовая система . . . . .	82
III.5.3.	Токовая система в магнитосфере Венеры . . . . .	82
III.6.	Магнитосферная эквивалентная цепь . . . . .	84
III.6.1.	Нулевое приближение: движение отдельных частиц . . . . .	84
III.6.2.	Первое приближение: малый плазменный поток . . . . .	84
III.6.3.	Три эквивалентные цепи, соответствующие первому приближению . . . . .	89
III.6.4.	Явления, связанные с токами первого приближе- ния . . . . .	90
III.6.5.	Второе приближение: плазменный поток, близкий к реальному . . . . .	90
III.6.6.	Изменения магнитного поля . . . . .	90
III.6.7.	Эквивалентная цепь для фронта ударной волны . . . . .	91
III.6.8.	Эквивалентная цепь для магнитопаузы . . . . .	92
III.6.9.	Цепь «солнечный ветер — авроральная область» . . . .	92

III.6.10. Эквивалентная цепь для хвоста магнитосферы . . . . .	93
III.6.11. Третье приближение и сравнение с данными наблюдений . . . . .	93
III.6.12. Модель трех токовых колец . . . . .	94
III.7. Другие магнитосферы . . . . .	97
III.8. Цепь для солнечного протуберанца и солнечные вспышки . . . . .	97
III.9. Ускорение солнечного ветра . . . . .	99
III.10. Передача энергии от солнечного ядра к полярным сияниям . . . . .	100
<b>Глава IV. Теория космической плазмы . . . . .</b>	<b>103</b>
IV.1. Классическая теория и ее трудности . . . . .	103
IV.1.1. Обратное отклонение . . . . .	104
IV.2. Ионизация . . . . .	107
IV.2.1. Ионизация светом, частицами и электрическими токами . . . . .	107
IV.2.2. Переходная область между плазмой и нейтральным газом . . . . .	109
IV.3. Космическая распространенность элементов и их дифференциация . . . . .	109
IV.3.1. Космическая распространенность . . . . .	109
IV.3.2. Наблюдения химической дифференциации . . . . .	110
IV.3.3. Разделение элементов, вызванное различиями потенциалов ионизации . . . . .	110
IV.3.4. Разделение, вызванное различиями в массе . . . . .	111
IV.3.5. Разделение, вызванное различиями давлений паров . . . . .	111
IV.4. Турбулентность . . . . .	111
IV.5. Усиление магнитного потока . . . . .	114
IV.5.1. Генерация космических магнитных полей . . . . .	114
IV.5.2. Самовозбуждающееся динамо . . . . .	114
IV.5.3. Теории самовозбуждающегося динамо . . . . .	115
IV.5.4. Механизм усиления магнитного потока . . . . .	115
IV.5.5. Генерация космических магнитных полей под действием неустойчивости по отношению к изгибам . . . . .	117
IV.6. Критическая скорость . . . . .	119
IV.6.1. Наличие эффекта критической скорости в ранней Солнечной системе . . . . .	119
IV.6.2. Экспериментальное открытие . . . . .	120
IV.6.3. Теория . . . . .	120
IV.6.4. Эффект критической скорости и космические исследования . . . . .	121
IV.7. Плазма при наличии пыли . . . . .	121
IV.7.1. Твердые частицы как часть плазмы . . . . .	122
IV.7.2. Движение твердых частиц под действием электромагнитных и гравитационных сил . . . . .	122
IV.8. Образование и эволюция межзвездных облаков . . . . .	123
IV.8.1. Три частных случая . . . . .	124
IV.8.2. Бессиловые магнитные поля и образование волокон . . . . .	125
IV.8.3. Способствуют или противодействуют магнитные поля сжатю? . . . . .	126

