

БЕСТСЕЛЛЕР AMAZON

СКОТТ БЕМБЕНЕК

МЕХАНИЗМ ВСЕЛЕННОЙ

**Как законы науки управляют миром
и как мы об этом узнали**

Скотт Бембенек
Механизм Вселенной: как законы
науки управляют миром и как мы об
этом узнали

© Scott Bembenek 2017

© Оформление. ООО «Издательство АСТ», 2019

Предисловие

Я работал над «финальной версией» этого манускрипта, «в последний раз» пробегая глазами по тексту (я много раз говорил себе это и почему-то каждый верил своим словам), и вздыхал; и в этот раз мне удалось. Началом тернистого пути к написанию моей первой научно-популярной книги, или, как я ее называю, «научной истории», стал короткий разговор с моим другом. Друг рассказал мне о чем-то за авторством популярного писателя, что они прочитали. Я был заинтригован – не столько самой темой (честно, я забыл и писателя, и произведение), а скорее тем, насколько это взволновало моего друга. Будем честны: у большинства людей наука не часто вызывает интерес.

Поскольку я и сам ученый, мне было исключительно приятно увидеть восторг моего друга; я захотел и сам дарить другим моменты научных озарений.

Кроме того, современная научно-популярная литература не приняла или просто проигнорировала многие заслуживающие внимания научные открытия, и это я также хотел бы осветить в своей работе.

Предисловие

Эти размышления и заставили меня написать научно-популярную книгу. Таким образом, в августе 2009 года я отправился в свое путешествие. Сперва я думал, что смогу закончить этот проект за два года. Однако за следующие два года произошло множество вещей. Мою левую руку парализовало в результате несчастного случая на тренировке по боевым искусствам, но я все равно продолжал писать, до операции и во время почти двухлетнего восстановления после нее, хотя и гораздо медленнее. Я женился и участвовал в четырех церемониях (две проходили в Сан-Диего, одна в Висконсине и одна в Китае). Взял больше обязанностей на работе (я все еще работаю на основной работе). Потерял маму. И стал отцом. Конечно, все эти факторы, несомненно, замедляли мою работу, но все равно они не были главными причинами.

У меня было определенное видение этой книги, и я отказался издавать ее, пока не реализую задуманное. Вместе с моим обсессивно-компульсивным расстройством и долей перфекционизма это привело к

тому, что срок работы значительно вырос. Тем не менее я думаю, что это стоило того (надеюсь, и вы тоже так считаете).

Насколько я вижу, главный камень преткновения популярности науки – ее подача. Часто ее преподносят очень сухо, даже скучно. Многие из вас посещали такие уроки в школе, смотрели такие видео, слушали такие беседы... и я тоже. Очевидно, для меня (и других ученых) такие вещи не были помехой – в конце концов, мы стали учеными. Несомненно, и мы порой находили некоторые вещи скучными (да, ученые тоже люди), в то время как другие аспекты были поистине захватывающим. Для меня итог таков: наука – это моя страсть.

Предисловие

Мое увлечение наукой началось в совсем юном возрасте, примерно в 5 лет. Тогда «наукой» считались эксперименты над насекомыми и различными садовыми земноводными (исключительно гуманные!), проводимые с помощью разобранных электроприборов. Я и правда никогда не забуду, как во втором классе я пришел в нашу (очень маленькую) школьную библиотеку, чтобы прочитать книгу о том, что такое электричество и как оно работает. Совершенно обескураженный библиотекарь поинтересовался: «Может, лучше почитаешь книгу с интересной историей?», на что я ответил: «Неа».

Большую часть моего детства я страдал от довольно тяжелых форм аллергии и астмы, из-за которых пропустил много школьных уроков. Вот как выглядела моя академическая жизнь в то время: я оставался дома, мама брала мою домашнюю работу у учителей, и я делал ее из дома – такое домашнее обучение, если угодно. Я помню, что всегда работал с удвоенной силой, когда доходило до точных наук и математики. Наверное, можно сказать, что наука помогала мне в трудные школьные годы, предоставив перспективы во взрослой жизни – и с тех пор оставалась со мной.

Как видите, я уже довольно долго занимаюсь наукой, официально – с 1997 года, когда я получил кандидатскую степень в теоретической химической физике. Как я и сказал, я стал ученым, потому что к этому у меня была страсть. Меня привлекает то, как она позволяет видеть мир, как она помогает вам понять его и размышлять о нем. Я считаю, что эта уникальная перспектива открыта для всех, неважно, ученый вы или нет.

Моя цель в этой книге проста: сделать главные аспекты физики и химии более понятными для читателя и, таким образом, вызвать интерес к науке – или, еще лучше, желание заняться ей. Я часто слышу, что наука не для всех. Несомненно, не у всех возникнет такое влечение к науке, как у меня, но я все еще думаю, что науке есть что предложить каждому. Короче говоря, эта книга – моя попытка помочь вам отыскать в науке нечто для себя.

Благодарности

Создание книги – не «приключение» для одиночки. Этот нелегкий путь помогают пройти друзья и семья – люди, которым я бы хотел выразить благодарность.

Я хотел бы благодарить свою маму, которая вынесла бесчисленные «научные эксперименты» (также известные как «проект недели»), когда я был ребенком. Благодаря им я мог всюду наслаждаться моим увлечением – наукой.

Я хотел бы выразить благодарность моей дорогой Софии. Я только-только начал писать эту книгу, когда мы встретились. Она поддерживала меня в течение всей работы и помогла закончить книгу, чтобы поскорее увидеть ее. Я бесконечно благодарен.

Несколько человек прочитали различные версии этой рукописи и дали на нее превосходную обратную связь: Захари Бахман, Элизабет Нгуен, Руди Шварцберг, Николас Эвергэйтс, Фрэнк Акс, Джесс Беренс и Скотт П. Браун. Я хотел бы выразить особую благодарность Эрику Шиптону за время, потраченное на критический обзор научных аспектов рукописи. Наконец, я благодарю тех, кто поддерживал меня все эти годы, в частности Джима Даля, Робба Хэнкинса, Марти Дженкинса и Кэйси Чеа.

Введение

Эта книга не учебник, поэтому ее изложение – не единое целое. В конце глав вы не найдете задачи и упражнения; нет там и строгих выводов, ссылки на них я оставляю в библиографии. Книга написана как «научная история». Я описываю истории научных открытий и биографии ученых, чтобы превратить реальную науку на всем ее пути в увлекательный рассказ. Это позволит вам познакомиться с «ключевыми игроками» истории науки, с тем, с чем они боролись в свое время (лично и с научной точки зрения), и с сегодняшним подходом к научным феноменам.

Книга разделена на четыре основных части:

- энергия;
- энтропия;
- атомы;
- квантовая механика.

Я выбрал именно их, потому что, на мой взгляд, это наиболее важные (если не самыми важные) темы физики с химией. Если вы понимаете их, то можете далеко пойти в науке. Они также и самые интересные, по моему скромному мнению.

Введение

Эти четыре ключевых темы очень глубокие, и я разделил их на части и главы, чтобы сделать материал очень доступным. Вы не обязаны начинать с первой темы; читайте откуда хотите. Однако я рекомендовал бы закончить одну тему, перед тем как перейти к другой. Дело в том, что каждая часть (в основном) самодостаточна, но при этом связана с другими темами, затронутыми в книге. Таким образом, вы можете подробно разобраться в каждой конкретной теме отдельно и углубить свои знания, изучив ее связь с другими главами. Для тех из вас, кто хочет знать только «формальные области» физики и химии, которые затрагивает книга – это классическая механика, термодинамика, статистическая механика, кинетическая теория, квантовая механика, и многое другое.

Вы заметите, что в моей книге множество сносок. Сколько бы материала я ни охватывал, всегда хочется подробнее обсудить

некоторые темы. В этом случае я решил, что дополнения будут уместнее в качестве сноски, а не основного текста. Информация в сносках дает не только простор для обсуждения, но и больше деталей. В некоторых случаях этот материал в сравнении с основным текстом более современный, так что он принесет чуть больше удовлетворения научным энтузиастам и опытным ученым.

Хорошо, давайте говорить о слоне в комнате или, скорее, о книге. Во всей книге я привожу несколько уравнений, в основном в главах ближе к концу книги. Честно говоря, я сомневался, стоит ли вообще вставлять какие бы то ни было уравнения. Действительно, редактор книги Стивена Хокинга предупреждал его, что каждое уравнение, которое он включит в «Краткую историю времени», вдвое снизит количество читателей. В конце концов Хокинг включил в книгу одно единственное уравнение. Откровенно говоря, я написал текст так, чтобы он превосходно читался самостоятельно, безо всяких уравнений. Почему же тогда я все-таки включил их в повествование? Мною двигало желание проиллюстрировать, как математика и наука дополняют друг друга – вместе они часто обеспечивают наилучшее объяснение физических явлений. Ричард Фейнман красноречиво говорит об этом в «Характере физических законов»:

Введение

«Если вы хотите узнать природу, оценить ее, необходимо понять язык, на котором она говорит (*Прим. авт. – математику*). Она излагает информацию только в одной форме; мы не настолько высокомерны, чтобы требовать ее измениться, дабы мы обратили на нее внимание».

Тем не менее не стесняйтесь пропускать любое из них или даже все уравнения – вы не многое потеряете – если они тяготят вас.

Таким образом, если вы ищете интересную книгу, наполненную фактами из истории развития науки, биографиями и, собственно, наукой, то эта книга для вас. Даже если вы не очень подкованы в науке, вы сможете разобраться в некоторых областях физики и химии. Если же вы искушенный исследователь, эта книга поможет вам переосмыслить уже знакомые темы или узнать нечто новое (особенно, если вы будете обращать внимание на дополнительную информацию в сносках). В конце концов, перед вами хорошая «научная история», которая, надеюсь, не оставит вас равнодушными.

Скотт Бембенек
(осень 2016)

Часть 1

Первое начало: энергия

Глава 1

Ничто не дается даром

Сохранение работы

Важно понимать, что сегодня физика не может дать объяснение тому, что такое энергия... Ее абстрактность заключается в том, что она не объясняет нам причины или механизм действия своих формул.

Ричард Фейнман, американский физик (1918–1988)

У всех нас есть базовые представления об энергии. Мы знаем, что разные ее формы влияют на нашу жизнь: мы используем газ, чтобы ездить на машинах, электричество питает телевизоры, тостеры, холодильники, электропечи и другие приборы, как и батарейки в наших камерах, пульты управления, мобильные телефоны; и этот список можно продолжать и продолжать. Проще говоря, энергия – это фундаментальное физическое свойство каждой системы. Таким образом, она во многом напоминает другие физические свойства, которые мы используем при описании той или иной системы, например температуру, давление или плотность. Сама же система может представлять собой что угодно: машину, движущуюся по автостраде, чашку горячего кофе или Тихий океан. Мы можем обоснованно говорить об энергии системы, а иногда даже определять ее.

Сама энергия очень иллюзорна, потому что она принимает множество разных форм и может быстро переходить из одной формы в другую или же изменять свою форму без каких-либо на то предпосылок. Как следует из ее физических свойств, энергия действительно хамелеон. Это типичное поведение энергии подспудно проступает и через то, как мы говорим о ней: о ее способности выполнять определенную работу, создавать движение и менять

температуру. Ее неясная природа, трудности при ее описании и отсутствие точной картины состава вещества – причины, по которым понимание энергии всегда было непростой задачей.

Она была настолько трудна, что до 1850 года мы даже не могли договориться о том, называть ли ее «энергией». С тех пор многое изменилось, и сегодня наше понимание выглядит довольно впечатляюще. Только взгляните на все эти разнообразные механизмы, которые мы создали, чтобы жизнь была проще, а ее качество выросло; современные технологии действительно удивляют. Первые механизмы работали только при помощи человека или животных, подобные *простые механизмы* не только упрощали жизнь, они также дали нам первые идеи о том, что же такое энергия и как она себя ведет.

Компенсация природы и простые механизмы

Для древних людей тяжелый ручной труд был неизбежностью. Покоряя суровую реальность, они стали умнее и создали простые механизмы (рычаг, наклонную плоскость, винт, шкив, колесо и клин), чтобы облегчить свой труд. Эти приспособления, должно быть, казались магическими: с передвижением предмета, которое прежде требовало невероятных усилий (или это вовсе было невозможно), теперь легко справлялся простой механизм. Однако один неизменный факт был болезненно ясен: за *механическое преимущество*, которое приносили эти устройства, всегда приходилось платить свою цену – компенсацию, или плату Вселенной за работу, завершаемую с *меньшим усилием*.

Давайте лучше разберемся в работе простых механизмов. Рассмотрим наклонную плоскость (она похожа на пандус для инвалидного кресла), которую раньше использовали, чтобы поднять объект на нужную высоту. Ее единственная цель – доставить что-либо на определенную высоту с меньшими усилиями, чем при прямом подъеме. На протяжении всей истории наклонная плоскость приносила пользу многим цивилизациям. Доисторические люди использовали ее, чтобы перемещать тяжелые объекты. С использованием наклонной плоскости строились и египетские пирамиды. Древний осадный настил, незаменимое военное орудие, позволял нападавшим с легкостью преодолевать вражеские стены.

В отличие от других простых механизмов, саму наклонную плоскость не нужно двигать, чтобы использовать. Другими словами, для ее применения не требуется прикладывать силу к самой наклонной плоскости. Поэтому механический эффект возникает просто благодаря движению по ней. Отсутствие необходимого движения – одна из главных причин, по которой наклонную плоскость не считали простым механизмом; из шести простых механизмов ее последней признали таковой в эпоху Ренессанса, когда математики вычислили ее механическое преимущество.

Любой, кто хоть раз поднимался по лестнице, уже знаком с наклонной плоскостью, но лестница – чуть более необычная ее версия. При помощи лестницы вы можете перемещаться с одной высоты на

другую с меньшим усилием, или, что важнее, затрачивая меньшую силу. Вот ее основная цель. То же самое происходит и когда вы используете наклонную плоскость, чтобы переместить объект снизу вверх. Теперь, когда требуется меньше силы, объекты, которые было невозможно сдвинуть с места, перемещаются легко, а те, которые перемещались с трудом, – очень легко. Но есть и ловушка: вы должны будете переместить объект дальше, чем прежде. То есть если вы хотите использовать наклонную плоскость, чтобы с меньшим усилием переместить какой-либо объект (а кто не хотел бы?), то вы должны переместить объект на большее расстояние, чтобы добраться до желаемой высоты, чем если бы вы двигались снизу вверх. Вероятно, вам и так это известно, если вам доводилось пользоваться лестницей.

Сравните длину всей лестницы, по которой вы поднимаетесь, с фактической высотой, которую вы преодолели от начала пути. Эта высота всегда меньше расстояния, пройденного по лестнице. Другими словами, большее расстояние – цена за меньшую силу, прилагаемую для подъема. Если же вы решите подняться на аналогичную высоту (прямо снизу), вы точно взберетесь быстрее, однако потратите значительно больше сил. Поэтому у нас в домах ступенчатые лестницы, а не приставные.

Таким образом, наклонная плоскость не уникальна: меньшие затраты энергии с одной стороны требуют прохождения большего расстояния с другой – это объединяет все шесть простых механизмов.

Сила, расстояние и работа

Итак, мы видим связь между необходимой силой и пройденным расстоянием при подъеме на определенную высоту с помощью наклонной плоскости. Давайте уточним этот момент: сила, необходимая для перемещения объекта по наклонной плоскости (или лестнице), меньше силы, требуемой для перемещения того же объекта по вертикальной приставной лестнице на ту же высоту. Другими (более математическими) словами:

$$F_{\text{наклонная плоскость}} < F_{\text{приставная лестница}}$$

где F – это сила, а знак «<» означает «меньше, чем». Цена, которую мы платим за роскошь приложения меньшей силы, – увеличение расстояния, которое мы должны преодолеть:

$$d_{\text{наклонная плоскость}} > d_{\text{приставная лестница}}$$

где знак «>» означает «больше, чем». В нашем примере вы перемещаете себя, но в целом это может быть что угодно; возможно, вы нечто несете или двигаете. Независимо от этого отношения между силой и расстоянием всегда сохраняются.

Неравенства, приведенные выше, дают нам четкое понимание взаимоотношений между силой и расстоянием. Основываясь на них, мы легко видим, что при росте одного из показателей другой снижается. Таким образом, между силой и расстоянием существует некий компенсирующий эффект. Фактически эти эффекты прекрасно сбалансированы, и, вне зависимости от того, что мы используем – наклонную плоскость или лестницу, – мы в любом случае выполним одну и ту же работу:

Работа = (сила, затраченная на движение объекта) × (пройденное объектом расстояние).

Поэтому с точки зрения работы при движении с использованием наклонной плоскости в сравнении с использованием приставной лестницы справедливо следующее:

$$A_{\text{наклонная плоскость}} = A_{\text{приставная лестница}}$$

где A – это работа. Это означает, что объем работы, необходимой для перемещения чего-либо на определенную высоту, *остаётся неизменным*. Другими словами, природе все равно, как именно вы что-либо куда-либо доставите; необходимый объем работы будет тем же – ни меньше, ни больше.

Данная закономерность становится понятнее, когда мы рассматриваем случай, в котором мы поднимаем объект на определенную высоту. Чему мы противостояим? Мы противостояим силе притяжения Земли^[1], а подъем чего-либо на большую высоту увеличивает *потенциальную энергию* этого объекта. Позднее мы

поговорим о потенциальной энергии подробнее, но сейчас отметим, что работа и энергия тесно взаимосвязаны. Более того, мы начинаем подозревать, что природа имеет тенденцию сохранять энергию.

Заманчиво предположить, что мы могли бы создать машину, которая позволит нам использовать меньше силы, чтобы перемещать объекты, без необходимости дополнительно преодолевать требуемое расстояние. К сожалению, никакого «бесплатного сыра» нет. Когда дело доходит до законов Вселенной, становится ясно, что эта машина в действительности никогда не будет существовать. Возможно, никто не сказал об этом яснее, чем Галилео Галилей (1564–1642):

«Я видел (если не ошибаюсь), как многие механики обманулись, пытаясь использовать механизмы, изначально непригодные для определенных работ, в то время как многие другие также пошли по ложному пути за своими ожиданиями. Это разочарование, как мне кажется, основано на том, что эти люди верили и продолжают верить, будто они смогут поднять большой вес, приложив меньше силы, как если бы их машины могли обмануть природу, которая и без того любит нам отказывать. Ее основной закон: никакое сопротивление нельзя преодолеть меньшей силой, чем исходная».

Тем не менее многие пытались (и до сих пор пытаются) «обмануть» Вселенную тем или иным способом. Ярким примером этого служит «вечный двигатель», который должен выполнять работу бесконечное количество времени посредством минимальных усилий. Как мы увидим позже, он также обречен на неудачу, учитывая систему строгих «сдержек и противовесов» энергии и работы, тщательно сохраняемых Вселенной.

Глава 2

Качание, падение и вращение

Основы энергии

Наше обсуждение простых механизмов показывает, что природа не желает отдавать свою энергию даром. Тем не менее эти устройства упрощают нашу жизнь (и даже сегодня мы продолжаем использовать их как части более сложных машин, которые работают с использованием человеческого труда или топлива), и есть компенсирующий эффект. И, насколько мы знаем, этот привычный уклад не изменить.

Пока люди изучали другие системы, простые или посложнее, эта тема возникала вновь и вновь в разных формах. Эксперименты с качающимися маятниками, падающими объектами и предметами, катящимися вниз – ну, по чему бы еще – по наклонной плоскости (да, опять она, но в этот раз уже не в качестве простейшего механизма), помогли подняться на следующий уровень понимания. Результат этих экспериментов лег в основу понимания энергии. И никто не потратил на изучение этих систем больше времени, чем Галилео Галилей.

Качающаяся люстра

Галилео Галилей, старший из шести детей, родился в Пизе 15 февраля 1564 года в семье Винченцо Галилея и Джулии Амманнати. Винченцо, музыкант-теоретик и практик, жил скромно, зарабатывая исполнением и преподаванием музыки. Часть его работ, однако, была опубликована. В его самой значимой книге, *Fronimo* (содержавшей много композиций для двух лютней), мы видим выражение настоящей страсти (или аддикции) к музыке: он играл на своей лютне «гуляя по городу, катаясь на лошади, стоя у окна, лежа в постели».

Галилей научился у своего отца нескольким вещам. Благодаря тому, что они с отцом много играли дуэтом – Галилео играл партию второй лютни, – он стал искушенным лютнистом. Как и его отец, Галилео был вольнодумцем, и они оба любили выставлять авторитетных людей дураками, например, побеждая их в споре. Как устойчивый сторонник

эмпирического исследования, Винченцо проводил эксперименты, чтобы проверить свои музыкальные теории. В частности, он установил фундаментальные отношения между частотой колебаний струны и ее натяжением: частота колебаний прямо пропорциональна квадратному корню из натяжения. Уважение отца к необходимости проверять теорию с помощью экспериментального наблюдения, несомненно, влияло на Галилео, поскольку стало краеугольным камнем всех его научных изысканий. Его мать, хотя и была образованной женщиной, была упряма, отличалась трудным характером и была слабо привязана к Галилео или его младшему брату Микеланджело, который за год до смерти матери (а она умерла в 1620 году) с удивлением отмечал, что она была «все так же ужасна».

Галилео жил в Пизе, пока ему не исполнилось десять, а затем переехал во Флоренцию. После некоторого начального обучения у наставника (который брал пять лир в месяц) он наконец поступил на учебу в монастырь Валломброза под Флоренцией. Тогда-то, скорее всего, и начался его роман с астрологией. Кроме того, тогда же он почувствовал интерес к религии – но его отец тут же пресек это, забрав Галилео из монастыря под предлогом того, что его глаза нуждались в медицинском уходе.

Решив, что Галилео должен построить карьеру в медицине (вероятно, потому что это была престижная и хорошо оплачиваемая профессия и потому что самый выдающийся предок их семьи был доктором), Винченцо в 1581 году записал сына в Пизанский университет. В те дни чтобы стать доктором, нужно было знать наизусть естественную философию Аристотеля. Это задача, должно быть, была разочарованием для Галилео, который написал: «Кажется, что нет ни одного явления, стоящего внимания, с которым он [Аристотель] столкнулся бы без рассмотрения».

Из всех тем, которые затрагивал Аристотель, воображение Галилео, безусловно, захватила физика. Тем не менее к учению Аристотеля по этому предмету^[2] Галилео подошел весьма требовательно. Очевидно, Галилео подвергал сомнению не только учение Аристотеля, поскольку в первые годы в университете он заработал репутацию студента, любящего перечить преподавателям, которых он считал главным образом высокомерными, некритически настроенными мыслителями, отчаянно цепляющимися за бессмысленную традицию. Галилео начал

терять интерес к своим медицинским курсам. Примерно в это время жизнь Галилео резко изменилась.

Каждый год накануне Рождества двор великого герцога Франческо переезжал из Флоренции в Пизу, где оставался до Пасхи. Среди его придворных был математик Остилио Риччи (1540–1603). В 1583 году, в течение второго года Галилео в университете, Риччи был в Пизе и преподавал «Начала» Евклида^[3] служащим суда. Так как на эти лекции пускали только членов Тосканского суда, Галилео пришлось прятаться за дверь, чтобы слушать. Так Галилео впервые прикоснулся к реальной математике, и он был очарован^[4].

Он вернулся, чтобы услышать больше лекций, все время храня свое присутствие в тайне. Вдохновленный этими лекциями, Галилео самостоятельно изучил Евклида. В конечном счете он подошел к Риччи с вопросами, и именно тогда придворный математик увидел талант Галилео к математике. Риччи посоветовал Галилео продолжать самостоятельное обучение и предложил свою помощь. После официального знакомства Галилео, Риччи и Винченцо стали друзьями. Риччи рассказал Винченцо, что у Галилео талант к математике, которую тот предпочел исследованию медицины. Винченцо (сам бывший хорошим математиком) ничего не имел против, но хотел, чтобы его сын получил медицинскую степень. Он согласился, что Риччи будет учить Галилео, в тайне надеясь, что его сын все же продолжит основное обучение. Этого не произошло. Галилео полностью забросил медицинское образование и в 1585 году покинул университет без степени.

После отъезда из Пизанского университета Галилео продолжал изучать математику самостоятельно, а также давал частные уроки во Флоренции и Сиене. В это время Риччи познакомил Галилео с работами Архимеда (ок. 287–212 до н. э.). Работы Евклида предоставили Галилео твердую математическую базу, в то время как Архимед показал ему силу математики в приложении к проблемам физики. Действительно, Галилео был большим поклонником Архимеда и оставался им всю жизнь. Однако физика Архимеда относилась только к статичным объектам. Галилео же станет тем, кто расширит познания физики в отношении динамичных объектов.

В 1586 году Галилео написал свое первое научное эссе под названием «Маленькие весы», где он объяснил, как построить и

применять устройство для измерения удельного веса. Эта работа содержала комбинацию прагматических и теоретических аспектов; последний он заимствовал из работ Архимеда. В 1587 году Галилео обнаружил способ вычислить центр тяжести определенных твердых тел. Используя инновационный и практический подход, он вышел за рамки работ Архимеда и привлек внимание выдающихся математиков в Италии и, впервые, за границей.

В 1588 году Галилео попытался устроиться на кафедру математики в Болонском университете. В это время его математический опыт состоял из отдельных встреч с Риччи, частных уроков, которые он давал во Флоренции и Сиене, и самостоятельного обучения. Хорошо осознавая, что профессионального опыта у него мало, Галилео указал, что ему «приблизительно 26». На самом деле ему было двадцать три года. Место на кафедре в итоге досталось Джованни Антонио Маджини (1555–1617). Маджини был астрономом, астрологом, издал некоторые книги и был на девять лет старше Галилео. Также, вероятно, сыграло свою роль и то, что он был выпускником университета.

Галилео становился известным, что, вкуче с помощью его покровителей, позволило ему получить должность преподавателя математики в Пизанском университете в 1589 году. Галилео получал всего половину зарплаты своего предшественника, что делало его одним из самых низкооплачиваемых среди его коллег в университете. Работая в Пизе, Галилео умудрился оскорбить преподавателей философии критикой физики Аристотеля, и становилось ясно, что его контракт в Пизе, вероятно, по истечении 1592 года не будут возобновлять.

Уже в 1590 году друзья и покровители Галилео начали искать возможность добиться для него места на кафедре математики в Падуанском университете, которое оставалось свободным с 1588 года. В 1592 году благодаря репутации хорошего математика Галилео стал преподавателем в университете Падуи, и платили ему в три раза больше, чем в Пизе.

В Падуе Галилео провел восемь лет, обустриваясь на новом месте и завязывая знакомства. Он вел расслабленный образ жизни, уделяя время своим интересам и сосредотачивая свои научные исследования больше на практике, а не на теории. В 1599 году Галилео приобрел большой дом с садом и виноградником. Здесь он приютил студентов (с

их слугами), которые подолгу оставались с ним и обслуживали вместе с медником мастерскую по изготовлению инструментов. Частные уроки, которые он давал, и университетские курсы оставляли Галилео мало свободного времени.

1602–1609 годы были для Галилео самыми творческими в изучении движения. В это время он, скорее всего, стремительно переходил от одной идеи к другой, позволив и теории, и точным экспериментам указать ему путь к умозаключениям, которые нанесут аристотелевской физике фатальный удар.

В 1583 году во время мессы в Соборе Пизы Галилео наблюдал, как под воздействием ветра качается светильник. Глядя на него, Галилео понял, что без дополнительного приложения сил постоянные колебания становятся все слабее и слабее^[5]. Но сколько нужно времени, чтобы прошло каждое из этих колебаний? Используя свой пульс для измерения времени (точные часы еще не изобрели), он удивился, когда осознал, что, хотя амплитуда каждого колебания уменьшалась, затрачиваемое на каждое колебание время оставалось неизменным. Галилео был заинтригован.

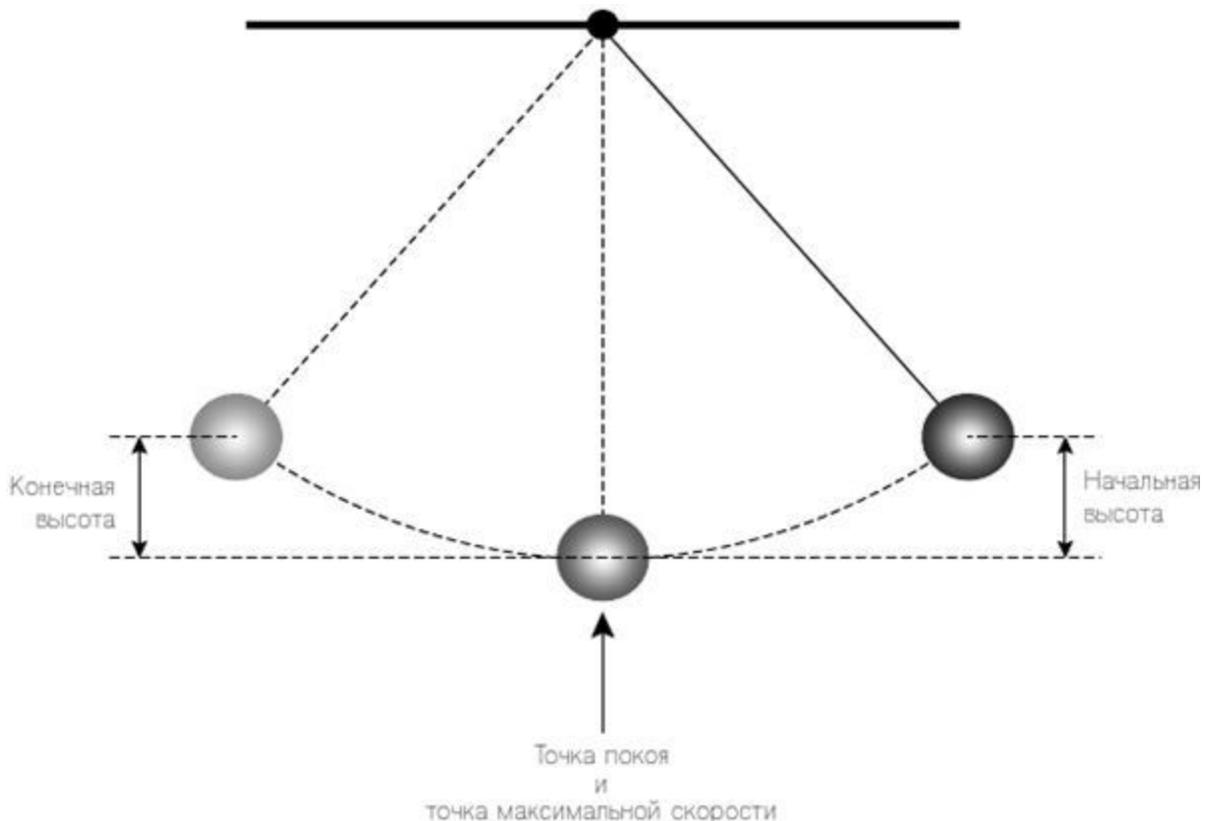


Рис. 2.1. Маятник сдвигают направо из точки покоя (нижнее положение, в котором он, по сути, висит вертикально) до начальной точки (*амплитуда*). Как только его отпускают, он качается влево, проходя через точку покоя (где его скорость теперь является максимальной) до противоположной стороны, где он достигает конечной высоты (которая соответствует начальной). Когда начальная высота мала, время, которое уходит на один такой цикл, зависит только от длины веревки.

Хотя неизвестно, правдива ли эта история^[6], первые заметки Галилео о качающемся маятнике (рис. 2.1) – хорошей модели качающегося канделябра – появились в конце 1588 – начале 1589 года, хотя к самим экспериментам^[7] он приступил только в 1602 году. Основываясь на своих опытах, Галилео заключил, что время, требуемое на колебание маятника (*период*), не зависит от размера колебания (*амплитуды*); и также не зависит от массы^[8] в конечной точке. Единственное, от чего оно зависит, – длина веревки. Это означает, что если привести маятник в движение на высоте или на «маленькой»^[9] амплитуде вне зависимости от начальной высоты, время, за которое маятник пройдет траекторию от начальной точки и обратно (колебание), всегда будет постоянным (учитывая колебание воздуха и внутреннее трение).

В «Диалоге о двух главнейших системах мира»^[10] Галилео рассуждает об этом с точки зрения протагониста, Сальвиати:

«Соответственно, я взял два шара – один из свинца, один из пробки, – причем первый был в сто раз тяжелее второго, и повесил их с помощью двух одинаковых, равных по размеру нитей около 4–5 локтей в длину. Запустив их движение (одновременно) как маятники, я увидел, что два эти тела совершали колебание по одному и тому же пути, и периоды легкого и тяжелого шара практически совпадали. Это свободное колебание повторялось сотни раз».

Это наблюдение точное лишь отчасти. Возможно, эксперименты Галилео с маятниками относились только к малым колебаниям – или часы, которыми он пользовался, были недостаточно точными. Справедливо, что период колебания маятника зависит от длины нити, а не от массы груза, однако если размах колебания станет достаточно

большим, период будет также зависеть от амплитуды – или начальной высоты. В таком случае период станет длиннее, так как увеличивается амплитуда. Так что мы проводим различие и называем маятник, который качается с постоянным периодом, *изохронным маятником*.

Галилео полагал, что все маятники изохронные, и это послужило почвой для идеи построить надежные часы – в которых он отчаянно нуждался для своих экспериментов. Он хвастался такими часами Республике Соединенных провинций Нидерландов: «Эти часы действительно превосходны для тех, кто наблюдает за движением и астрономическими явлениями, а их устройство очень простое».

Галилей блефовал; у него не было работающей модели этих «простых в изготовлении» часов. Однако у него действительно была теория относительно того, как их построить, которую он разрабатывал со своим сыном, Винченцо (1606–1649), и студентом и первым биографом, Винченцо Вивиани (1622–1703). К сожалению, до самой смерти у Галилео не было готового прототипа. В итоге такой прототип построил его сын в 1649 году, а в Северной Европе о нем узнали из набросков Вивиани.

В 1656 году Христиан Гюйгенс (1629–1695) самостоятельно создал улучшенную версию часов. Он понял, что маятник будет сохранять постоянный период только малых колебаний. Он смог преодолеть этот недостаток, регулируя колебание маятника, чтобы тот двигался не по естественной, круглой, а по измененной кривой, которая поддерживала постоянный период для всех высот. Эта прямая известна как *циклоида*, или *таутохрона*. Гюйгенс описал свою версию (циклоидных) часов с маятником в 1658 году в труде *Horologium* (что на латыни означает «часы») и в 1673 году опубликовал геометрическое доказательство таутохроны как истинной постоянной кривой периода в *Horologium Oscillatorium*.

Маятник дает нам другое ценное понимание. Мы понимаем, что скорость маятника в определенной точке зависит от текущей высоты по отношению к начальной высоте, что приводит к самой высокой скорости в самой низкой точке колебания. Другими словами, его текущая скорость зависит от разности высот: чем больше это различие (дальше от отправной точки), тем выше его текущая скорость. Поэтому максимальная скорость достигается в самой низкой точке колебания,

которая является также пунктом, в котором в конечном счете колебания прекратятся.

Отношения между высотой и скоростью дают нам лучшее понимание сохранения энергии. Галилео еще вернется к изучению маятника и еще больше приблизится к разгадке тайны энергии. Однако, прежде чем мы доберемся до этого, давайте поговорим о *свободном падении*.

Свободное падение

Из наших рассуждений о маятнике мы узнали, что:

- период колебания никогда не зависит от количества массы груза, присоединенного к концу веревки;
- скорость маятника увеличивается с уменьшением высоты, максимальная скорость – в самой низкой точке колебания.

Эти результаты интересны сами по себе, но станут еще интереснее, как только мы свяжем их с другими типами движения.

Маятник, качающийся назад и вперед, в действительности является просто объектом, «полное» падение которого остановили за счет натянутой веревки. Другими словами, веревка препятствует *свободному падению* маятника. Подумайте об этом как о человеке, который прыгает с моста с тарзанкой. В первый раз он прыгает как обычно, с тросом, обернутым вокруг тела, который гарантирует, что прыгун в конце не ударится о землю. Конечно, для этого длина троса должна быть (при полном натяжении) меньше, чем высота прыжка, чтобы торможение было безопасным. При втором прыжке длина троса (при полном натяжении) гораздо больше, чем высота падения. Тем не менее внизу находится огромный мат, который должен остановить падение и защитить прыгуна от травм.

Это очень похожие сценарии. Единственное значимое различие – длина троса: он меньше начальной высоты при первом прыжке и больше начальной высоты при втором прыжке. По существу, это отношения между качающимся маятником и свободно падающим объектом. Поэтому мы могли бы ожидать, что физические законы, управляющие обоими этими движениями, схожи.

Свободно падающие объекты привлекали внимание Галилея (см. рис. 2.2).

Аристотель считал, что более тяжелый объект упал бы на землю быстрее, чем легкий, но Галилео подозревал, что такого не будет. Изначально Галилео усомнился в этом, когда был студентом в Пизанском университете. В заметке, написанной несколькими годами позже, Галилео упомянул, что его наблюдения были основаны на наблюдениях за камнями разных размеров, падающими на землю. Галилео наблюдал, как большие и маленькие камни падают на землю

одновременно вне зависимости от размера, а не как полагал Аристотель – сначала большой, потом маленький. Учитывая, что оба начали падение одновременно где-то высоко в небе, Галилей пришел к выводу, что Аристотель был неправ.

Галилео был не первым, кто поставил под сомнение теорию Аристотеля о падающих объектах^[11], и даже не первым, кто проверил ее верность с помощью эксперимента^[12]. Согласно записям Вивиани, когда Галилео был профессором в Пизе (1589–1592), он продемонстрировал ошибочность утверждения Аристотеля о падающих объектах из одинакового материала, но имеющих разный вес, с падающей Пизанской башни:

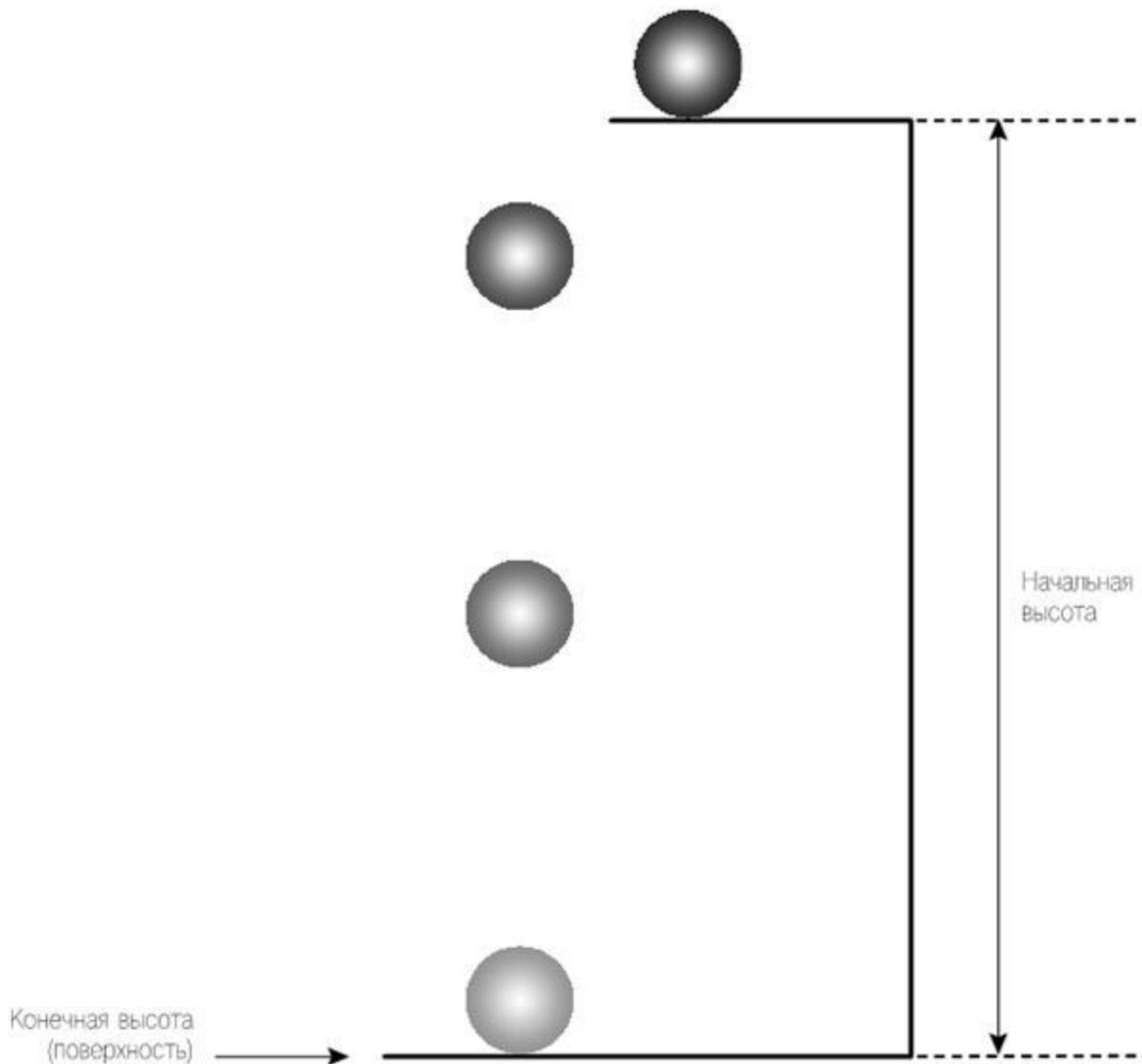


Рис. 2.2. Объект сталкивают со здания (или башни) – с начальной высоты. Пока он падает, его скорость растет (в то время как высота уменьшается). Он достигает максимальной скорости как раз перед тем, как столкнуться с поверхностью. Время до касания с поверхностью напрямую зависит от начальной высоты.

«...он полностью погрузился в исследование; в результате Галилео, к большому неудовольствию всех философов, с помощью опытов, наглядных примеров и аргументов опроверг идеи самого Аристотеля о движении, считавшиеся в то время истиной: как, например, тот факт, что вес объектов из одинакового материала при движении через одну и ту же среду будет влиять на их скорость (на самом деле она будет примерно одинаковой). Раз за разом в присутствии других преподавателей и студентов он подкреплял эти идеи экспериментами, которые проводил с высоты Падающей Пизанской башни».

Галилео пришел к выводу, что объекты с разным весом из одного и того же материала падают с одинаковой скоростью и за одинаковое время; теория Аристотеля была опровергнута раз и навсегда. Эту историю рассказал Вивини, который вел записи за Галилео в его последние годы, в 1657 году. Сегодня большинство историков не верят, что Галилео действительно бросал предметы с Пизанской башни.

Независимо от этого, мы не можем не гадать, вывел ли Галилей это следствие из своих наблюдений за маятником.

В конце концов, как мы отметили прежде, маятник – просто измененная версия свободного падения. Поэтому, так как период маятника – также определяющий его время падения ^[13](время, которое требуется для падения в низшую точку качания) – не зависит от массы ^[14], не должно быть сюрпризом и то, что время свободного падения объекта (время, через которое он коснется поверхности) также не зависит от нее.

Мы находим между качающимся маятником и свободно падающим объектом и другие общие черты. Опять-таки, скорость в любом пункте во время падения зависит от разности высот, и максимальная скорость все еще достигается в самой низкой точке – прямо перед тем, как объект коснется земли. А что же насчет времени падения? Мы уже отметили, что время падения маятника определяется периодом. Для

изохронного маятника это означает, что время падения, как и период, зависит только от длины нити; то есть не зависит от начальной высоты (амплитуды). Тем не менее мы также заметили, что это особый случай для маятника, а в общем период – а, следовательно, и время падения – будет зависеть от изначальной высоты, так что большая высота увеличивает время падения.

Это также справедливо и для свободно падающих объектов: чем выше начальная высота падения, тем больше времени требуется объекту, чтобы достичь поверхности. Таким образом, взаимоотношения между высотой и скоростью проявляются при свободном падении так же, как и при движении маятника. И снова все это имеет отношение к сохранению энергии. Давайте посмотрим на другую систему – наклонную плоскость.