	IV.8.4. Пинчевание темных межзвездных облаков . . . . .	127
IV.9.	Амбиплазма . . . . .	128
	IV.9.1. Свойства амбиплазмы . . . . .	128
	IV.9.2. Реакции аннигиляции . . . . .	129
	IV.9.3. Излучение амбиплазмы . . . . .	131
	IV.9.4. Основные проблемы, связанные с амбиплазмой . . . . .	133
	IV.9.5. Разделение вещества и антивещества . . . . .	133
	IV.9.6. О сосуществовании вещества и антивещества . . . . .	136
IV.10.	Явления высоких энергий . . . . .	136
	IV.10.1. Источники энергии и процессы ускорения . . . . .	137
	IV.10.2. Магнитная накачка . . . . .	140
	IV.10.3. Области ускорения космических лучей . . . . .	141
<b>Глава V.</b>	<b>Происхождение Солнечной системы . . . . .</b>	<b>144</b>
V.1.	Как можно реконструировать прошлые эпохи? . . . . .	144
V.2.	Источники информации . . . . .	144
V.3.	Использование данных наблюдения магнитосферной плазмы	145
	V.3.1. Области активной и пассивной плазмы . . . . .	145
	V.3.2. Токи, возбуждаемые сторонними источниками . . . . .	146
V.4.	Электромагнитные эффекты, способствующие образованию и сжатию облаков . . . . .	148
V.5.	Химическая дифференциация в первичном облаке . . . . .	148
V.6.	Внутренние токи . . . . .	150
V.7.	Поясная структура и критическая скорость . . . . .	154
V.8.	Солнечная система в процессе формирования . . . . .	155
	V.8.1. Межзвездные облака . . . . .	155
	V.8.2. Образование протозвезд . . . . .	156
	V.8.3. Образование планет и спутников . . . . .	157
	V.8.4. Наблюдение планетных систем, находящихся в про- цессе формирования . . . . .	159
V.9.	Гетегония и «гетегонный принцип» . . . . .	160
<b>Глава VI.</b>	<b>Космология . . . . .</b>	<b>161</b>
VI.1.	Современное состояние космологии . . . . .	161
	VI.1.1. Исторический обзор . . . . .	161
	VI.1.2. Гипотеза «большого взрыва» . . . . .	163
	VI.1.3. Однородные и неоднородные модели . . . . .	164
	VI.1.4. Хаббловское расширение Метагалактики . . . . .	168
VI.2.	Сосуществование вещества и антивещества . . . . .	172
	VI.2.1. Симметрия вещество – антивещество . . . . .	172
	VI.2.2. Ячейки вещества и антивещества . . . . .	172
	VI.2.3. Размер ячеек: порядок размеров галактики или меньше? . . . . .	174
	VI.2.4. Строение симметричной галактики . . . . .	175
	VI.2.5. Возражения против существования антивещества	178
VI.3.	Аннигиляция как источник энергии . . . . .	179
	VI.3.1. Аргумент в пользу существования антивещества	179
	VI.3.2. Тождественность электромагнитных излучений двух различных типов вещества . . . . .	180
	VI.3.3. Излучение при аннигиляции . . . . .	180

---

VI.3.4. Слои Лейденфроста и аннигиляция в стенках ячеек	181
VI.3.5. Аннигиляция в космических облаках . . . . .	182
VI.3.6. Тела, падающие на звезду, состоящую из вещества противоположного типа . . . . .	182
VI.3.7. Модель амбизвезды . . . . .	184
VI.4. Хаббловское расширение в евклидовом пространстве . . .	191
VI.4.1. Некосмологические красные смещения некоторых квazarов . . . . .	191
VI.4.2. Следствия из некосмологической интерпретации кра- сных смещений квазаров . . . . .	192
VI.5. Модель эволюции Метагалактики . . . . .	193
VI.5.1. Прото-Метагалактика . . . . .	194
VI.5.2. Кинетическая энергия хаббловского расширения Ме- тагалактики . . . . .	195
VI.5.3. Образование прото-Метагалактики . . . . .	196
VI.5.4. Другие космологические проблемы . . . . .	197
VI.6. Другие метагалактики . . . . .	198
VI.7. Дискуссия . . . . .	198
VI.8. Выводы . . . . .	199
<b>Литература . . . . .</b>	<b>201</b>

## УВАЖАЕМЫЙ ЧИТАТЕЛЬ!

Ваши замечания о содержании книги, ее оформлении, качестве перевода и др. просим присылать по адресу: 129820, Москва, И-110, ГСП, 1-й Рижский пер., 2, изд-во «Мир».

**Ханнес Альвен**

**КОСМИЧЕСКАЯ ПЛАЗМА**

Научный редактор М. Ф. Путов  
Младший научный редактор И. А. Гревцова  
Художник А. Н. Савельев  
Художественный редактор М. Н. Кузьмина  
Технический редактор Е. С. Потапенкова  
Корректор В. И. Киселева

**ИБ № 3233**

Сдано в набор 7.05.82.

Подписано к печати 21.03.83.

Формат 60 × 90<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.

Бумага офсетная № 1.

Гарнитура таймс. Печать офсетная.

Объем 6,75 бум. л. Усл. печ. л. 13,50. Усл. кр.-отт. 13,63.

Уч.-изд. л. 13,70. Изд. № 27/2009. Тираж 3000 экз.

Зак. № 1989 Цена 2 р. 10 к.

Издательство «Мир»  
129820, Москва, И-110, ГСП  
1-й Рижский пер., 2.

Московская типография № 9 Союзполиграфпро-  
ма при Государственном комитете СССР по  
делам издательств, полиграфии и книжной тор-  
говли, Волочаевская, 40

**В ИЗДАТЕЛЬСТВЕ «МИР» В 1984 Г.**

**ВЫХОДИТ В СВЕТ КНИГА**

**Н. Колдер. Комета надвигается!:** Пер. с англ. — 10 л.

В 1985—1986 гг. ожидается возвращение к Солнцу кометы Галлея. Это редкое и весьма важное астрономическое событие привлекает пристальное внимание как специалистов, так и самых широких кругов. Автор, английский популяризатор, живо и увлекательно рассказал о самой знаменитой из периодических комет — истории ее открытия, научном исследовании, роли комет для современной науки. В то же время он остроумно и зло высмеял многочисленные суеверия и псевдонаучные «теории», связанные с кометами.

Книга превосходно иллюстрирована и рассчитана на самые широкие круги читателей.

2р.10к.



**Х. АЛЬВЕН**

**КОСМИЧЕСКАЯ ПЛАЗМА**