Движение по наклонной плоскости

Мы уже говорили о наклонной плоскости, когда обсуждали простые механизмы, но теперь мы хотим понять принцип движения катящегося по наклонной плоскости объекта (рис. 2.3)^[15]. Сейчас вам должно быть ясно, что, как и в случае с маятником, это еще одна форма свободного падения. Тогда как свободному падению маятника препятствовал трос (нить), движение объекта на наклонной плоскости ограничено только тем, что он катится по наклону.

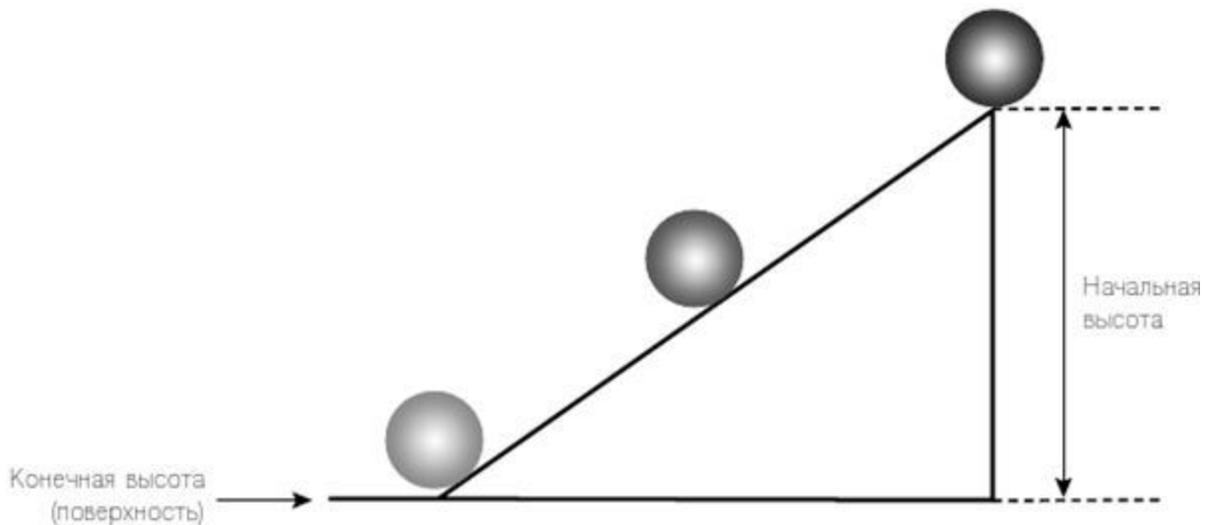


Рис. 2.3. После толчка объект катится по наклонной плоскости со своей начальной высоты. По ходу движения его скорость растет (а высота уменьшается). Объект достигнет максимальной скорости в самом конце движения по этой плоскости. Время, которое потребуется ему, чтобы достичь поверхности, зависит от начальной высоты (и угла) (см. также сноску 1 на стр. 40, чтобы узнать больше).

Скорее всего, Галилео начал изучать объекты, катящиеся по наклонной плоскости, в 1602 году, но тогда, будучи не уверенным в результате, перефокусировался на маятник. Однако в 1604 году Галилео придумал способ измерить увеличивающуюся скорость объекта, двигающегося по наклонной плоскости. Последовавшие за

этим эксперименты предоставили Галилео точные результаты, которые он применял к свободному падению и маятнику.

Галилео было недостаточно знать, что два объекта, отличающиеся массой, падают с одинаковой скоростью. Он хотел знать, как скоро падающий объект достигнет определенной высоты над землей. К сожалению, Галилео встретил на этом пути проблемы, которые необходимо было преодолеть.

Хотя в то время существовали очень точные способы измерить расстояние и вес, подобного прибора для измерения времени не было; Галилео было необходимо создать «секундомер». Секундомер Галилео состоял из контейнера с водой и отверстием внизу. Поскольку вода вытекала из основания контейнера с постоянной скоростью (приблизительно по три унции жидкости в секунду), у Галилео был точный способ измерить время. Галилео описывает свое устройство и гарантирует его точность в «Диалог о двух главнейших системах мира» (снова через Сальвиати) так:

«Для измерения времени мы использовали большой сосуд, наполненный водой, который был расположен под наклоном; к днищу этого судна была припаяна труба маленького диаметра, по которой текла тонкая струя воды, которую мы собрали в маленьком стакане после каждого спуска... Собранный таким образом воду тщательно взвешивали после каждого раза; разница этих весов позволяла нам измерить разницу времени с поразительной точностью, хотя операция повторялась множество раз, — и никакого заметного отличия в результатах замечено не было».

Тем не менее Галилео было непросто даже с водяными часами — скорость объекта в свободном падении для точных измерений была слишком высока. Вместо этого Галилео создал способ замедлить свободное падение, сохраняя ключевые физические результаты, которые и позволили ему позже сделать точные измерения при помощи водных часов^[16]. План Галилео был прост и изящен: рассмотреть объект, который катится по наклонной плоскости. Теперь объект «падал» гораздо медленнее, что позволило Галилео произвести точные измерения при помощи часов. Галилео был убежден, что основные принципы физики одинаковы, катится ли объект с определенной высоты (по наклонной плоскости) или совершает свободное падение с той же самой высоты. Следовательно, он

предвидел, что математические выражения для расчета времени достижения высоты – пусть и не одинаковые^[17] – будут похожи для обоих маршрутов. В конце концов, единственная разница между находящимся в состоянии свободного падения и катящимся вниз с одной и той же высоты объектами заключается в том, что последний двигается как по вертикали (высота), так и по горизонтали (длина)^[18], а первый только по вертикали, так как просто падает на землю.

Изначально Галилей предполагал, что вертикальное и горизонтальное направления движения объекта вниз по наклонной плоскости не зависят друг от друга, и их можно рассматривать отдельно. Это означало бы, что законы физики для движения в вертикальном направлении (которое интересовало его больше всего) одинаковы для свободного падения и движения по наклонной плоскости. Что же, оказывается, гипотезы Галилео были верны.

К данному моменту вас не должно удивлять, что скорость объекта, катящегося по наклонной плоскости^[19], увеличивается по мере снижения высоты. Максимальная скорость достигается в самой низкой точке, а время падения (время, которое требуется, чтобы скатиться к основанию наклонной плоскости) не зависит от массы, но непосредственно связано с начальной высотой, как и для (общего случая) маятника, и для свободно падающего объекта.

Так, для всех трех систем результаты одинаковы из-за того, что природа требует сохранения энергии. Кстати, мы не обсуждали подробно, что же в действительности влечет за собой это самое сохранение энергии; похоже, я немного затянул. Тем не менее для обсуждаемых систем у нас есть два фундаментальных типа отношений между высотой и скоростью:

- более низкая высота (от отправной точки) означает, что объект перемещается быстрее – это значит, что его наивысшая скорость будет достигнута в самой низкой точке;

- чем выше начальная высота, тем больше времени будет затрачено на падение, за исключением изохронного маятника, у которого время падения одинаково для каждой высоты.

Давайте посмотрим на другую версию эксперимента Галилео с маятником.

Повторное рассмотрение маятника

В эксперименте с «прерванным маятником» Галилео раскрыл еще больше последствий сохранения энергии. Вспомните, что маятник Галилео был просто свинцовым шаром, весящим одну-две унции, подвешенным на нити. Теперь вообразите маятник, спущенный от гвоздя, вбитого в стену, – маятник, который может свободно качаться из одной стороны в другую. От его точки покоя (где он висит вертикально) мы перемещаем маятник, скажем, вправо на некоторую начальную высоту и затем выпускаем его, не придавая ему ускорения^[20].

Поскольку маятник качается справа налево, мы видим, что он достигает своей конечной высоты. Галилео, вероятно, делал это много раз на различных начальных высотах и каждый раз получал один и тот же результат: начальная высота всегда равняется конечной. Ну, честно говоря, конечная высота, вероятно, немного ниже из-за некоторого сопротивления воздуха, но Галилео вывел, что пренебрежение этим приведет к равным высотам, что и было ключевым в этом исследовании.

Но тогда Галилео добавил к оригинальному эксперименту поворот. Теперь вообразите те же условия, за исключением того, что на этот раз мы забиваем гвоздь в стену таким образом, что струна неизбежно столкнется с ним, поскольку маятник качается справа налево (рис. 2.4). Хотя колебание маятника изменились из-за гвоздя, мы опять понимаем, что начальная высота и конечная равны. Однако что будет, если мы поменяем положение гвоздя? Это не имеет значения. Нить просто зацепится за гвоздь, колебание изменится, и маятник достигнет своей конечной высоты, которая (как и прежде) совпадет с начальной высотой.

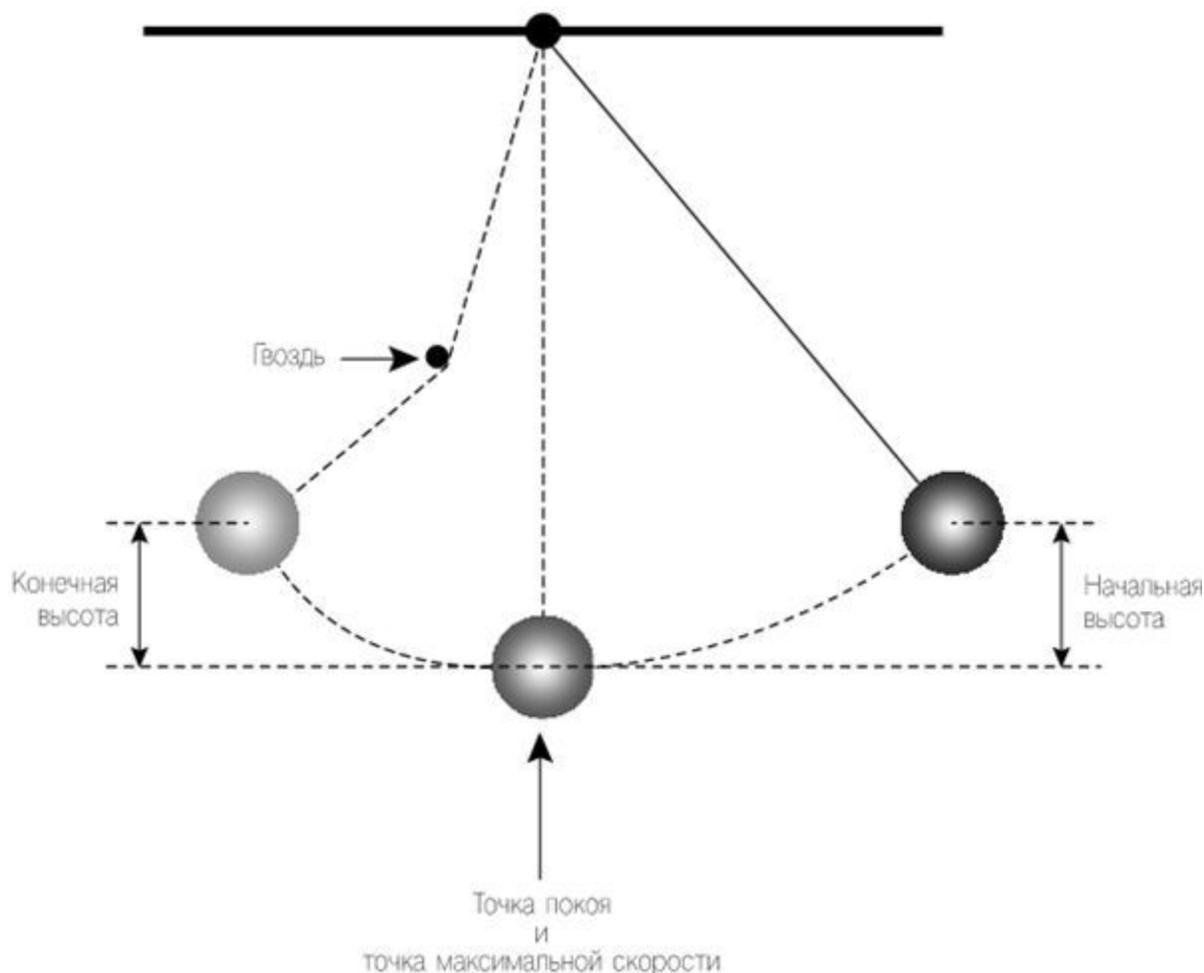


Рис. 2.4. Как и прежде, маятник перемещается направо, покидая точку покоя (самую низкую точку, в которой он висит вертикально), а затем поднимается на прежнюю высоту. При движении справа налево маятник цепляется за гвоздь, который вынуждает его изменить путь. Независимо от этого, маятник все равно достигает конечной высоты, которая совпадает с начальной.

Давайте рассмотрим еще одну, последнюю возможность: что если гвоздь лишает маятник возможности изменять свое колебание таким образом, чтобы он мог на самом деле достигнуть конечной высоты, которая равна начальной? В этом случае маятник просто продолжает двигаться, поскольку он оборачивается вокруг гвоздя.

Когда мы говорили о маятнике прежде, мы узнали, что, поскольку он качается вниз, удаляясь от начальной высоты, его скорость увеличивается. Другими словами, уменьшение в высоте приводит к

увеличению скорости. Теперь мы видим, что, поскольку маятник продолжает движение на подъеме, его конечная высота (или максимальная высота) совпадет с начальной. Как связаны эти концепции? Оказывается, взаимодействие между высотой и скоростью четко уравновешено. Мы выяснили, что сила тяготения, действующая на объект на данной высоте, передает ему потенциальную энергию, но мы никогда не говорили о ее коллеге, имя которой *кинетическая энергия*. Тогда как потенциальная энергия – «сохраненная энергия», кинетическая энергия – «энергия движения», которая придает объекту его скорость.

Ранее мы обсуждали, как работа сохраняется таким образом, что уменьшение в необходимой силе приводит к увеличению расстояния, на которое она прилагается, при использовании простой машины. Тем не менее общая работа, затрачиваемая на выполнение задачи, сохраняется.

Принципы сохранения кинетической и потенциальной энергии похожи. В случае маятника это означает, что, поскольку высота уменьшается, потеря потенциальной энергии компенсируется увеличением кинетической энергии, что означает увеличение скорости. И наоборот: в то время как маятник продолжает движение на подъем, он становится все ближе и ближе к своей начальной высоте (но с другой стороны), и, соответственно, уменьшается кинетическая энергия, маятник замедляется и останавливается на мгновение на финальной высоте (равной той, с которой он начал движение), перед тем как упасть обратно вниз. Поэтому маятник двигается с самой высокой скоростью в самой низкой точке колебания, в то время как его скорость ниже всего в самом верху колебания. Этот обмен между потенциальной энергией и кинетической энергией не уникален для маятника; это относится ко всем системам (наклонной плоскости, объектам в свободном падении и другим) и прекрасно сбалансировано, когда отсутствует трение^[21].

В середине 1609 года Галилео работал над своим трактатом о науке о движении и, услышав об изобретении подзорной трубы (предвестника телескопа), бросил все, чтобы сделать свою собственную версию. К концу августа у Галилео был 9-кратный телескоп, который он представил венецианскому Сенату и высокопоставленным лицам. За старания его вознаградили двойной

зарплатой и жильем. Однако были некоторые недоразумения, о которых Галилео узнал после. До истечения его текущего контракта зарплата не повышалась, и он должен был преподавать в Университете Падуи всю жизнь. Недовольный этой договоренностью, Галилео смог добиться нового соглашения в 1610 году, став главным математиком Пизанского университета и философом^[22] и математиком Великого герцога Тосканы. Назначение было пожизненным, и он не был обязан преподавать в университете. Он также не был обязан проживать в Пизе, что позволило ему наконец вернуться в любимую Флоренцию.

1 декабря 1609 года, у Галилео был 20-кратный телескоп, который позволял наблюдать грубую гористую поверхность Луны, четыре луны Юпитера (из 70 известных сегодня) и несколько новых звезд. Наряду с другими астрономическими открытиями Галилео эти наблюдения позволили доказать выдвинутую Николаем Коперником (1473–1543)^[23] теорию, что планеты обращаются вокруг Солнца, и Галилео рассказывал об этом всем. К сожалению, теория Коперника была в прямом конфликте с учением церкви, которая настаивала, что Земля – центр вселенной, и все планеты вращаются вокруг нее.

26 февраля 1616 года церковь сказала Галилео, что он должен:

«...полностью оставить ...мнение, что солнце находится в центре мира, и что впредь он не должен придерживаться этой теории, преподавать ее или защищать ее устно или в письменной форме; иначе Святая Церковь начнет слушание против него».

Галилео согласился. Тем не менее в 1624 году Папа Римский уверил Галилео, что тот может написать о теории Коперника строго как о математической. Однако в 1633 году, после публикации «Диалога о двух главнейших системах мира», Галилео, уже почти семидесятилетний и очень слабый здоровьем, опять столкнулся с инквизицией. Папа Римский Урбан VIII признал Галилео виновным в ереси и приговорил его к охраняемому домашнему аресту. Несмотря на это и смерть любимой дочери в 1634 году, Галилео возвратился к своему почти двадцатипятилетнему проекту и за три года закончил «Диалоги о двух главнейшей системах мира» в 1637 году и в 1638 году издал их – после того, как рукопись ввезли контрабандой из Италии в Голландию.

Удивительно, но церковь не наказала Галилео (в конце концов, его книга полностью опровергла физику Аристотеля, которая была

единственной физикой, которую поддерживала церковь). Возможно, духовных лидеров церкви поколебало предисловие от Галилео, указывающее, что книгу издали его друзья за границей без его согласия или знания и что он послал им рукопись просто из научного интереса.

Глава 3

Распутываем клубок

Энергия, импульс, сила и материя

Из описанных Галилео результатов эксперимента с маятниками и наклонными плоскостями и даже из его размышлений об экспериментах ясно, что он обладал очень острой интуицией в отношении энергии и ее сохранения. Хотя Галилео описывал результаты своей работы в «Диалоге о двух главнейших системах мира», он никогда целиком не осознавал, что у него в руках было начало закона сохранения энергии. Действительно, он описывал в первую очередь взаимодействия кинетической и потенциальной энергий, которые вместе составляют *механическую энергию*; они были единственными формами энергии, которые он знал из экспериментов.

Строго говоря, в рамках систем Галилео считал, что механическая энергия будет сохраняться только при отсутствии трения. В своих экспериментах он стремился устранить трение и сознательно игнорировал его в результатах и выводах. «Игнорировал» не в том смысле, что относился к нему небрежно. Наоборот, Галилео был очень обеспокоен точностью своих экспериментальных измерений.

Однако он не позволял своему беспокойству о деталях препятствовать пониманию того, что определенные несоответствия или очевидные противоречия – просто мелочи, которыми оправданно было пренебречь, чтобы увидеть большую картину. Таким образом, в то время как современники Галилео мучились с подобными деталями, неспособные сделать следующий большой шаг, Галилео твердо верил в математическую последовательность природы и оставил их далеко позади. Эта способность Галилео использовать собственные наблюдения при изучении реальных систем (вроде объекта, катящегося по наклонной плоскости), где присутствовало трение, и выявлять на их основе фундаментальные физические принципы доказывает его истинную гениальность.

Сегодня мы понимаем результаты работы всех систем, которые изучал Галилео, с точки зрения сохранения механической энергии. Представьте себе предмет, лежащий на вашем журнальном столике, –

пульт от вашего телевизора. Сейчас, естественно, у предмета нет кинетической энергии, так как он не двигается сам по себе (я надеюсь). Но давайте рассмотрим такой сценарий: предположите, что вы очень мягко подталкиваете его к краю стола, пока он наконец не падает на пол. Очевидно, когда пульт падал, у него была кинетическая энергия (до того, как он коснулся пола). Но прежде чем вы толкнули его к краю и уронили на пол, он обладал *потенциальной энергией*.

В этом примере объект обладал потенциальной энергией, пока он лежал на столе, а после он приобрел кинетическую; таково отношение между потенциальной и кинетической энергиями объекта.

Независимо от того, что это за объект – качающийся маятник, объект, катящийся по наклонной плоскости или падающий со здания, или пульт от ТВ на вашем журнальном столике, – нахождение на определенной высоте дает ему потенциальную энергию, в то время как падение с этой высоты преобразовывает потенциальную энергию в кинетическую. Потенциальная энергия в этих примерах имеет в своей основе земную силу тяготения, которая «тянет» данный объект вниз^[24].

В то время как эксперименты Галилео существенно развили наши понимание механической энергии, у него самого никогда не было четкого понимания того, что такое *энергия* на самом деле. В этом отношении он был не одинок. Непонимание в определении энергии – и физически, и математически – все еще было глубоко связано с темами *импульса* и *силы*. И, как будто этого было недостаточно, было очевидно, что природа вещества как-то в этом замешана; к несчастью, до ясного понимания последней было еще далеко. Галилео умер в 1642 году, свои последние девять лет жизни он провел под домашним арестом, а заключительные четыре года – в полной слепоте. Достаточно сказать, что в описании энергии Галилео продвинулся дальше, чем кто-либо еще. К моменту его смерти истинный характер энергии все еще был тайной и до полного понимания оставалось больше двухсот лет.

Столкновение объектов

К концу XVII века математика стала поставлять мощные инструменты для описания физических явлений. Несмотря на наличие

необходимой математики энергию, импульс и силу еще долго не понимали.

Частично потому, что у ключевых игроков были разные познания в математике, способности или подход к работе. В это время математика не была уделом обученных профессионалов. Аристократы и образованные люди также считали модным увлекаться ей, и аутсайдеры стремились получить признание благодаря академическим состязаниям (в комплекте с призами). Математика была не просто инструментом для решения физических проблем; она также способствовала карьере, создавала союзы, дарила влияние и производила впечатление на других.

Кроме политики, были другие (более важные) предметы спора, сосредотачивающиеся на физической интерпретации получающихся значений. А именно: как *физические свойства* энергии, импульса, и силы выглядят с *математической точки зрения*? Более того, какие из этих физических свойств, если таковые имелись, сохранялись?

Идея о том, что определенные свойства сохраняются, играла все большую роль по мере того, как ученые и математики убеждались (часто на основе интуиции, метафизических, философских или религиозных причин, а не одной только научной аргументации), что сохранение энергии было чем-то фундаментальным в работе Вселенной.

В результате идею сохранения стали чаще применять в математических вычислениях^[25] (иногда неправильно), которые также давали больше наглядности. Главной темой этих интенсивных обсуждений часто становилось лобовое столкновение (*динамика взаимодействия тел*) «твердых сфер», таких как столкновение между двумя бильярдными шарами на бильярдном столе.

Это, в свою очередь, породило еще одну проблему: до какой степени объект может быть «сжат» или «схлопнут»? Другими словами, насколько «тверды» сталкивающиеся объекты и могут ли они деформироваться при столкновении? Очевидно, это связано с самой природой вещества.

Сохранение «движения»

В 1644 году в своих «Первоначалах философии» Рене Декарт (1596–1650) предположил, что *движение* Вселенной в целом сохраняется. Таким образом, когда два объекта сталкиваются друг с другом, их совместное движение до и после столкновения остается неизменным. Его основания для такого вывода были просты: Бог создал Вселенную такой.

«Очевидно, когда Бог создал мир, Он не только перемещал его части различными способами, но также одновременно заставил некоторые части двигать другие и передавать свое движение этим другим. Таким образом, теперь мир поддерживают те же действия и те же законы, по которым Он создал его, Он сохраняет движение; движение, не всегда содержащееся в тех же частях материи, но передающееся от некоторых частей другим в зависимости от способов, которыми они взаимодействуют».

По мнению Декарта, движение объекта было правильно измерять количеством $m|v|$; другими словами, масса объекта m , умноженная на его скорость $|v|$, определяет количество движения. Декарт также ввел несколько правил (семь, если быть точным), позволяющих правильно предсказывать результат изолированного столкновения между двумя «совершенно твердыми» телами. Его правила были прямой противоположностью повседневному опыту, и Декарт признавал это:

«Действительно, опыт зачастую как будто противоречит правилам, которые я только что объяснил. Однако, так как в мире не может быть никаких тел, которые указанным образом отделены от всех других, и так как мы редко сталкиваемся с идеально твердыми телами, очень трудно произвести вычисление, чтобы определить, до какой степени движение каждого тела может измениться под действием столкновения с другим».

Трогательное утверждение, но ошибочное.

Импульс, не «движение»

В 1666 году эксперимент со сталкивающимися телами привлек внимание Лондонского королевского общества, и Роберт Гук (1635–

1703) на еженедельных встречах стал демонстрировать свои собственные эксперименты по столкновению тел. Другие также начали эксперименты – среди них Кристофер Рен (1632–1723), которого вместе с Христианом Гюйгенсом (1629–1695) и Джоном Уоллисом (1616–1703) в 1668 году пригласили представить теорию о связанных законах движения. Это было спустя двадцать четыре года после появления «Первоначал философии» Декарта.

Вскоре после выхода статьи были прочитаны Обществу: Уоллис – 26 ноября 1668 года, Рен – 17 декабря 1668 года, Гюйгенс, изданный позже в том же году и в «Философских трудах», и в «Журналь де саван», – 7 января 1669 года. Гюйгенс взял свою работу из труда, который в 1656 году он уже закончил, но решил в то время не издавать; труд издали после его смерти, в 1703 году, под заглавием «О движении тел под влиянием удара» (*De Motu Corporum ex Percussione*).

Они независимо пришли к одному заключению, что во время столкновения возникает *импульс*, который сохраняется, – а не *движение*, как настаивал Декарт. В отличие от количества движения у Декарта – $m|v|$, импульс объекта рассчитывается как mv , то есть как масса, умноженная на вектор скорости v – не скорость, $|v|$. В чем разница?

Представьте, что вы едете по дороге в своем автомобиле и смотрите на спидометр, который показывает вашу скорость $|v|$; это значение, к которому обращался Декарт. Теперь представьте, что вы смотрите на спидометр, а затем на компас; теперь вы знаете и свою скорость, и направление. Это и есть скорости v . Мы называем v *вектором*, так как v показывает и направление, и величину, тогда как скорость $|v|$, которую мы можем упростить до v , дает только величину и называется *скаляром*.

Гюйгенс, который создал более полную теорию, пошел дальше и пришел к заключению, что для «твердых сфер», которые сталкиваются друг с другом и возвращаются к состоянию, предшествующему столкновению, сохраняется значение mv^2 . Сегодня мы называем эти типы столкновений *упругими* в противоположность *неупругим* столкновениям, где сталкивающиеся объекты переносят своего рода деформацию – «сжимаются», – сохраняя это состояние после столкновения.

Трудам Уоллиса (который также рассмотрел неупругие столкновения), Рена и Гюйгенса понадобилось пройти долгий путь, чтобы улучшить понимание динамики взаимодействия тел. Это устанавливает начальную точку опоры для сохранения импульса и опровергает теорию сохранения движения Декарта. Кроме того, mv^2 Гюйгенса дало новое понимание сохранения, позволив позже возобновить этот спор.

***Vis viva* – «живая сила»**

В 1686 году Готтфрид Вильгельм Лейбниц (1646–1716) издал свою «Краткую демонстрацию памятной ошибки Декарта и других относительно законов природы, согласно которому Бог, как говорят, всегда сохраняет то же количество движения; закон, который они также неправильно применяют в механике». В этом труде он приводит доводы против теории Декарта о сохранении суммарного движения и дает примеры, где эта идея не работает. Таким образом начался известный спор, известный как «*vis viva*».

В 1695 году в «Очерке динамики» Лейбниц публично рассматривает то, что он считает ключевой величиной mv^2 , которое он потом назовет *vis viva*, или «живая сила»; это та же величина, которая, как указал Гюйгенс, сохраняется в отдельных столкновениях между твердыми сферами. Однако для Лейбница сохранение *vis viva* было универсальным.

Лейбниц рассматривал *vis viva* как меру способности объекта передать энергию посредством движения. Таким образом, движущееся тело, сталкивающееся с покоящимся, передает «жизнь», приводя второе в движение. В целом сталкивающиеся объекты, как предполагалось, передавали *vis viva* друг другу без потери, таким образом сохраняя ее.

Тем не менее Лейбниц заинтересовался (и небезосновательно) столкновениями, которые, как «кажется», теряют свою *vis viva*. Классический пример этого – падающий объект, сталкивающийся с землей, где он в конечном счете резко останавливается. Другим хорошим примером были бы два «мягких объекта», движущиеся друг на друга, «сминаясь» или деформируясь, замедляясь в процессе.

Лейбниц был умным парнем и отлично знал об этом противоречии. По его словам, *vis viva* не исчезает, а просто передается мелким частям в объекте. Смысл в том, что эти мелкие кусочки поглощают ее, но не делают вклада в движение объекта в целом, и таким образом *vis viva* сохраняется. Он сказал: «Но эта потеря... не умаляет неприкосновенную истинность закона сохранения... Ибо то, что поглощают мелкие частицы, не потеряно для Вселенной...»

В то время как Лейбниц представлял *vis viva* как силу, приводящую объект в движение, он рассматривал *vis mortua*, или «мертвую силу», как придающую объекту стремление к движению. Например, у объекта, лежащего на столе, в силу высоты от пола и его веса есть потенциал движения, который будет реализован, едва объект столкнут со стола, – он упадет на пол. Поэтому *vis mortua* может превратиться в *vis viva*, когда ранее неподвижный объект преодолевает то, что его сдерживало; как только объект сталкивают с края стола, ничто больше не позволяет ему сопротивляться падению на пол. Эти идеи были, конечно, предшественниками того, что мы теперь называем потенциальной и кинетической энергиями и того, что энергия может на самом деле быть преобразована из одной формы в другую: *vis mortua* превращается в *vis viva*.

Безусловно, теория Лейбница о *vis viva* имеет метафизическую природу. Как и многие другие философы, он был просто убежден, что природа хранит «нечто». Допущение, что это – *vis viva*, позволяло Лейбницу считать, что Вселенная – самоподдерживающаяся система, которая будет оставаться в движении, а не какие-нибудь «часы», которые остановятся, если их постоянно не заводить.

Vis viva Лейбница и связанные понятия были значительным шагом вперед. Тем не менее сам факт того, что он рассматривал эту концепцию как фактическую меру силы, а не форму энергии (современное выражение для кинетической энергии – $mv^2/2$), иллюстрирует беспорядок в современной ему науке. Споры о *vis viva*, которые Лейбниц начал в 1686 году, продолжались довольно долго и не были полностью разрешены до некоторой неопределенной даты в XVIII или, возможно, даже XIX веке.

Законы движения

В 1687 году Исаак Ньютон (1643–1727) опубликовал свою книгу «Начала» – без сомнения, одну из важнейших работ по физике всех времен. Хотя это было удивительно нечитабельно из-за содержания и формы, ее быстро распродали. В этой книге Ньютон описывает (среди прочего) три закона движения. Эти три закона доказывали – и математически, и физически, – чем в действительности является и не является сила. Для начала, это не энергия. В продолжение Ньютон корректно выводит из своего третьего закона сохранение импульса^[26]. В отличие от Гюйгенса, Ньютон доказал, что импульс сохраняется универсально, не только во время столкновения двух твердых сфер. Сегодня мы видим, что импульс сохраняется во всех видах систем от бильярдных шаров до субатомных частиц.

Хотя Ньютон воздержался от участия в полемике вокруг *vis viva*, он был против *vis viva* в целом, так как «живая сила», казалось, не сохранялась при неупругих столкновениях; по-видимому, его не убедили аргументы Лейбница, что *vis viva* передается малым частицам в объекте. В целом Ньютон просто не верил в сохранение энергии. В то время как Декарт был уверен, что Бог играл роль всемирного архитектора, Ньютон – будучи очень религиозным – хотел видеть Бога в более заметной и постоянной роли, чем первоначальный проектировщик.

Для него участие Бога было необходимо, чтобы поддерживать все в рабочем состоянии. Соответственно, энергия не сохранялась, потому что был Бог, который продолжал предоставлять Вселенной энергию по мере необходимости; была рука Бога, которая заводила «всемирные часы», чтобы все работало вечно. То, что Вселенная все еще продолжает работать, было для Ньютона доказательством существования Бога. Таким образом, Вселенная Ньютона работала согласно его законам движения и хранила импульс, но требовала случайного «подталкивания» от Бога, чтобы события шли своим чередом.

Ньютон написал «Начала» главным образом для того, чтобы найти решение проблем, связанных с астрономическими объектами, таких как движение планет вокруг Солнца, и дал только несколько примеров

того, как можно было бы применить эти законы к движению здесь, на Земле^[27]. И хотя результаты были впечатляющими, небольшое количество примеров и отсутствие их точности оставили многих задаваться вопросом, как применить Ньютоновы законы движения к земным проблемам в целом. В частности, динамика взаимодействия тел, как казалось многим, методам Ньютона не поддавалась.

Понимание вещества

Отсутствие четкого понимания состава вещества и его фундаментальных принципов только усложняло для человечества задачу по постижению движения. В 1724 году Парижская академия провела конкурс, касающийся законов, управляющих столкновением «абсолютно твердых сфер». Иоганн Бернулли (1667–1748) начал с того, что прямо отверг возможность существования таких тел в природе. Само собой разумеется, его позиция не помогла ему расположить к себе академию, и его дисквалифицировали.

Бернулли (который в своей аргументации опирался на «Законы непрерывности» Лейбница) считал, что если бы две абсолютно твердых сферы столкнулись, их направления и скорости должны были бы мгновенно измениться под влиянием импульса. Это вызвано тем, что совершенно твердый объект не будет «мяться» или «деформироваться», а скорее останется после столкновения неизменным. С другой стороны, упругий объект после воздействия сожмется, а впоследствии вернется к своему исходному состоянию^[28], подобно пружине. Конечно, для этого процесса потребуется определенное количество времени. Для Бернулли и Лейбница отсутствие такого механизма для абсолютно твердых сфер – объяснение того, почему столкновение должно было произойти мгновенно и, следовательно, физически неосуществимо.

Бернулли считал, что вещество изначально упругое, а столкновение объектов приводит к сжатию и расширению «крошечных пружин» внутри них. Поскольку одна из этих пружин сжата, *vis mortua* и ее последующее распространение приводит ее к преобразованию в *vis viva*. В свою очередь, *vis viva* передается другому телу, вовлеченному в столкновение, таким образом изменяя его движение. Используя эту оригинальную модель вещества, Бернулли смог показать, как

и Гюйгенс, что и *vis viva*, и импульс при столкновении сохраняются. Таким образом, Бернулли обеспечил оригинальную парадигму Лейбница математической и физической основой, расширив ее.

Когда XVIII век подошел к концу, область физики, которую сегодня мы называем классической механикой, действительно вступила в свои права. Галилео показал, что можно было понять Вселенную через осторожное наблюдение и математику. Многие продолжали строить на прочном научном фундаменте, который он заложил. Со времен Галилео математика стала еще более влиятельной, а ее приложение к физическим проблемам – более распространенным. Работа Галилео дала базу для сохранения «чего-то», в чем в конечном счете распознали сохранение механической энергии, или, другими словами, преобразование потенциальной энергии в кинетическую энергию – и наоборот.

Это понимание выросло из попытки лучше понять импульс, силу, вещество, а также энергию. Хотя Ньютон опровергал сохранение энергии, он действительно доказал универсальное сохранение импульса, дав математическое и физическое описание силы, и представил законы движения земных и небесных тел.

Работы других исследователей уточнили и дополнили его исследования. Даже рабочее определение вещества как действия «крошечных пружин», далекое от полного, оказалось успешным с точки зрения решения проблем физики. Действительно, казалось, что проблемные вопросы в значительной степени находились «под контролем». Тем не менее нерешенных вопросов было все еще много. Среди них, возможно, одним из самых непростых было тепло.

Глава 4

Недостающее звено

Тепло: последняя деталь в загадке об энергии

Большую часть наших знаний об энергии можно отнести к двум областям физики: *классической механике* и *термодинамике*. Эксперименты с качающимися маятниками, шарами, катящимися по наклонным плоскостям, и объектами, падающими со зданий, помогли многое понять о свойствах и поведении энергии, но картина была все еще очень неполной. Понадобились исследования термодинамики, чтобы раскрыть последнюю часть загадки об энергии, ту, которая оставалась нетронутой столь долго, – тепло.

Чтобы мы по-настоящему поняли энергию и ее фундаментальную природу, нам понадобились открытия, сделанные в механике за тысячи лет и в термодинамике – за несколько сотен. После стольких лет и затраченных усилий открылась важнейшая истина: энергия не создается и не разрушается; она плавно переходит из одной формы в другую.

Тепловая теория

Намеки на понимание сохранения энергии, как это было с импульсом, появились в 1840 году. Но в отличие от импульса, который был сравнительно быстро принят и осознан, энергия все еще оставалась тайной. Стало понятно, что энергия может быть потенциальной или кинетической и одна «трансформируется» в другую; таким образом, принцип сохранения в этом конкретном случае казался бесспорным. На самом же деле эти рассуждения были далеки от полного понимания. Самой большой частью загадки, которая все еще ждала объяснений, было тепло.

Системы, такие как объекты, катящиеся по наклонным плоскостям, и качающиеся маятники (теперь, я уверен, они должны быть вашими любимчиками), были хорошо описаны теорией механики, изложенной в «Началах» Ньютона. Этот тип физических проблем когда-то был решен при помощи геометрии (что сделал Галилео), а теперь описан

несколько более абстрактными, но намного более компактными и эффективными уравнениями аналитической геометрии (что сделал Декарт) и дифференциальным и интегральным исчислением (что сделали Лейбниц и Ньютон независимо друг от друга).

Эти новые математические инструменты с блеском позволили решить проблемы механики. Отношения между фактическими физическими величинами (такими как сила и импульс) и математикой, описывающей их, были надежно доказаны и сопровождалась экспериментальной частью; таким образом, можно было записать математические уравнения, описывающие физическую систему, и затем проверить эту теорию в лаборатории. Действительно, физика механики была огромным успехом. Но где в эту замечательную новую структуру вписывалось тепло и было ли для него вообще место в ней?

К концу XVIII века тепло наряду с родственными ему явлениями – светом, магнетизмом и электричеством – считали *невесомой жидкостью*. Эти невесомые жидкости отделяли от «обычной материи» (понятой только слегка лучше), из которой состоят предметы повседневного пользования, из-за отсутствия у них определенной структуры. Их считали своего рода жидкостью, способной течь подобно воде, что позволяло им свободно перемещаться сквозь предполагаемое пространство, которое должно было существовать в обычной материи, – перемещаться, как, например, солнечный свет проходит через стакан или окно или как тепло сквозь кофейную чашку доходит до вашей руки.

Само собой разумеется, теории XVIII века, описывающие физические явления, носили качественный характер, когда дело касалось электричества, света, тепла и т. д. Это резко контрастировало с физическими проблемами механики, описанными изящной математикой.

Пьер-Симон Лаплас (1749–1827) предположил, что тепло – это жидкость, состоящая из частиц, а Антуан Лавуазье (1743–1794) считал эти частицы «теплородом». В то время как частицы, составляющие обычную материю, считались соединенными друг с другом, частицы теплорода, как тогда полагали, отталкивали одна другую^[29].

То, что частицы обычной материи были соединены друг с другом, казалось, согласовывалось с результатами эксперимента: охлаждение газа приводит к тому, что частицы, перемещающиеся относительно

друг друга, формируют жидкую структуру, и последующее охлаждение приводит к тому, что они становятся еще более тесно прилегающими друг к другу, при заморозке формируя твердую структуру. Нагревание же вещества означало, что вы добавляете в него тепловые частицы, и, так как частицы теплорода отталкиваются друг от друга, силы притяжения между частицами обычной материи ослабевают. Следовательно, добавьте достаточно тепла к твердому веществу (такому как лед), и он растает; добавьте еще больше, и он вскипит. Теплород, казалось, имел смысл, когда речь шла о смене агрегатных состояний вещества.

В 1789 году Лавуазье издал «Элементарный курс химии», в котором он описывает тридцать три элемента. Список начинается с теплорода (ну с чего же еще) и продолжается светом, кислородом, азотом и водородом. Лавуазье также рассматривает свои исследования и их результаты в аспекте множества химических реакций. В частности, он отмечает, что в химических реакциях, как он выяснил, масса исходных материалов (реагентов) равняется массе конечных продуктов (продуктов).

Другими словами, независимо от протекающей химической реакции общая масса всех задействованных материалов сохраняется на всем протяжении реакции. На самом деле Лавуазье смог доказать это, просто «взвесив» реагенты и продукты с очень точными весами, которые он сам и создал. Он приходит к заключению, что в целом это фундаментальное свойство всех элементов и, так как тепло входило в его список элементов, оно также должно сохраняться.

Факт того, что тепло сохранялось и поэтому не могло быть создано или разрушено, был ключевым в теплородной теории. Прагматически это означало, что если один объект терял тепло, другой (соседний) объект получал то же самое количество тепла. Подобным способом Лавуазье также понял, что теплород (тепло) не имеет веса. Таким образом, хотя тепло, как предполагалось, было «материальным» веществом, которое сохранялось в течение реакции, веса у него не было. Неудивительно, что это вызвало подозрения у некоторых людей.

Хотя теплородная теория, казалось, была в состоянии объяснить некоторые вещи, оставался один большой вопрос: как тепло, выделяемое при трении, вписывается в эту теорию? Мы все знаем, что трение двух материалов друг об друга производит соответственное

количество тепла. Согласно тепловой теории, произведенное тепло является результатом того, что один объект «вышибает» тепло из другого. Другими словами, когда два объекта находятся в состоянии трения и вырабатывают тепло, теплородная теория утверждает, что это происходит в процессе сдвигания частиц теплорода. Не все принимали это объяснение за чистую монету.

Тепло – это «движение»

Граф Румфорд Баварский, урожденный Бенджамин Томпсон (1753–1814), задался вопросом о природе тепла во время производства пушек в Мюнхене^[30]. Румфорд заметил, что, когда ствол орудия изготавливался при помощи сверления, он становился горячим. Это не было удивительным, так как процесс бурения создает трение между сверлом и стволом орудия. В действительности же его удивил тот факт, что, пока работает сверло, продолжает вырабатываться тепло. То есть, пока продолжается трение (в данном случае между сверлом и стволом пушки), всегда производится тепло.

Согласно теплородной теории, однако, тепло от трения возникает при «освобождении» частиц теплорода, которые изначально «хранились» в стволе орудия. Если бы это действительно было так, тепло должно скорее выделяться в какой-то конкретный момент вместо того, чтобы производиться постоянно. Кроме того, если тепло на самом деле хранится в стволе орудия, оно должно было расплавить ствол пушки или сделать его чрезвычайно горячим на ощупь. Это, казалось бы, означало, что запасов теплорода не было (как того требует теплородная теория) – очевидно, он был доступен в неограниченных количествах!

В 1798 году Румфорд заявляет:

«Вряд ли стоит добавлять, что ничто из того, что любое изолированное тело... может продолжать предоставлять в неограниченном количестве, не может быть материальным веществом, и мне представляется крайне трудным, если вообще возможным, получить четкую идею о чем-либо ином, кроме движения, способного возбуждаться и передаваться подобно тому, как возбуждалось и передавалось в этих экспериментах тепло».

Безусловно, в представлении Румфорда дрель «связана» со стволом орудия, что приводит к своего рода «движению» в нем, проявляющемся как тепло. Таким образом он опровергает теплородную теорию и ее определение тепла как материального вещества, как предполагал Лавуазье. Более того, он упоминает, почему тепло действительно невесомо, как показал эксперимент Лавуазье:

тепло – просто артефакт некоего «движения» или «возбуждения» внутри, в данном случае – ствола орудия.

Однако, если тепло – это «движение», что же именно происходит с объектом, вырабатывающим это тепло? К сожалению, Румфорд не дает этому объяснения, заявляя:

«Я очень далек от понимания того, как или с помощью чего движение внутри тел, которые выделяют тепло, возбуждается, продолжается и распространяется...»

Таким образом, без более глубокого понимания «движения» главное открытие Румфорда о природе тепла игнорировали до 1840-х годов.

Механический эквивалент тепла

Когда Румфорд заявил, что тепло является «движением», он, возможно непреднамеренно, связал тепло с *механикой*. В механике движение объектов, катящихся по наклонной плоскости или падающих с высоты, изучал Галилео и хорошо описал математическими уравнениями в «Началах» Ньютон. Поэтому, если тепло было действительно «движением», как предположил Румфорд, казалось вероятным, что оно может вписаться в надежную структуру у механики. Среди прочего, механика успешно разобралась с энергией, кинетической и потенциальной; возможно, теперь она могла обеспечить более ясное понимание тепла.

Во время службы доктором на голландском торговом судне в Ост-Индии немецкий врач Юлиус Роберт фон Майер (1814–1878) заметил, что при кровотоке у венозной крови в тропиках был более яркий красный цвет, чем в Европе. Венозная кровь – кровь, которая переносится по венам к сердцу. За исключением легочных вен, эта кровь отличается низким содержанием кислорода и высоким – углекислого газа, отдавая кислород тканям и поглощая углекислый газ. И наоборот, более яркий красный цвет венозной крови, который наблюдал Майер, означал, что в более теплом климате тропиков тело расходует кислород не так быстро.

Майер пришел к заключению, что человеческое тело использует меньше кислорода в более теплых климатических условиях, так как ему нужно тратить меньше ресурсов на поддержание нормальной температуры тела. Далее он пришел к заключению, что и выполнение

физической работы, и производство тепла для поддержания нормальной температуры тела требуют потребления пищи и в некотором роде эквивалентны: тепло и работа – две версии одного и того же.

В 1841 году, спустя шесть месяцев после возвращения домой, Майер послал свои идеи уважаемому научному журналу, но только чтобы получить отказ. Его мысли были представлены очень неясно и запутанно, вероятно, частично из-за того, что он не владел физикой и математикой. Понимая свои недостатки, он попросил друга преподавать ему математику и физику и благодаря этому в 1842 году представил доработанную версию своей рукописи журналу о химии и фармацевтике *Annalen der Chemie und Pharmacie*.

В этой версии теория была крепче, но по-прежнему сохранялся метафизический стиль. Тем не менее в данном труде он представил оценку *механического эквивалента тепла*. То есть, предварительно оговорив, что *работа* (как указано в первой части) и *тепло* являются различными формами одной и той же величины, он пытался, используя только вычисления и не проводя эксперименты, определить их точные отношения. Он приходит к заключению, что энергия (он называл ее силой) – неразрушима и поддается преобразованию. Это практически полностью отражает нашу современную версию *первого начала термодинамики* (или, если быть более точным, закона сохранения энергии), не достает только факта, что энергия не может быть создана.

В 1845 году Майер за свой счет издал более всестороннюю трактовку своих идей, теперь применив их к проблемам физики, которые интересовали его изначально. В 1849 году Майер, к тому времени страдавший от умственного расстройства, совершил попытку самоубийства, выпрыгнув из окна своего дома с третьего этажа. После падения на высоту приблизительно тридцати футов он получает небольшую, но все же неизлечимую травму. Давление от насмешек, смерть двоих детей и нависшая потеря признания его достижений (первооткрывателем закона считали другого ученого, Джеймса Прескотта Джоуля) все же принесли свои негативные последствия.

В отличие от Майера, Джеймс Прескотт Джоуль (1818–1889) проводил строгие и кропотливые эксперименты, чтобы проверить свои идеи. В одном эксперименте он создал ток в изолированном проводе,

который был погружен в воду, – таким образом было выделено тепло^[31] (в результате сопротивления между током и проводом). Напряжение создавалось при помощи электрогенератора, который работал за счет силы тяжести. В другом эксперименте он также использовал гравитацию, но на этот раз чтобы повернуть гребное колесо, погруженное в воду. Вращение гребного колеса в воде производило тепло в результате трения воды и колеса.

Два эти отдельных эксперимента наглядно продемонстрировали фундаментальную истину: падающий вес производит работу^[32], необходимую для производства требуемого объема тепла. Джоуль смог определить, сколько работы требуется, чтобы произвести необходимое количество тепла^[33], таким образом давая одну из точнейших оценок *механического эквивалента тепла*. В 1843 году он заявляет:

«Количество тепла, необходимое для увеличения температуры одного фунта воды на один градус по шкале Фаренгейта, равно и может быть преобразовано в механическую силу, способную поднять 838 фунтов (вертикально) на высоту одного фута».

Усердный в своих попытках^[34], Джоуль проверяет результаты несколько раз и получает несколько значений: 820, 814, 795, 760 и другие.

В 1845 году, то есть в том же году, когда Майер опубликовал более подробную работу на основе своего оригинального труда за свой счет, Джоуль объявил о среднем значении 817 футо-фунтов, а в 1850 году, после еще большего количества измерений, он остановился на значении 772 футо-фунта, которое на 1 % отличается от современного – 778 футо-фунтов (*Прим. ред.* – сегодня это 427 килограмм-сила-метр в Международной системе измерений).

Природа установила невероятно высокую «механическую цену» на количество тепла, которое требуется, к примеру, чтобы вращать гребное колесо в воде. Для большей уверенности рассмотрим количество тепла, которое вы производите, энергично помешивая некий напиток, – вы получите смехотворно малое значение^[35]. И все же, без цифровых термометров под рукой Джоуль смог получить удивительно точный результат.

Ни опубликованные отчеты Джоуля, ни переговоры на научных встречах не вызвали интереса к его работам. В 1847 году Джоуль выступает с докладом на Оксфордской встрече Британской ассоциации

продвижения науки. Председатель попросил его не растягивать свою речь, так как ожидалось, что она вызовет мало энтузиазма у аудитории.

Джоуль позднее так опишет это событие:

«Хотя я старался сделать доклад интересным, никто не стал бы его комментировать, если бы один молодой человек не начал обсуждение, и его интеллектуальные наблюдения не пробудили бы живой интерес к новой теории».

Молодым человеком был Уильям Томсон, которому тогда было всего двадцать три года.

Уильям Томсон (позже лорд Кельвин) (1824–1907) быстро понял значение работ Джоуля. Это не означало, что он немедленно поверил результатам Джоуля. Наоборот, заключения Джоуля противоречили вере Томсона в теплородную теорию и работу Сади Карно (1796–1832), другого поклонника теплородной теории, который настаивал, что при механической работе тепловых двигателей тепло сохранялось; при работе теплового двигателя потери тепла никогда не происходят. Это, конечно, противоречило идеям Джоуля об эквивалентности тепла и работы, которые гласили, что процесс механической работы теплового двигателя должен привести к потреблению тепла, а не сохранению.

Это следует из нашего обсуждения экспериментов Джоуля, в которых он показал, что работа, производимая падающим весом, приводит к производству тепла в соответствии с «эквивалентностью»: подъем веса назад на начальную высоту потребовал бы потребления того же самого количества тепла. Действительно, в 1848 году Джоуль сказал Томсону, что он стремится предоставить «доказательство преобразования тепла в [механическую] энергию». Джоуль, в отличие от Карно, полагал, что тепло может быть преобразовано в работу и что это фундаментальная истина теории теплового двигателя. Кроме того, как и Румфорд, Джоуль полагал, что тепло – это движение, говоря, что он всегда «склонялся к теории, которая рассматривает тепло как движение среди частиц вещества».

В конечном счете Томсон стал одним из самых ярких сторонников Джоуля, объявив в 1854 году в обращении к Британской ассоциации, что открытия Джоуля в области тепла и работы «привели к самой большой реформе в области физики со времен Ньютона». В 1866 году

Джоуля наградили медалью Копли; Майер получил эту награду пять лет спустя.

Усилия Майера и Джоуля имели большое значение для изучения природы тепла. Теорию Румфорда о тепле как форме «движения» теперь рассматривали с точки зрения движения частиц, из которых состоит вещество. Зафиксированный механический эквивалент тепла раз и навсегда позволил определить тепло просто как иную форму энергии и демонстрировал, что энергия, по крайней мере в этом отношении, сохраняется. Однако понимание сохранения энергии достигает нового уровня благодаря Герману фон Гельмгольцу.

Сохранение всей энергии

Физик по образованию, Герман фон Гельмгольц (1821–1894) начал изучение сохранения энергии с попытки доказать, что тепло тела и мышечное движение, производимое животными, непосредственно связаны с энергией, сохраненной в еде. Гельмгольц твердо полагал, что энергия преобразуется из одной формы в другую, никогда не будучи создана или разрушена. Действительно, Гельмгольц придумал фразу «принцип сохранения энергии» и продолжил строить полную математическую формулировку, исходя из сохранения энергии в приложении к механике, теплу, электричеству, магнетизму, химии и астрономии, чего Майер так и не смог постичь, а Джоуль никогда и не пробовал.

Слепой приверженец формул, он применял их ко множеству физических явлений. В частности, он утверждал, что потеря части кинетической энергии в неупругих столкновениях происходит из-за теплообразования, а оставшаяся часть – из-за деформации сталкивающихся объектов. Для Гельмгольца деформация была результатом увеличения «силы натяжения». Этот формализм очень похож на утверждение Иоганна Бернулли о том, что кинетическая энергия, или *vis viva*, потерянная в неупругих столкновениях, сохранилась, сжав «крошечные пружины», из которых, как он предполагал, состоял объект.

Фундаментально и Гельмгольц, и Бернулли были правы, и сегодня мы понимаем деформацию как изменение потенциальной энергии, сохраненной в объекте. Однако Гельмгольц (правильно) понимал теплообразование во время неупругого столкновения, и это отличало его работы от работ Бернулли и пролило свет на природу тепла вне его механического эквивалента работы.

Черпая идеи из ранних работ Джоуля, Гельмгольц продолжал применять принцип сохранения к тепловым и электрическим явлениям. Он отвергал теплородную теорию и считал, что тепло – результат движения частиц материи. Для Гельмгольца тепло и механические явления были явно связаны, как и все другие формы энергии, его математической парадигмой – первым началом, которое

он твердо вывел приблизительно в 1850 году, обеспечив физическую теорию новой объединяющей основой.

Энергия-хамелеон

Наше начальное понимание энергии пришло из экспериментальных наблюдений, проводимых Галилео в XVI и XVII веках. Однако к концу XVII века математика была мощным научным инструментом, что доказывают «Начала» Ньютона, изданные в 1687 году. Тем не менее понимание энергии в целом пришло только в XIX веке.

Тепло было, возможно, самым большим препятствием на пути понимания энергии, оставаясь не связанным с ней приблизительно до 1850 года, когда было сформулировано первое начало (закон сохранения энергии, или первый закон термодинамики). До тех пор тепло считали своего рода жидкостью, которая могла проходить внутрь и наружу по крошечным пространствам, которые предположительно существовали в веществе. Это вещество называли теплородом и в течение долгого времени тепло воспринимали отдельно от остальных форм энергии. Однако, в то время как развивалось наше понимание вещества, также развивалось и наше понимание тепла, и наконец стало понятно, что тепло – не что иное, как другая форма энергии. Действительно, мы были вынуждены пересмотреть нашу точку зрения о самой природе вещества, осознав, что тепло было не чем иным, как движением ее малых частиц.

Сегодня мы разделяем много форм энергии: кинетическая, потенциальная, химическая, электрическая, энергия света, ядерная и тепловая. Энергия действительно своего рода хамелеон, способный переходить из одной формы в другую, но при этом никогда не исчезая; всегда сохраняясь ^[36]. Есть определенный парадокс в том, что мы часто говорим об «энергосбережении», когда по факту природа всегда сохраняет энергию. Конечно, мы имеем ввиду «не трать энергию». Мы признаем, что энергия в наших руках весьма ограничена и ее можно израсходовать. Кроме того, это означает, что мы признаем: не все источники энергии жизнеспособны или «полезны». Таким образом, не вся энергия может служить для нас источником работы.

Это очевидное неравенство иллюстрирует нечто фундаментальное в вопросе энергии: в то время как вся энергия сохраняется, не все формы

энергии мы можем применять. Кроме того, когда мы действительно используем энергию для чего-то полезного, природа требует, чтобы определенное ее количество было потрачено впустую. То есть энергия, затрачиваемая для нашей желаемой задачи, никогда не будет использована целиком. Природа ожидает определенную «компенсацию». В действительности эти основополагающие принципы энергии связывают ее с другим очень важным фактором – *энтропией*.

Часть 2

Естественная компенсация: энтропия

Глава 5

Размышления о тепловых двигателях

Термодинамическое происхождение энтропии

(Второй) закон, гласящий, что энтропия всегда увеличивается, я полагаю, занимает главное место среди законов Природы. ... Если ваша теория противоречит второму закону термодинамики, мне нечем вас утешить; ничто не удержит вашу теорию от того, чтобы провалиться с глубоким унижением.

**Сэр Артур Стэнли Эддингтон,
британский астрофизик (1882–
1944)**

К 1820 году промышленная революция вошла в полную силу, движимая буквально и фигурально паровым двигателем. Паровой двигатель является типом *теплового двигателя*, который использует пар в качестве *рабочего тела*; пар является источником тепла, обеспечивающего производство полезной работы. Другая версия теплового двигателя – двигатель в вашей машине. Здесь рабочее тело – смесь газа и воздуха; сгорание этой смеси приводит к выделению тепла и увеличению давления, двигающему поршни в цилиндрах двигателя, за счет чего движется и ваш автомобиль.

Тепловой двигатель требует по крайней мере двух различных температур, чтобы преобразовывать тепло в работу. В самом простом варианте тепловой двигатель (см. рис. 5.1) берет некоторое количество тепла (q_H) из горячего резервуара (*нагревателя* с высокой температурой T_H), использует часть, чтобы выполнить работу (W), и сбрасывает другую часть (q_X) в холодный резервуар (*холодильник* с более низкой температурой T_X), который обычно располагается

снаружи.

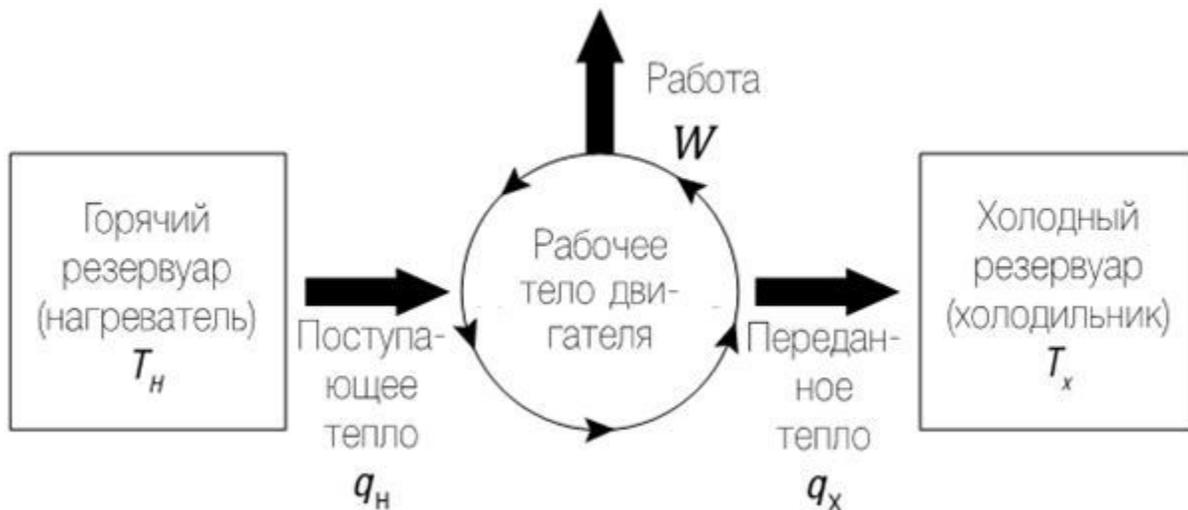


Рис. 5.1. Тепло (q_H) выходит из горячего резервуара (нагреватель с высокой температурой T_H). Часть этого тепла преобразуется в работу (W) рабочим телом двигателя, в то время как другая часть тепла (q_X) поступает в холодный резервуар (холодильник с низкой температурой T_X).

Рассмотрим очень простой тепловой двигатель из воздушного шара и фена. Разместим маленький вес сверху на воздушном шаре и нагреем их при помощи фена (нагреватель), благодаря чему воздух в воздушном шаре (рабочая жидкость) расширится и начнет поднимать шар вверх за счет поглощения части тепла, в то время как остальная его часть рассеется в окружающей среде (холодильник). Таким образом, наш простой тепловой двигатель выполнил определенную работу при помощи части тепла от фена, а другая часть ушла в окружающую среду. Более того, если мы уберем вес и проведем тот же эксперимент, воздушный шар все еще будет работать, расширяясь вопреки внешнему давлению. Таким образом, на этот раз система работает, «поднимая» воздух за пределами воздушного шара, тогда как прежде поднимался вес, который был на верхушке шара.

При этом процессе теряется существенное количество тепла – тратится впустую при переходе тепла от источника к приемнику. К 1820-м годам, после десятилетних попыток сократить эти потери, удалось добиться *эффективности*, при которой 6 % тепла от нагревателя действительно использовались для работы, тогда как

оставшиеся 94 % терялись в окружающей среде – не самые утешительные показатели^[37].

С экономической точки зрения рос интерес к повышению эффективности парового двигателя, или, другими словами, максимизации количества работы, производимой с помощью тепла из нагревателя, и минимизации (или исключению) потери тепла в окружающей среде. Именно этого намеревался достичь Сади Карно, и, добившись, он стал основателем теории термодинамики.

Тепловой двигатель

Сади Карно был сыном Лазара Карно, одного из самых влиятельных мужчин во Франции в конце XVIII века и начале XIX века. Успешный политик и государственный чиновник, Лазар блестяще разобрался в военной логистике и стратегии, благодаря чему во время революции спас множество кампаний от военных катастроф, заработав прозвища «организатор Победы» и «великий Карно». Он также был опытным ученым и инженером.

В 1783 году Лазар издал мемуары, в которых он приблизился к прикладной механике с чисто теоретической точки зрения. В этом и более поздних трудах он стремился описать работу сложных механических машин, фокусируясь на общих, характерных для них принципах, не слишком углубляясь в детали, характерные для отдельных проектов.

Другими словами, Лазар верил, что в основе лежат фундаментальные принципы, характерные для всех механических машин независимо от их устройства, и эти принципы позволят создать общую теорию, применимую ко всем ним. Он искал, так сказать, «большую картину». В то время его подход был уникален, поскольку другие исследователи, наоборот, предпочитали делать выводы, изучая определенные механические конструкции. Сади Карно применил изобретательный подход отца при составлении собственной теории тепловых двигателей.

В 1823 году, когда Сади Карно начал эту работу, прошло меньше тридцати лет с тех пор, как эксперименты Румфорда по сверлению орудий помогли понять, что «тепло – это движение». И хотя это должно было положить конец теплородной теории, ее догмы о сохранении тепла (о теплороде) были непоколебимы. Более полное понимание энергии ожидало своего часа в течение приблизительно тридцати лет до появления первого начала. Таким образом, не удивительно, что Карно принял (ошибочную) теплородную теорию и что в своем описании работы теплового двигателя он настаивал на сохранении тепла. Вдобавок он подписался под другой аксиомой: невозможностью *вечного двигателя*, которую долгое время применяли

к механическим системам. Карно расширил это понятие, включил в него тепловые двигатели.

Вечный двигатель первого рода

В рамках наших целей уточним: невозможность существования *вечного двигателя первого рода* означает, что вы не можете создать машину, которая позволит вам получить больше энергии, чем вы поместите в нее. Рассмотрим такой пример: вы заполняете бензобак в своем автомобиле и затем едете, пока у вас не заканчивается топливо. Однако, вместо того чтобы остановиться, автомобиль продолжает двигаться, потому что (так или иначе) вы смогли получить из двигателя больше энергии, чем изначально давал полный бак. Поэтому, получив необходимый стартовый «толчок» от автомобиля с полным баком, вы можете продолжать движение на «оставшейся» энергии и вам не потребуется останавливаться у следующей автозаправочной станции.

Очевидно, этот тип вечного движения нарушил бы первое начало, так как в итоге мы получили бы больше энергии, чем было изначально заложено. И хотя вечный двигатель, который я описал, может казаться вам абсурдным, будьте уверены, что сегодня люди продолжают искать способ создать подобные устройства. Фактически официальная политика Бюро по регистрации патентов и торговых марок США (USPTO) в отношении вечных двигателей – не предоставлять патент на такое устройство без имеющейся рабочей модели:

«Бюро не требует предоставления рабочей модели, за исключением случаев, касающихся вечного двигателя. Если работа устройства вызывает сомнения, претендент должен доказать это, удовлетворяя требование эксперта бюро, однако претендент может выбрать сам, в какой именно форме предъявлять доказательства».

Безусловно, Патентное бюро США заполнит заявку на патент, поскольку это работа патентного секретаря, но фактического выпуска патента, которым занимается патентный эксперт^[38], скорее всего не будет. Тем не менее в 1979 году Патентное бюро действительно выдало патент (патент США 4 151 431) за устройство, казавшееся вечным двигателем, которое наглядно демонстрировало, что создание

изобретения и выдача на него патента не означают, что оно будет на самом деле работать.

Когда вы поймете первое начало, вы можете задаться вопросом, как такое устройство вообще может быть даже темой споров, ведь, как описано, оно явно нарушает первое начало (отсюда название – «вечный двигатель первого рода»). Однако первое начало не является чем-то, у чего есть строгое математическое доказательство; это не что-то, что можно сесть и вывести при помощи математики и известной физики. Это просто утверждение – очень сильное, – которому мы верим, основываясь на всех экспериментальных данных, собранных до настоящего времени. Мы просто не нашли ни одного факта нарушения первого начала до сегодняшнего дня и поэтому считаем его истиной.

Обратимый тепловой двигатель Карно

Карно разработал математическую модель теплового двигателя, состоявшего из рабочего тела; нагревателя, в котором тепло вступало в реакцию с рабочим телом; и холодного резервуара, где часть этого тепла поглощалась рабочим телом. Вот так-то. Некоторые детали теплового двигателя были сознательно исключены – характер выполняемой работы, механическая конструкция (то есть подвижные части) и тип рабочего тела.

На практике после поглощения тепла из источника рабочее тело теплового двигателя^[39] способно выполнить работу, расширяя ограниченное пространство, которое, в свою очередь, приводит в движение подвижные части. Например, в вашем автомобиле поршни находятся в ограниченном пространстве цилиндров, а тепло вырабатывается при сгорании горючего (рабочего тела) в этих цилиндрах. Это приводит к увеличению давления на поршни, что позволяет вашему автомобилю ехать по дороге.

Карно игнорировал все эти небольшие детали, пытаясь вывести общую теорию тепловых двигателей с одним требованием – чтобы его тепловой двигатель был *обратимым*. Сделав это, он также создал абсолютно новую математическую модель термодинамики, которая используется до сих пор.

Теперь поговорим о том, что же такое обратимый процесс (или *обратимая система*). Если процесс обратимый, то система,

задействованная в этом процессе, может быть возвращена или переведена в состояние, предшествующее началу процесса. Вот, собственно, и все.

Так в чем же, собственно, проблема? В действительности никакие процессы в природе^[40], – а это именно то, что нам интересно, – не являются обратимыми. Напротив, все они *необратимы*. Хорошо нам известный пример необратимого процесса – разбитое после падения яйцо. Естественно, оно никогда не сможет вернуться в прежнее состояние^[41]. Более того, если разобраться, в основе процессов, протекающих в природе, лежат математические модели. К сожалению, обратимые процессы легче рассмотреть с точки зрения математики (что часто приводит к поразительным результатам), в отличие от необратимых. Таким образом, если возможно, лучше рассматривать наши необратимые процессы при помощи соответствующих обратимых.

Рассмотрим такой пример: два кирпича абсолютно одинакового веса приклеены к горизонтальным качелям на равном удалении друг от друга и от центральной оси вращения (какая странная детская площадка!). Фактически вес одного кирпича уравнивает вес другого вне зависимости от расположения качелей; направления этих сил уравнивают друг друга. Если один из кирпичей стремится к земле, то второй от нее удаляется.

Теперь представим, что мы двигаем один из кирпичей сверху вниз таким образом, что это движение можно в любой момент обратить. Что ж, это кажется довольно простым. Обратимость в этом случае означает всего лишь то, что мы можем вернуть качели и кирпичи обратно в предшествующее положение в любой момент. Итак, мы начинаем перемещать качели вниз и вскоре слышим громкий скрип. Ось вращения заржавела, и на нее воздействует большая сила трения. Похоже, это может стать проблемой.

Наша цель – перемещать качели таким образом, чтобы процесс был обратимым, при этом скрипящий звук будет напоминать нам о трении, а также о том, что в процессе трения вырабатывается тепло. Конечно, количество тепла получится не столь существенным; едва ли вы сможете почувствовать его при касании. Тем не менее это означает, что у нас не получилось двигать качели обратимо. Понятно, что если мы вернем качели в прежнее положение – не изменится ничего, кроме

тепла: мы не сможем вытащить его из воздуха и вставить обратно в точку опоры. Так как же нам сделать этот процесс обратимым?

Начнем с начала, но на этот раз приложим меньше усилий и будем качать качели с меньшей амплитудой. Поскольку у кирпичей одинаковый вес, потребуется совсем малое усилие, чтобы преодолеть силу трения в точке опоры и вывести систему из равновесия. Мы опустим верхний кирпич на незначительное расстояние и сразу же остановимся. Этот кирпич немного сместится вниз, а нижний станет немного выше. На этот раз не слышно скрипящего звука, и поэтому не выделяется тепло (будем считать, что это так); мы совершили обратимое действие. Если мы прекратим прилагать дальнейшее усилие к кирпичу, он остановится, находясь в идеальном балансе в новом положении; другими словами, они достигли положения *равновесия*.

Теперь, не останавливаясь, мы снова прилагаем небольшое усилие, чтобы переместить кирпич вверх с помощью серии маленьких шажков до тех пор, пока другой не коснется земли. Хотя мы не будем останавливаться посреди пути, как раньше, мы убеждены, что качели двигаются, проходя через серию положений равновесия, которые были обратимыми, и без выделения тепла. Наша уверенность основана на том, что мы применяли малую силу для поступательного медленного перемещения качели. Как вы можете представить, перемещение качели в крайнее положение заняло много времени ввиду такого подхода – гораздо больше, чем если бы мы просто двинули качели вниз быстро и необратимо. К сожалению, чтобы сделать процесс обратимым, нам потребовались все эти уловки: приложение малой силы, поступательное изменение амплитуды и много времени. Фактически этого достаточно для обратимого движения любой системы. Почему?

Ну, проще говоря, потому что именно это и требуется, чтобы не нарушить систему настолько, чтобы ее нельзя было вернуть к исходному состоянию. Удивительно ли, что системы в природе или повседневной жизни необратимы? Обратимость хорошо работает как математическая модель, которая применима к нашей повседневной жизни, даже если Вселенная работает не совсем так.

Для теплового двигателя обратимость означает не только *механическую обратимость* (как у качелей), но и *тепловую*. В нашем примере с качелями мы были уверены, что перемещали кирпичи вверх и вниз на определенные расстояния. В тепловом двигателе протекают

похожие механические процессы, но также присутствует разница температур (*температурный градиент*). Тепловая обратимость достигается с помощью передачи тепла из горячего резервуара в холодный «маленькими шажками».

Это обеспечивают теми же средствами, что и в примере выше, только в этот раз мы приложим наименьшую *термическую силу* для передачи тепла. В частности, мы хотим, чтобы тепло переместилось из нагревателя в холодильник через участки, где снижение температуры минимально. На практике это означает, что горячая и холодная части теплового двигателя (механическая часть и рабочее тело), которые находятся в контакте, должны мало отличаться по температуре.

Конечно же, обратимость – это идеализация. Ее легко представить в теории, но невозможно достигнуть на практике. Нельзя изменять систему столь малыми шагами, поскольку выполнение даже простой задачи займет слишком много времени – практически вечность.

Более того, идет ли речь о механическом трении (как в примере с качелями) или о тепловом трении – следствии взаимодействия разных температур (как в двигателе вашего автомобиля), – в любом случае произойдет потеря определенного количества тепла. Как бы то ни было, обратимость дает нам эффективную математическую модель, устанавливая недостижимую верхнюю границу (своего рода «золотой стандарт») для всех реальных систем. Это позволило Карно глубже понять природу тепловых двигателей и указало на новую физическую величину.

От горячего к холодному

Карно понял, что тепло переходит от горячего к холодному, а тепловой двигатель позволяет использовать это, чтобы производить работу. Он считал, что разница температур схожа с разницей высот, которая требуется для работы водяного двигателя. Примером водяного двигателя может быть колесо, расположенное внизу водопада. Вода, текущая сверху^[42], вращает водяное колесо, и это движение используют для работы. Водяное колесо особенно эффективно^[43], когда каждая капля воды, падающая сверху, ударяет колесо и вращает его; вода, которая падает мимо водяного колеса, не участвует в движении и потому снижает производительность.

Аналогично Карно предположил, что подобные явления справедливы и для тепловых двигателей. Более того, он считал, что невозможно извлечь работу из тепла при отсутствии разницы температур: должен быть нагреватель (источник) и холодильник (телоприемник), чтобы двигатель работал – так же как должна быть разница высот для того, чтобы вода текла и двигала водяное колесо.

Он также был убежден, что при этом тепло обязано сбрасываться. Карно считал, что как в водяном колесе вода падает из высокой точки в низкую, так и тепло в тепловом двигателе «падает» из области высокой температуры в область низкой, в конце концов полностью «перетекая» в холодный резервуар.

При работе водяного двигателя вода перетекает сверху вниз, полностью сохраняя свой объем (кроме той части, которая испаряется). Карно как сторонник теплородной теории придерживался этой аналогии с водяным двигателем и был уверен, что так же сохраняется и тепло в тепловом двигателе и в процессе его работы все тепло из горячего резервуара перейдет в холодный.

Примерно через 30 лет после открытия первого начала термодинамики стало ясно, что сохраняется вовсе не тепло, а скорее энергия в целом. Так что количество тепла, изначально покинувшего горячий резервуар, равняется сумме количества тепла, поступившего в холодный резервуар, и работы, проделанной тепловым двигателем.

Математическая модель обратимого теплового двигателя Карно позволила ему прийти к важнейшим выводам. Чтобы понять важность

его модели, проведем мысленный эксперимент. Представим, что у нас есть два обратимых тепловых двигателя Карно (см. рис. 5.2). Назовем их «двигатель 1» и «двигатель 2» и подключим к одним и тем же горячему и холодному резервуарам. Теперь представим, что каждый из них выполняет разное количество работы. Для ясности назовем эти количества W_1 и W_2 , при этом W_1 больше, чем W_2 . Другими словами, производительность двигателя 1 выше, чем производительность двигателя 2.

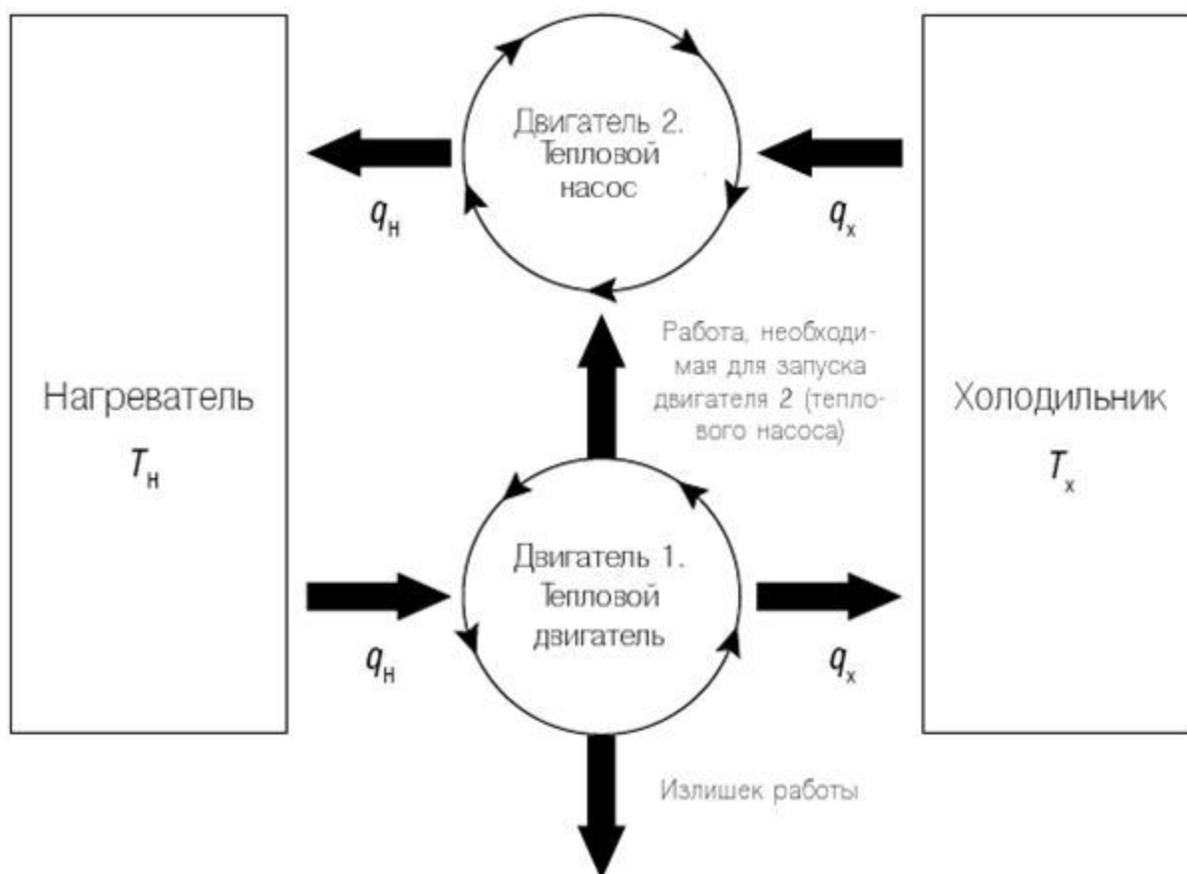


Рис. 5.2. Представим, что двигатель 1 получает начальное количество теплоты (q_n) от нагревателя. Некоторое количество этой энергии (q_x) поступает в холодильник, в то время как оставшаяся энергия используется для работы (двигатель обратимый, поэтому нет потери тепла в результате механического или термического трения). Некоторая часть этой работы используется для запуска двигателя 2, так как тепловой насос забирает обратно из холодного резервуара такое же количество теплоты (q_x , которое перешло из двигателя 1), добавляя

часть собственного тепла, и теперь способен передать полное изначальное количество теплоты (q_H , переданное двигателем 1) обратно в горячий резервуар. Далее представим, что двигатель 1 может сделать все это, и у него останется излишек работы.

Ключевая особенность здесь – обратимость тепловых двигателей, которая заключается в отсутствии необходимости преодоления механического или термического трения. Поэтому требуется крохотный объем работы – в дополнение к производимой, – чтобы превратить двигатель в *тепловой насос*, который берет энергию из холодного резервуара и направляет ее в горячий. Это происходит аналогично нашему примеру с обратимыми качелями, где мы в любой момент движения могли изменить его направление путем приложения малой силы. Мы знакомы с тепловым насосом – холодильник, который поддерживает низкую температуру, выводя внутреннее тепло в окружающую среду^[44]. В самом деле, тепловой насос похож на *водный насос*, по сути являющийся водяным двигателем, который может быть обратимым, что позволяет перемещать воду с меньшей высоты на большую.

Поскольку у двигателя 1 больше объем производимой работы (W_1), мы используем его для работы двигателя 2 в обратном режиме, превращая его в тепловой насос. Теперь мы можем создать следующий цикл: двигатель 1 забирает начальный объем тепла (q_H) из нагревателя, передает его часть q_X в холодильник и выполняет работу. Эта работа заставляет двигатель 2 забрать такой же объем тепла (q_X , который передал двигатель 1) обратно из холодильника и добавить часть собственного тепла, таким образом передав полный объем тепла (q_H) обратно в нагреватель. Более того, мы можем представить, что двигатель 1 может проделать все это, и у него останется излишек работы. Наконец, весь этот процесс обратим благодаря тому, что не происходит потерь тепла из-за механического или термического трения.

Если что-то здесь кажется вам неправильным, вы не одиноки; Карно считал так же. Короче говоря, конечный результат этого цикла заключается в том, что двигатель 1 способен производить работу, не

затрачивая на это энергию. Это происходит за счет того, что двигатель 2 (тепловой насос) возвращает энергию, которую он забрал из нагревателя (q_H). И даже после того, как он проделывает все это, у него остается излишек работы. Более того, поскольку нагреватель никогда не иссякает, цикл является бесконечным! Немного отличаясь в деталях, это похоже на вечный двигатель первого рода (о котором мы писали ранее), где мы представляли, что машина может двигаться бесконечно на одном баке топлива^[45].

Придерживаясь принципов своей основной теории, Карно пришел к выводу, что производительность (эффективность) любых двух тепловых двигателей, работающих на одинаковых температурах, должна быть одинаковой, что делает невозможным существование нашего вечного двигателя. Точнее об этом говорит *теорема Карно*. Согласно ей, производительность (а значит, и эффективность) любого обратимого (идеального) теплового двигателя зависит только от температур нагревателя и холодильника. Хотя я не стал бы выводить эту формулу здесь^[46], математически мы можем записать это утверждение так:

$$\text{Производительность} = 1 - T_x / T_H,$$

где T_x и T_H – температуры холодильника и нагревателя соответственно, а 1 означает 100 %-ную производительность. По этой причине количество тепла, которое может произвести тепловой двигатель, и объем работы, который он может выполнить, определяются исключительно разницей температур. Настоящий тепловой двигатель не мог бы быть таким же эффективным по объему произведенных работ и тепла из-за своего устройства, о чем мы чуть позже поговорим. Другими словами, обратимый тепловой двигатель демонстрирует максимальный объем работы и производительности, достижимый за счет разницы температур^[47].

В самом деле, система, работающая обратимо, – идеальна. Работа, производимая обратимым тепловым двигателем, и ее эффективность являются эталоном, которого не может достичь ни один тепловой

двигатель. Тем не менее, исходя из нашего уравнения, даже идеальный обратимый тепловой двигатель не может достичь 100 %-ной эффективности^[48]. Это обусловлено тем, что разница температур (между T_x и T_H) все еще требует необходимого потока тепла^[49]. Это позволяет по-новому рассмотреть утверждение о том, что необходима передача тепла в холодный резервуар, и, следовательно, не все переданное тепло используется в работе (как мы говорили ранее).

Другими словами, если вы хотите, чтобы тепловой двигатель выполнил некую работу, то природа все равно потребует компенсации за нее. Точно так же как и в случае с простыми механизмами типа наклонной плоскости (как мы узнали в части 1). Будь это наклонная плоскость или тепловой двигатель, природа ничего не дает бесплатно.

Представьте себе, что мы пришли к этому выводу, не учитывая особенности рабочего тела или определенной конструкции теплового двигателя (кроме того факта, что он обратим). Следовательно, в разговоре об обратимом тепловом двигателе не важны конкретные детали конструкции. Рабочим телом, механическими деталями или даже материалами, которые вы используете, чтобы построить ваш тепловой двигатель, – всем этим можно пренебречь; важно только, что он работает обратимо.

Теорема Карно рассказывает нам о реальных тепловых двигателях (подобных двигателю в вашей машине), которые не являются обратимыми. Как было упомянуто выше, никакой реальный тепловой двигатель никогда не будет более эффективным, чем обратимый аналог. Тем не менее мы все еще пытаемся сделать наши автомобили «более обратимыми». Это означает, что мы пробуем минимизировать источники механического трения между подвижными частями и избегать теплового трения, возникающего из-за больших разностей температур между подвижными частями и рабочим телом теплового двигателя.

На практике в эффективности реального теплового двигателя играют важную роль механическая конструкция, используемые материалы и рабочее тело. Для рабочего тела важным является такое физическое свойство, как время, которое требуется теплу, чтобы течь через рабочую жидкость (теплопроводность), температура плавления, температура кипения, поверхностное натяжение, давление пара – все это окажет влияние на эффективность работы реального теплового

двигателя. Теорема Карно объясняет нам, что эффективности достигают за счет большей разности температур между горячими и холодными резервуарами. Так как температура холодильника – это температура окружающей среды, которой невозможно управлять (например, вы не можете управлять уличной температурой, при которой работает ваша машина)^[50], этой разницы достигают, повышая температуру нагревателя. Модель теплового двигателя Карно объясняет инженерам конструкцию реального теплового двигателя.

В 1824 году, спустя год после смерти отца, Карно написал «Размышления о движущей силе огня...», где он в стиле своего отца подчеркнул, что его общая теория применима ко всем типам тепловых двигателей независимо от особенностей их конструкции. Ведущее научное издательство опубликовало работу, но она получила только один – хотя и восторженный – отзыв и десятилетие спустя была процитирована в другом известном журнале. Следующие двадцать лет книга провела во мраке безвестности^[51].

В июне 1832 года Карно заболевает скарлатиной. Когда он на мгновение почувствовал себя лучше, то написал своему другу:

«Я был болен в течение долгого времени, и болезнь протекала тяжело. У меня было воспаление легких, сопровождаемое скарлатиной. (Возможно, ты знаешь, какая это ужасная болезнь.) Я должен был оставаться в постели двенадцать дней, без сна или еды, не имея возможности заняться хоть чем-то...»

Скарлатина в конечном счете распространилась на его мозг, после чего в августе он заразился холерой и умер через несколько часов. Ему было только тридцать шесть лет. Как это всегда было с жертвами холеры, его одежда, его личные вещи и почти все его бумаги были сожжены. Из уцелевших бумаг можно увидеть, что Карно начинал понимать ошибочность тепловой теории, поскольку осознал ее неотъемлемые вызовы в свете работ Румфорда (мы частично обсуждали их в части 1).

В 1834 году Эмиль Клапейрон (1799–1864), бывший одноклассник Карно, опубликовал его работу в «Журнале Политехнической школы» (*Journal de l'École*). Публикация, в которой работу Карно изложили с четкими и понятными математическими формулами и рисунками обратимого теплового двигателя Карно (его модель все еще преподают сегодня в каждой хорошей школе на уроках химии), наконец впервые

за 10 лет привлекла к работе Карно внимание инженеров, химиков и физиков. Версия Клапейрона была самой известной среди ученых того времени, включая Уильяма Томсона^[52], недавнего выпускника Кембриджа, и молодого немецкого студента Университета Халле, Рудольфа Клаузиуса (1822–1888).

Карно учился в Политехнической школе, где был окружен известными физиками, химиками и математиками. Тем не менее он никогда не был выдающимся учеником, и его важную работу никто не отметил. Независимо от этого, вклад Карно в знание о термодинамике неоспорим и делает его одним из величайших исследователей в этой области.

Глава 6

Рассеивание

Взаимоотношения тепла и работы

Открытие первого начала около 1850 года дало ясное объяснение способности энергии переходить из одной формы в другую, не возникая из ниоткуда и не исчезая окончательно. Таким образом, энергия всегда сохраняется. Это утверждение было основано на вере в то, что природа старается объединить кажущиеся разными части одной сущности^[53], и стало результатом грандиозных усилий множества ученых из разных стран. В процессе этих исследований было установлено еще несколько фактов.

Большинство ученых теперь считало тепло движением фундаментальных частиц, из которых состоит все вещество (позже мы их назовем атомами и молекулами). Это был грандиозный шаг вперед – к пониманию не только тепла, но и сущности вещества. Пытаясь разобраться с природой энергии и тепла, мы многое узнали о веществе. Эксперименты Джоуля доказали большинству людей, что определенное количество работы произведет соответствующее количество теплоты. Более того, Джоуль доказал, что то же самое количество теплоты произведет эквивалентное количество работы; тепло может быть использовано для производства работы. Близилась к концу те дни, когда тепло считалось невесомой «текучей жидкостью», которая, согласно теплородной теории, всегда сохраняется.

Проблема тепла и работы

Талант Уильяма Томсона проявился во многих сферах: в физике, инженерном деле, преподавании и даже в политике. У него был особый дар – находить правильные решения, особенно в математике. К моменту окончания своего обучения в Кембридже он уже опубликовал 12 работ по чистой и прикладной математике. В течение всей своей жизни он усердно трудился и издавал различные научные работы. В период с 1841 по 1908 год он ежегодно публиковал по крайней мере

два труда, а иногда до двадцати пяти. В целом он написал 661 работу и получил патенты на 69 изобретений.

Всего в 16 лет Томсон прочитал «Аналитическую теорию тепла» Жозефа Фурье (1768–1830), опубликованную в 1822 году. Когда мы изучали тепловой двигатель Карно, мы говорили, что тепло переходит из нагревателя в холодильник. В теории Фурье тепло проходит через объект (постепенно) благодаря разнице (градиенту) температур в этом объекте; в каком-то смысле у объекта есть участки с нагревателем и холодильником.

Но теория Фурье полностью игнорирует физическую природу тепла, фокусируясь в первую очередь на особенностях его «поведения». Будь это теплород или движение частиц вещества, причины возникновения тепла Фурье в своей теории не рассматривал^[54].

Итоговое уравнение, выведенное Фурье (точнее – *дифференциальное уравнение*), точно выражало его мысль: оно правильно описывало наблюдаемое «поведение» тепла, которым управляли фундаментальные законы природы, но без деталей в отношении того, что вызывало такое поведение. Красота этого подхода^[55] в том, что он позволяет двигаться вперед, хотя еще не все детали пазла встали на свои места, так сказать. Фурье так описывал свою задачу:

«Основополагающие причины нам неизвестны; но они являются предметом простых и постоянных законов, которые могут быть открыты путем наблюдения, а их изучение – объект натуралистической философии.

Тепло, как и гравитация, проникает во все уголки Вселенной, и его лучи пронизывают все в пространстве. Цель нашей работы – выявить математические законы, которым подчиняются эти элементы. Теория тепла сформирует один из самых важных разделов общей физики».

Конечно, тепловые теории Фурье и Карно ощутимо отличаются. Карно учил нас думать о тепле (о теплороде, как он его называл) как о водопаде, движущемся от высокой температуры к низкой, что позволяет производить работу. Фурье просто говорил, что, независимо от того, чем является тепло, его природа такова, что оно распространяется по объекту в результате мельчайших температурных отличий. И ничего не сообщал о возможности тепла производить

работу, о чем говорил Карно; даже фактически утверждал, что в этом процессе какая-либо работа не требуется.

Все это тревожило Томсона. С одной стороны, была теплородная теория Карно с ее обратимым тепловым двигателем, который совершал работу за счет разницы температур. С другой стороны, теория Фурье утверждала, что тепло может переходить из горячего в холодный резервуар, не совершая вообще никакой работы. Безусловно, каждую из этих теорий подтверждали экспериментальные наблюдения, и обе, казалось, были верны. Однако для Томсона их отличие было явным, и он понимал, что нечто, должно быть, упускает, сравнивая теории Карно и Фурье. Тем не менее Томсон не мог найти какие-либо несоответствия между этими двумя теориями. И, как будто этой путаницы Томсону было недостаточно, сложности вскоре усугубились.

В 1847 году на встрече Британской ассоциации для продвижения науки Томсон знакомится с Джоулем. Джоуль выступал с докладом о своих исследованиях механического эквивалента тепла, объясняя, что данный объем работы произведет данное количество тепла (мы частично обсуждали это в части 1). Кроме того, Джоуль был убежден, что это преобразование может происходить в обратном порядке: данное количество тепла может произвести данный объем работы, как в тепловом двигателе. Теперь перед Томсоном возникли уже три теории: обратимый тепловой двигатель Карно, теплопроводность Фурье, «не выполняющая работу», и преобразование тепла в работу Джоуля («тепловой эквивалент работы»).

Томсона взволновало заявление Джоуля, что тепловой двигатель преобразует тепло в работу. Вспомните заявление Карно, что можно произвести работу при помощи теплового двигателя в результате «падения» температуры. В представлении Карно, тепло не используется для выполнения работы; при помощи определенного количества тепла производится работа, после чего то же самое количество тепла возвращается в окружающую среду; нет никакого преобразования тепла в работу. Карно был убежден, что работа производится именно так, и, будучи сторонником теплородной теории, считал, что это тепло было ранее «законсервировано». Хотя Томсон уже был готов отказаться от части теплородной теории – той части, которая описывала тепло как множество частиц, перемещающихся как

неуловимая жидкость, – он не был готов отказаться от теплородной теории в целом. Карно вывел идею теплового сохранения, основываясь на теплородной теории, и Томсон также не видел оснований, чтобы немедленно и полностью отказаться от нее.

Томсон чувствовал, что идеи Джоуля также противоречили теории теплопроводности Фурье. Эксперименты Джоуля продемонстрировали, что работу можно преобразовать в тепло. Далее Джоуль заявил, что, согласно его исследованиям, тепло можно преобразовать в работу. Однако теория Фурье правильно описывала теплопроводность, поскольку тепло свободно проходит через те или иные объекты. Томсон задался вопросом о «полезной мощности», которую Джоуль наблюдал в своих экспериментах. По мнению Томсона, этот эффект как будто бы был потерян.

В 1849 году Томсон опубликовал одну из первых работ о теории тепла и показал, что никакая полезная мощность не наблюдается, когда тепло свободно проходит (проводится) через твердый объект:

«Когда “тепловая сила” тратится, проходя через твердое тело и создавая тепло, что происходит с механическим эффектом, который это тепло могло произвести? В природе ничто не исчезает бесследно – никакая энергия^[56] не может быть уничтожена. Какое воздействие происходит вместо механического эффекта? Тепловая теория требует ответа на этот вопрос; но современная наука не может дать на него ответ».

В то время как Томсон ясно определял фундаментальные проблемы понимания тепла и работы, он пока не мог дать на них ответов. Даже обращение к экспериментам не приносило, казалось бы, никаких результатов. Однако ответы были практически у него под носом.

Работа, полученная из тепла: Джоуль против Карно

В 1847 году Томсон пытался соотнести тепловой двигатель Карно, который работал при условии сохранения тепла (количество теплоты, покинувшее горячий резервуар, всегда равняется количеству теплоты, перешедшему в холодный резервуар) и выполнение работы с механическим эквивалентом тепла Джоуля, которое требовало поглощения тепла для производства работы тепловым двигателем. Тем не менее Джоуль и Карно были единогласны в том, что тепловой двигатель мог преобразовывать тепло в работу. Однако их точки зрения на то, что в это время происходило с теплом, отличались. Будучи сторонником теплородной теории, Карно считал, что тепло сохраняется, в то время как Джоуль думал строго наоборот, а именно – что тепло превращается в работу и таким образом исчезает, а не сохраняется в процессе работы. Подобно Карно, Томсон тогда был не готов отказаться от мысли о том, что тепло сохраняется.

В 1824 году Карно открыл обратимый (идеальный) тепловой двигатель и, основываясь на этом, получил много новых сведений. Безусловно, Карно был первооткрывателем, который использовал оригинальную математическую модель. Ее результатом стали удивительные открытия, хотя они и основывались на ошибочной теплородной теории. Однако в 1850 году изменилось общее направление термодинамики, и дни теплородной теории были сочтены, поскольку было открыто первое начало, гласившее, что энергия – нечто большее, чем просто тепло, и она сохраняется, – что нашло отражение в работах Майера, Джоуля и Гельмгольца. Отчасти именно это позволило Рудольфу Клаузиусу разрешить противоречия между тепловыми теориями Карно и Джоуля.

Клаузиус родился в 1822 году в Кёслине, Пруссия (ныне Кошалин, Польша), и был младшим из 18 детей. Он получил начальное образование в маленькой частной школе, директором которой был его отец. Изначально он интересовался историей, но позже получил степень кандидата наук по математической физике в Университете Галле в 1847 году. Он интересовался электричеством и магнетизмом и даже разрабатывал, ссылаясь на Уильямсона, теорию о заряженных атомах в растворах (электролитах), которую часто называют теорией

Уильямсона – Клаузиуса (что кажется несправедливым, учитывая, что Уильямсон никогда не рассматривал подобные типы растворов). Он также сделал вклад в *кинетическую теорию*, введя понятие *средней длины свободного пробега* – среднего расстояния, которое проходит частица (молекула или атом) при свободном движении в жидкости, прежде чем «столкнуться» с другой частицей. Однако его самые значимые работы касаются именно термодинамики, а именно теоретических аспектов механического эквивалента тепла, первого начала и открытия энтропии (несомненно, его ключевой труд)^[57].

В 1850 году Клаузиус опубликовал мемуары, в которых он «примирил» работы Джоуля и Карно. Не имея возможности найти оригинал работы Карно, Клаузиус, как и Томсон, изучал теорию Карно по статье Клапейрона, опубликованной через два года после смерти Карно. И Карно, и Клапейрон ошибочно полагались на теплородную теорию, согласно которой тепло не пропадает, что препятствует его поглощению тепловым двигателем во время производства работы. Они считали, что работа производится при «падении» температуры с высокой к низкой, и количество тепла никогда не меняется.

Клаузиус рассматривал тепло с точки зрения двух фундаментальных процессов: *проводимости* и *преобразования*. В случае с тепловым двигателем Клаузиус полагал, что часть тепла, покидающая нагреватель, преобразовывалась в работу, в то время как оставшаяся (не используемая для работы) свободно переходила из нагревателя в холодильник; это количество теплоты и есть результат работы двигателя.

Клаузиус считал, что эксперименты Джоуля совершенно четко установили соотношение между теплом и работой. Более того, он утверждал, что «основополагающий принцип» теории Карно заключался в том, что тепло переходит от высокой температуры к низкой, за счет чего производится работа. Поэтому вместо того, чтобы выбирать из двух теорий верную, Клаузиус вывел из них одну, более цельную. Вот что он говорил по этому поводу:

«Похоже, что, когда речь идет о работе, обе теории могут быть верны; определенное количество теплоты может быть поглощено, а другая его часть передана от теплого тела холодному; и та, и другая части могут так или иначе влиять на количество производимой работы».

К 1850 году Томсон начал приходить к тем же выводам, что и Клаузиус. Он наконец-то отказался от теплородной теории и ее основного принципа сохранения тепла, таким образом начиная признавать, что тепло может быть преобразовано в работу, как утверждал Джоуль. Это позволило Томсону, как и Клаузиусу, сходным образом объединить теории Карно и Джоуля. К своему облегчению, Томсон обнаружил, что исключение сохранения тепла из теории Карно сохраняет математические уравнения, которые он вывел изначально. В 1851 году, через год после работы Клаузиуса, Томсон опубликовал «Динамическую теорию тепла», где он совмещает теории Карно и Джоуля, признавая, что первым это сделал Клаузиус.

Энергия, работа и тепло

Основным вкладом Томсона в *Динамическую теорию тепла*, возможно, было его исследование энергии системы. Он снял акцент с тепла и работы, на котором фокусировался Карно, а вслед за ним – и Джоуль с Клаузиусом, и вместо этого переместил его на энергию.

Томсон определил энергию как неотъемлемое свойство системы; все системы изначально обладают энергией. Кроме того, он заявил, что энергия системы может измениться только через взаимодействия с ее *окружением*. Поэтому, если система полностью изолирована от своей среды, ее энергия не может измениться, она сохраняется.

Заметьте, что это утверждение не учитывает того, что содержит система; и при этом оно не учитывает того, что происходит внутри нее, поскольку это не имеет значения. Пока система изолирована от окружения, в природе не найдется силы, чтобы как-то изменить ее; энергия всегда будет сохраняться. Это действительно очень сильное заявление. Это освободило Томсона от необходимости размышлять о природе вещества внутри системы^[58].

Из части 1 мы узнали о различных системах, а именно – о тех, которые изучал Галилео (например, шар, катящийся по наклонной плоскости). Тогда мы не говорили о том, что же на самом деле составляет систему и среду. Поэтому давайте проясним это теперь.

Под изолированной системой мы подразумеваем такую систему, в которую ничто не может вмешаться и из которой ничто не может выйти: *внутри* такой системы не могут производиться ни тепло, ни

работа – и *на* такую систему ими нельзя воздействовать. Представьте себе наклонную плоскость с шаром наверху, готовым скатиться вниз при небольшом толчке. Теперь возьмем наклонную плоскость, шар и меня – и поместим все это внутри здания. Как только все будет внутри, дверь закрывается с внешней стороны. Наша система состоит из всего, что есть в здании. Очевидно, никакое вещество не может покинуть здание или проникнуть в него^[59]. Далее предположите, что стены были полностью изолированы таким образом, чтобы никакое тепло не могло попасть внутрь или наружу. Таким образом мы гарантируем, что ни тепло, ни какой-либо объект не смогут войти в нашу систему или покинуть ее.

Что же насчет работы? В части 1 мы выяснили, что работа производится благодаря приложению сил к объекту, чтобы переместить его на определенное расстояние^[60]. Если какая-либо *внешняя сила* получала бы энергию из-за пределов системы, *из окружения*, тогда, возможно, она могла бы воздействовать *на* нашу систему. Например, если бы шар, находящийся на вершине наклонной плоскости, был сделан из магнитного материала вроде железа, сильное магнитное поле, воздействующее на него из-за пределов системы, заставило бы шар прийти в движение и скатиться вниз по наклонной плоскости. В этом случае окружающая среда проделала бы работу с системой.

Кроме того, в сходном сценарии вы можете вообразить силу внутри системы (в здании), которая бы произвела работу, меняя окружающую среду; в этом случае мы скажем, что работа была произведена *системой* над окружением. Однако мы исключили эту возможность и поместили нашу систему (наклонную плоскость, шар и меня) в границы здания, полностью изолировав ее от окружения. Согласно Томсону, энергия системы должна теперь быть сохранена независимо от того, что происходит внутри. Давайте проверим эту идею.

Я толкну шар, заставляя его катиться по наклонной плоскости. Толчок передал шару определенный объем моей собственной энергии. Шар, катящийся вниз, изменяет свою потенциальную энергию на кинетическую. Шар катится по наклонной плоскости и, коснувшись поверхности, останавливается, но только после того, как он передаст всю свою кинетическую энергию этой поверхности. И хотя все это происходит внутри системы, «потери» энергии – например, когда я

толкнул шар; потенциальная энергия, которую потерял шар при движении; кинетическая энергия, которую он потерял при остановке, – равняются ее приросту. Прирост складывается из энергии, которую шар получает при стартовом толчке; кинетической энергии шара в движении; кинетической энергии, полученной поверхностью от катящегося по наклонной плоскости шара, пока он не остановился.

Энергия всего лишь передается от одного объекта другому, в то время как ее общее количество остается прежним. Однако если мы снимем все эти ограничения, картина изменится. Предположим, что тепло может проникать сквозь стены. Далее мы позволим, чтобы работа проводилась на системе или самой системой таким способом, как было описано ранее. Теперь, когда система взаимодействует со своей средой через *нагревание* и *работу*, ее энергия изменится^[61]. Еще раз, слепая приверженность формулам освобождает нас от точных деталей системы, у нас есть очень мощный инструмент, применимый к большому разнообразию систем.

Например, рассмотрим стакан воды с крышкой (благодаря которой молекулы воды не могут испаряться). Стакан и крышка формируют границы системы, и молекулы воды остаются внутри. Если стакан воды пришел в равновесие, теперь он сохраняет комнатную температуру, не теряя и не получая тепло, – помните, чтобы тепло могло переходить из одной области в другую (из горячей в холодную), необходима разница температур. Более того, если оно просто находится там, никакая работа не будет производиться^[62]. Другими словами, наш стакан воды становится изолированной системой, и мы предполагаем, что, как и в других системах, энергия внутри него будет неизменна.

Теперь, однако, у нас нет способа провести подробный анализ процессов, происходящих внутри. В конце концов, мы даже не можем видеть молекулы воды. Безусловно, молекулы воды обмениваются энергией, поскольку они врезаются друг в друга, все время сохраняя энергию, и «потери» и «прибыли» отлично уравнивают друг друга.

Подобно Томсону, Клаузиус также признавал «энергетическую концепцию». Однако, когда в 1850 году он издал свою работу – чуть раньше Томсона, – ее физическое описание было неполным, и он просто не понимал главных идей так же хорошо, как Томсон. Таким

образом, даже при том, что Клаузиус опередил Томсона почти на год, описание энергии системы и ее изменений при взаимодействиях с окружением у Томсона было намного более полным. Томсон первоначально назвал энергию системы *механической энергией*, но позже, в 1856 году, он выбрал более подходящее имя – *действительная энергия*. Позднее Гельмгольц назовет это *внутренней энергией*^[63].

Универсальное стремление энергии

В 1847 году, когда Томсон узнал об экспериментах Джоуля по измерению механического эквивалента теплоты, демонстрирующих, что работа могла быть преобразована в тепло, он немедленно признал важность этого открытия. Было понятно, хотя эксперимент Джоуля этого явно и не продемонстрировал, что *эквивалентность* подразумевает возможность перехода тепла в работу. Это создавало Томсону определенные проблемы, поскольку тогда он был сторонником теплородной теории, которая отрицала выводы Джоуля. Тем не менее Томсон разрешил эти противоречия, издав работу «О динамической теории тепла». Однако, даже несмотря на это, перед Томсоном стояла еще одна проблема: что происходит с работой, согласно Джоулю, когда тепло проходит через объект,двигающийся из теплой среды в холодную?

Сегодня мы точно знаем, что можно использовать тепловой двигатель для получения работы за счет тепла. Если же вместо этого мы возьмем то же самое количество тепла и позволим ему свободно пройти через тепловой двигатель, окажется, что работа не была произведена: она попросту потерялась. Этот факт не давал Томсону покоя. Безусловно, в случае обратимого теплового двигателя Карно из данного количества теплоты производится максимальное количество работы, в то время как, согласно Фурье, из свободного потока тепла получается минимальное количество возможной работы – а фактически не получается вовсе. В последнем случае это выглядит так, будто работа просто исчезла, и Томсон хотел знать точно, куда именно. Он пишет:

«Причина, по которой я не могу принять теорию, так ярко поддерживаемую господином Джоулем, заключается в том, что механическое воздействие, с точки зрения теории Карно *абсолютно теряющееся* при проводимости, не учитывается в динамической теории (Джоуля) никоим образом, кроме утверждения, что *оно не теряется*».

В 1852 году Томсон опубликовал статью «Об универсальной природной тенденции к рассеиванию механической энергии». В ней Томсон утверждает, что не вся энергия одинакова^[64]. Какую-то

энергию можно использовать для работы, а какую-то – нет. Давайте для примера сравним энергию реки с энергией океана. Несомненно, океан обладает большей энергией, чем река. Чтобы это понять, достаточно просто посмотреть на океан и на то, как его волны бьются о берег. Но как же извлечь эту энергию и произвести с ее помощью работу?

Существует множество способов сделать это, но при каждом из них придется иметь дело с хаотичной природой двигающихся волн. Изменение размера, силы, направления и длительности океанских волн позволяют извлечь огромный объем энергии, который можно преобразовать в работу^[65]. С другой стороны, устойчивый и постоянный поток реки – гораздо более подходящий кандидат для получения энергии. Именно поэтому мы строим гидроэлектростанции на реках, а не в океанах^[66].

Томсон делает вывод о том, что в природе чаще встречается рассеянная и неупорядоченная энергия; как только она превращается в рассеянную (как в случае с океаном), становится практически невозможно с ее помощью произвести полезную работу. Фактически если вы хотите извлечь энергию и это возможно, потребуется произвести работу, чтобы сделать это. Именно это показывает нам, что природа отдает предпочтение рассеиванию энергии.

Закон рассеивания Томсона (томсоновское рассеивание) объясняет поведение энергии, которая не учитывается в первом начале. Представьте себе тепловой двигатель Карно, где для производства работы мы можем использовать только часть тепла, в то время как оставшуюся часть неизбежно поглощает окружающая среда. Таким образом, даже в практически идеальной модели, где используется наиболее эффективный тепловой двигатель, Вселенная все еще требует утечки части тепла. Обойти этот закон, который Томсон считает «универсальной тенденцией», не представляется возможным. Если мы не пытаемся использовать энергию для работы теплового двигателя, то она попросту рассеется, как гласит теория Фурье.

Таким образом, в обоих случаях некоторое количество теплоты рассеивается, но не теряется. Рассеянное тепло уходит в случайном направлении – подобно движению волн океана. Таким образом, не вся энергия одинакова; природа стремится потратить (рассеять) такую энергию, как, например, тепло; и эта потраченная энергия не теряется

и не уничтожается, она просто переходит в атомы, составляющие материю, что делает ее недоступной для выполнения работы.

Из этой концепции можно сделать вывод, что «упорядоченная» энергия обладает лучшими качествами по сравнению с «неупорядоченной», поскольку может быть использована для работы. Давайте еще раз обратимся к нашему примеру с океаном и его хаотичной энергией, заключенной в движении волн, и сравним ее с более упорядоченной энергией реки, которая может выполнять работу. Сравнение показывает нам, что рассеивание энергии является процессом ее «деградации» – от лучшего к худшему, от порядка к беспорядку.

Первое начало гласит, что энергия не создается и не уничтожается, но переходит из одной формы в другую, таким образом сохраняясь. Тем не менее закон рассеивания Томсона дает понимание того, что с энергией происходит больше процессов, чем описывает первое начало. Энергия не только сохраняется, но и стремится к рассеиванию. Более того, это рассеивание возникает в результате перехода от более высокого качества (упорядоченности) к низкому качеству (неупорядоченности). Следовательно, у энергии есть «предпочтительное направление», она стремится к рассеиванию, и, чтобы заставить ее двигаться в обратном направлении, необходимо выполнить некую работу^[67]. В самом деле, закон рассеивания Томсона, вероятно, был его наиболее важным вкладом в термодинамику. Фактически он является основой *второго начала термодинамики*.

Глава 7

Предпочтительное направление Энтропия – указатель природы

У природы, кажется, есть «предпочтительное направление» для определенных процессов. Чашка горячего кофе остывает, отдавая тепло в окружающую среду. Если добавить в эту же чашку сливки, они смешаются с кофе независимо от того, будете вы их размешивать или нет. Спустя некоторое время кофе и окружающая среда будут одинаковой температуры, а сливки и кофе станут однородной жидкостью.

Как все мы знаем, опыт учит нас, что тепло не станет внезапно возвращаться из окружающей среды обратно в кофе, заставляя его опять нагреться. Так и сливки не отделятся внезапно от кофе. Если мы уроним чашку с кухонного стола, она, скорее всего, разобьется после удара об пол. Мы можем догадаться, что сколько бы мы ни ждали, стакан (к нашему разочарованию) вдруг не станет целым, запрыгнув при этом на стол. Нам все же придется убирать осколки стакана. Эти и им подобные процессы называют *необратимыми* – у них есть предпочтительное направление течения, которое диктуют законы природы, и обратное течение просто не является предпочтительным.

В действительности мы видим, что потоком энергии управляет нечто конкретное, не описанное первым началом. Вместе с переменчивыми представлениями о тепле и желанием инженеров повысить эффективность теплового двигателя возникло понимание новой величины, которая является аналогом энергии. Она объясняет не только возможное количество работы, совершаемой тепловым двигателем, но и то, почему некоторые процессы протекают в определенном направлении (например, почему тепло движется от горячего к холодному). Кроме того, она тесно связана с миром атомов и способствует нашему пониманию микроскопических частиц. Она называется *энтропией*.

Предпочтительное и неблагоприятное

К 1852 году Томсон пришел к мысли о том, что тепло могло одновременно и преобразовываться в работу, как гласила теория Джоуля, и свободно течь, не производя работы вообще, как считал Фурье. В последнем случае тепло рассеивалось, но не исчезало бесследно, в соответствии с первым началом. Кроме того, Томсон различал энергию высокого и низкого качества и настаивал, что универсальная тенденция для энергии состояла в том, чтобы рассеиваться в качестве тепла, делая его недоступным для работы. Однако Томсон не был единственным, кто размышлял об особенностях тепла.

В 1850 году Клаузиус заявил, что естественное стремление тепла – смена высокой температуры на низкую^[68]. Это интуитивное и легко проверяемое заявление было первоначальным вкладом Клаузиуса в то, что в конечном счете станет *вторым началом термодинамики* (или просто вторым началом). Однако в 1854 году Клаузиус отложил это простое заявление и искал точную математическую формулировку. Конечным результатом стала математическая формулировка второго начала и нового физического свойства^[69], которое он в итоге в 1865 году назовет *энтропией*.

В 1854 году Клаузиус рассмотрел всеми любимую в то время модель системы: обратимый тепловой двигатель Карно. Клаузиус отметил, что в тепловом двигателе протекают два механизма одновременно: *конверсия* и *кондукция*. Конверсия – это процесс, при котором тепло преобразуется в работу и наоборот, тогда как кондукция – это процесс, при котором высокая температура сменяется низкой и наоборот^[70].

Клаузиус утверждал, что для каждого процесса существуют предпочтительное и неблагоприятное направления. Он рассматривал производство тепла в процессе работы как предпочтительное направление, как, например, в экспериментах Джоуля, где источником тепла была работа, производимая падающим объектом или трением. Поэтому Клаузиус считал неблагоприятным потребление тепла для выполнения работы, подобно тому, как это происходит в тепловом двигателе. По его мнению, для кондукции предпочтительным ходом является (очевидно) движение от высокой температуры к низкой, и, наоборот, переход от низкой температуры к высокой он считал неблагоприятным. Тогда как предпочтительные процессы следуют

законам природы сами по себе неблагоприятные необходимо инициировать.

Например, чтобы получить работу из тепла, вам необходимо специальное устройство вроде теплового двигателя; в противном случае тепло просто рассеется, не производя работы. Однако предпочтительный процесс, следующий законам природы, где тепло производится в процессе работы, протекает сам по себе. Он возникает при любом усилии за счет трения. Каждый раз, когда ваши ноги касаются пола при ходьбе, или когда шины вашего автомобиля скользят по асфальту, или когда ваши пальцы барабанят по клавиатуре, трение обращает ваши усилия в тепло.

Совершенно ясно, что предпочтительное движение тепла – от более высокой температуры к более низкой; вот почему в природе многое охлаждается само по себе, но никогда не нагревается самостоятельно. Изменение тепла с низкой температуры на высокую требует работы теплового насоса (как мы и говорили ранее), такого как кондиционер или холодильник. Благодаря этим идеям и тепловому двигателю Карно Клаузиус пришел к удивительному заключению.

Клаузиус понял, что в тепловом двигателе и конверсия, и кондукция происходят одновременно. Однако проводимость является здесь естественным процессом (переход тепла от горячего источника к холодному), в то время как преобразование – неестественный (преобразование тепла в работу). Клаузиус предположил, что в идеальном примере Карно с обратимым двигателем эти два процесса эквивалентны:

«...Эти два преобразования могут рассматриваться как явления одной природы. Таким образом, они оба являются эквивалентами друг друга»^[71].

После разработки математических расчетов для новой теории Клаузиус вычисляет также то, что он назвал *механическим эквивалентом тепла*: значение эквивалентности для кондукции в предпочтительном направлении и значение эквивалентности для конверсии в неpreferable направлении^[72]. Благодаря впечатляющей физической интуиции и математическим познаниям он выяснил, что если тепловой двигатель Карно работает циклично, и общая сумма его значений эквивалентности равняется нулю!

Действительно, это, возможно, был один из самых интересных нулей в истории физики. Позвольте мне объяснить.

Работа теплового двигателя Карно^[73] в цикле похожа на работу реального теплового двигателя, такого как в вашем автомобиле. В конце каждого цикла двигатель возвращается к своему исходному состоянию, или отправной точке, готовый начать весь процесс заново. Однако в теории Клаузиуса результат вычислений равнялся нулю, что было невероятно. А именно, это означало, что Клаузиус открыл новую физическую величину, связанную с механизмами тепла (конверсией и кондукцией). Не просто некоторую физическую величину, но совершенно особый тип физической величины, известный как *функция состояния*^[74].

Функция состояния особенная, потому что ее значение зависит только от текущего состояния системы, а не от того, как система приобрела это состояние. Очень знакомая функция состояния – объем^[75]. Например, представьте, что вы наполняете водой стакан точно наполовину объема. Теперь представьте, как вы наполняете его полностью, а затем выливаете половину воды, вновь оставив стакан наполовину заполненным. Очевидно, даже при том, что мы достигли половины объема двумя различными способами, конечный результат одинаков.

Кроме того, значение любой функции состояния будет неизменным, если начальное и конечное состояния системы одинаковы – как если они находятся в цикле – независимо от способа, которым мы добираемся от начала до конца. Еще раз рассмотрим стакан воды. Даже при том, что мы получили половину объема двумя различными способами, между финальными объемами не было различия; они были одинаковыми – *различие нулевое*^[76]. Именно это и означал ноль Клаузиуса: некоторая неизвестная функция состояния, связанная с теплом, осталась неизменной в результате запуска двигателя Карно и окончания в том же состоянии. Но чем именно эта функция состояния была? И что она означала физически?

Противоположность энергии: энтропия

В 1854 году Клаузиус выявил новую функцию состояния, работая с тепловым двигателем Карно в цикле. Достаточно удивительным для того времени было то, что он не дал этой функции имя, но тем не менее все-таки определял ее как «тепло к температуре». Это могло бы быть, к примеру, процессом, при котором тепло покидает горячий резервуар, разделенным на температуру горячего резервуара, или теплом, переходящим в холодный резервуар, разделенным на температуру холодного резервуара. А именно:

$$q / T,$$

где q – это тепло, а T – температура в Кельвинах^[ZZ].

Вспомните, что в тепловом двигателе Карно (обратимом и идеализированном) единственное тепло, которое терялось при работе, попадало в холодный резервуар. Это необходимая потеря, которая нужна для использования теплового двигателя, и обойти это правило невозможно. Тем не менее тепловой двигатель Карно – все еще самый эффективный тепловой двигатель, хотя, конечно, мы знаем, что он существует только на бумаге; построить совершенно обратимый тепловой двигатель Карно вы не сможете.

Реальный тепловой двигатель необратим – это означает, что у него есть другие процессы, которые объясняют потерю тепла и его рассеивание в окружающей среде, такие как механическое трение, потеря тепла посредством проводимости и других тепловых механизмов. В результате всех тех остальных процессов сумма значений эквивалентности Клаузиуса, которая равнялась нулю для обратимого процесса, *всегда* больше нуля для необратимого процесса. Оказывается, сумма Клаузиуса – не что иное, как сумма всех q/T , которые составляют процесс:

$$\frac{q_1}{T_1} + \frac{q_2}{T_2} + \frac{q_3}{T_3} + \frac{q_4}{T_4} + \dots$$

Итак, это означает, что для обратимого процесса, протекающего циклично, у данного q/T есть другой q/T , который уравнивает его,

как партнер, если угодно, таким образом гарантируя, что общее количество для всех них будет нулем. Однако для необратимого процесса дело обстоит иначе; не у каждого q/T нет партнера, и в итоге получается *остаток* q/T (или *некомпенсированное преобразование*, как называл его Клаузиус), который делает сумму больше нуля – положительным значением^[78]. Природные процессы необратимы, поэтому у них иногда есть *остаточное* q/T , который способствует (добавляя это положительное значение к сумме) постоянному увеличению количества энтропии во Вселенной.

Особый тип необратимого процесса – *спонтанный* процесс. Спонтанный процесс протекает без какой-либо дополнительной помощи; он движется в предпочтительном направлении без приложения работы. Так, когда ваш кофе остывает (так как тепло из него уходит в окружающую среду); стакан разбивается после падения на землю (после того как выполняют работу, например, подтолкнув его к краю прилавка); кубики льда тают в вашем напитке – у этих и многих других спонтанных процессов есть положительное значение. Чем выше это значение, тем более «предпочтительным» является процесс и тем сильнее он увеличивает энтропию Вселенной.

Клаузиус сформулировал многие из своих идей в теории, выдвинутой в 1854 году, где он вводит новую переменную q/T , оставляя ее безымянной. Однако в 1865 году, после дальнейших размышлений, Клаузиус пишет:

«Я считаю, что лучше заимствовать названия важных величин из древних языков, чтобы их могли использовать без изменений во всех современных языках. Я предлагаю назвать величину S *энтропией* тела – от греческого слова, используемого для обозначения *трансформации*. Я намеренно создал слово «энтропия» таким образом, чтобы оно было максимально близким к слову «энергия»; так как две величины, обозначаемые этими словами, так близко связаны в своем физическом значении, что кажется нужным некоторое сходство и в их названиях».

Наконец, в 1865 году Клаузиус завершил свою работу, в которой первое и второе начала были сформулированы так:

1. Энергия Вселенной постоянна.
2. Энтропия Вселенной стремится к максимуму.

Хотя энергия Вселенной остается константой (сохраняется), энтропия продолжает увеличиваться. Поэтому *никакой из происходящих процессов никогда не приведет к уменьшению уровня энтропии Вселенной в целом*. Склонность Вселенной к увеличению энтропии напоминает об «универсальной тенденции к рассеиванию механической энергии», как гласят работы Томсона, и Клаузиус отметил эту связь.

Действительно, именно этот распад – потеря энергии, которую иначе можно было бы использовать для работы, – отличает обратимый процесс от необратимого. Очевидно, все это часть плана природы по максимизации энтропии Вселенной, которая в конечном счете приведет к ее тепловой смерти. Когда энтропия Вселенной наконец достигнет своего максимума, когда больше энтропии быть просто не сможет, все, что останется – энергия, рассеянная в виде тепла. Эта энергия будет распространена среди всех атомов и молекул во Вселенной. Это распределение энергии будет подобно примеру с энергией океана (против энергии реки), в котором у нас не будет способа использовать ее для работы. Другими словами, вся полезная энергия во Вселенной закончится, и все, что останется, – бесполезное тепло!^[79]

Клаузиус также связал энтропию с тем, что он назвал дезинтеграцией. Для Клаузиуса распад был мерой разделения молекул, из которых состоит объект, друг от друга. Рассмотрим кубик льда, который в конечном счете получил достаточно тепла и тает, чтобы стать жидкой водой. Согласно Клаузиусу, у воды как жидкости величина дезинтеграции больше, чем у льда. В среднем (по времени) молекулы воды более отделены друг от друга, чем молекулы твердых тел, и еще больше, когда они – газ.

Клаузиус пытался создать молекулярную интерпретацию энтропии. Тем не менее Клаузиус подчеркнул, что первые и вторые начала были аксиомами и, следовательно, не нуждались в молекулярной интерпретации; она была всего лишь дополнением^[80].

Клаузиус был основным исследователем в области термодинамики. Его развитие идеи энтропии и второго начала, которое следует из нее, являются понятиями, которым все еще учат и которые используются в науке сегодня. (Печально, что его вклады часто остаются незамеченными.) И хотя он всегда тщательно подходил к развитию

своих теорий, этого было недостаточно, чтобы защитить ее от недопониманий и резкой критики.

Работы Клаузиуса часто написаны излишне многословно, его идеям недостает четкости формулировок^[81]. Это осложнялось тем, что Клаузиус часто излагал свои мысли, опираясь на интуицию. Кроме того, расчеты, которые он использовал, были столь сложны, что бросали вызов таким математикам, как Томсон и Максвелл. Хуже всего, что в математическом обосновании энтропии он неумело начинал с одной условности, только чтобы переключиться в конце на противоположную^[82].

Самым постоянным и откровенным критиком Клаузиуса был Питер Гатри Тайт (1831–1901). Тайт интерпретировал энтропию как меру энергии, доступной, чтобы производить работу. Это достаточно удивительно, учитывая, что энтропия в первую очередь не форма энергии, и даже мимолетный взгляд на математическую формулу проясняет этот факт, показывая, что единицы энтропии проистекают из тепла (которое, как вы знаете, является энергией), разделенного на температуру (в градусах Кельвина).

И если бы не было достаточно, что в 1868 году эта явная ошибка появилась в книге Тайта «Эскизы термодинамики», – она возникла снова в учебнике Джеймса Клерка Максвелла (1831–1879) под названием «Теория тепла», который, кроме этой ошибки, проигнорировал большую часть работ Клаузиуса. После того как Клаузиус написал письмо в «Философский журнал», Максвелл отметил свою ошибку и исправил ее во втором выпуске книги, также указав, что энтропия на самом деле связана с энергией, которая *не* доступна системе для выполнения работы. Сегодня мы понимаем, что максимальное количество энергии системы, доступное для совершения работы, – это *свободная энергия*^[83] системы.

Энтропия, по мнению Клаузиуса, предоставляет собой противоположность энергии. В то время как энергия Вселенной сохраняется, как настаивает первое начало, ее энтропия стремится к максимуму. Энергия и первое начало, которое управляет ей, не могут объяснить, почему определенные процессы протекают в каком-то выбранном направлении; для этого нам и нужна энтропия. Тем не менее ее определение с точки зрения *термодинамики* – «отношение тепла к температуре» – оставляет желать лучшего. Мы понимаем, что

тепло – это одна из форм энергии, проистекающая из движения крошечных элементов материи (атомов). Однако в термодинамике нет определений, которые так или иначе связывают энтропию и атомы; не существует никакой *микроскопической интерпретации*.

Потребовались поразительные усилия нескольких ученых, чтобы показать, что у энтропии действительно есть микроскопическая интерпретация, что не только дополняет термодинамическое описание Клаузиуса, но и существенно расширяет его, делая понятие энтропии еще более мощным инструментом современной науки.

Глава 8

Другая сторона энтропии

Связь энтропии с веществом и атомами

Уход от термодинамического описания энтропии Клаузиуса (тепло, деленное на температуру) в сторону вопроса, включающего фундаментальные составляющие вещества – атомы, – проистекает из исследования газов и желания объяснить поведение этих систем в терминах математических моделей. Эта область теоретических исследований известна как *кинетическая теория*, и ее преемником считается *статистическая механика*.

Клаузиус был одним из основоположников кинетической теории, он пытался использовать ее, чтобы дать энтропии молекулярное обоснование, хотя и настаивал, что этот подход только вспомогательный. Он был убежден, что понятие энтропии было аксиомой, крепко укоренившейся во втором начале. В основном только благодаря усилиям Джеймса Клерка Максвелла и Людвигу Больцмана кинетическая теория и статистическая механика действительно начали процветать, приведя, среди прочего, к пониманию четкой связи микроскопического мира атомов с энтропией.

За пределами энтропии Клаузиуса

Джеймс Клерк Максвелл родился в Эдинбурге, Шотландия, в 1831 году. Его семья переехала в небольшую усадьбу в Миддлби, Гэллоуэй (юго-западная Шотландия), унаследованную его отцом, Джоном Клерком (фамилию «Максвелл» добавили, чтобы уничтожить сомнения в законности этого наследования). Когда Джеймсу было восемь лет, его мать умерла от рака брюшной полости; ей было 48 лет. Джон Клерк Максвелл был внимательным и, возможно, чрезмерно опекающим отцом. К сожалению, он сделал ошибку и поручил раннее образование Джеймса наставнику, который использовал физические наказания для обучения. К счастью, визит его тетки по материнской линии, Джейн Кей, прекратил это оскорбительное «обучение», потому что она смогла убедить Джона Клерка позволить младшему Максвеллу

продолжить свое образование в Эдинбургской академии. Его первоначальный опыт в академии был также не самым приятным из-за насмешек (его странная одежда и сильный гэллоуэйский акцент делали его легкой мишенью) и прозвища *Dafty*, что означало «чудак». Тем не менее Максвелл выстоял и даже нашел друзей на долгие годы.

Сам любивший науку и математику, отец Максвелла поощрял и страсть своего сына к науке, и вместе они часто присутствовали на встречах Эдинбургского общества искусств и Эдинбургского королевского общества. В возрасте четырнадцати лет Максвелл написал работу о новом методе построения овалов. Хотя Декарт уже описал большую часть этой работы, часть статьи Максвелла была оригинальна. Отец Максвелла привлек к работе внимание Джеймса Форбса, профессора естественной философии в Эдинбургском университете, и это дало толчок карьере Максвелла.

В 1847 году, в возрасте шестнадцати лет, Максвелл начал посещать Эдинбургский университет, где он учился у Форбса и Уильяма Гамильтона. Заклятые враги, Форбс и Гамильтон в значительной степени не соглашались во всем. Однако Максвелл был одаренным учеником, и они уделяли ему особое внимание, которого, по их мнению, он заслуживал.

Опытный экспериментатор, Форбс предоставил Максвеллу свою лабораторию, в то время как Гамильтон, философ, оттачивал навыки мышления Максвелла, подчеркнув пользу идеализированных моделей для понимания реальных явлений. Хотя после первого курса у Максвелла появилась возможность посещать занятия в Кембридже (популярный в то время выбор для тех, кто занимался математикой), он остался и закончил свое высшее образование в Эдинбурге. Максвелл не считал занятия очень сложными и находил время, чтобы исследовать многие вопросы самостоятельно, например ставить эксперименты с поляризованным светом.

В 1850 году он посещал занятия в Петерхаусе (учредительном колледже Кембриджского университета в Англии), но после первого семестра перешел в Тринити-колледж (другой учредительный колледж Кембриджского университета). Именно в это время Максвелла начал вписываться в коллектив (несмотря на его странное чувство юмора и эксцентричность) и завел много друзей. В 1854 году Максвелл окончил

Тринити со степенью в области математики. Он оставался сотрудником Тринити в течение еще двух лет, а в последний год получил членство.

В 1856 году в колледже Маришаль в Абердине, Шотландия, появилось место профессора. Среди прочего это давало хорошую возможность быть около отца, здоровье которого ухудшалось. Его отец помог ему подготовить необходимые документы, но умер прежде, чем Максвелл получил эту работу.

Теперь Максвеллу было 25 лет, и он был на целых десять лет моложе любого другого преподавателя в Маришале. Хотя его письменные работы (бумаги, формальные лекции и книги) были образцом ясности, Максвелл не преуспел как преподаватель. Он не умел доносить лекционный материал до своих студентов. В 1860 году реорганизация оставила Максвелла без работы, так что он принял предложение Королевского колледжа в Лондоне. Пять лет здесь были, возможно, самыми творческими в его жизни, и работа принесла ему много удовольствия. Из многочисленных вкладов Максвелла нас интересует его работа над движением атомов.

Сегодня мы принимаем как должное то, что все вещество состоит из крошечных, невидимых стандартных частиц, называемых атомами. Даже до того, как их существование подтвердили экспериментально, ученые и математики использовали атомы в своих физических моделях, воображая их мысленно, когда попытались разъяснить повседневные явления. Газы были первыми веществами, которые исследовались с помощью^[84] атомных моделей.

Точнее, цель состояла в том, чтобы понять, как движение атомов газа приводит к его свойствам, которые мы наблюдаем. Действительно, сосуд с газом – скажем, воздушный шар, заполненный атомами гелия, – благотворная система с точки зрения разработки полезных моделей^[85]. Реальность такова, что при комнатной температуре и давлении^[86] в таком шаре^[87] у вас будет приблизительно 10^{23} (100 000 000 000 000 000 000 000) атомов, и в среднем они движутся со скоростью примерно 4 500 км/ч (и тем быстрее, чем выше температура)^[88], и отдельный атом будет участвовать приблизительно в миллиарде столкновений с другими атомами каждую секунду. Тем не менее у всего этого хаотичного движения есть определенные отношения с общими свойствам газа.

Идею о том, что свойства газов можно объяснить частицами в движении, в 1738 году пропагандировал Даниил Бернулли (1700–1782), который предложил модель, очень похожую на общепринятую сегодня. Однако в то время у модели Бернулли были некоторые преграды, которые она не могла преодолеть. Во-первых, идея, что вещество состоит из крошечных, невидимых частиц, все еще не была господствующей. Кроме того, *частицы в движении* у Бернулли противоречили теории *частиц в фиксированных местоположениях* Ньютона, описанных в «Началах» (1687), и победить Ньютона было трудно. Бернулли также выдвинул идею, что движение частиц производит тепло, которая противоречила широко принятой тогда теплородной теории. Таким образом, из-за трех этих проблем и появления на век раньше, чем нужно было, теория Бернулли не завоевала популярности, несмотря на то что правильно объясняла хорошо известные экспериментальные отношения между давлением газа и объемом резервуара, в котором он находится (известна как закон *Бойля – Мариотта*). Прежде чем оценить вклад Максвелла, мы должны обсудить вклад Клаузиуса.

В 1856 году Август Карл Крёниг (1822–1879) издал короткие ученые записки по кинетической теории, которые вдохновили Клаузиуса начать собственную работу по этой теме. Клаузиус зашел дальше Крёнига и опубликовал свой труд в 1857 году. Ключевой результат работы Клаузиуса – выражение, связывающее давление газа и объем его сосуда и среднюю скорость для атомов газа.

Суть этого выражения такова: оно связывает *микроскопическую* величину (средняя скорость атомов газа) с *макроскопическими* (давлением и объемом). Другими словами, связывает поведение невидимого мира атомов с видимым миром через вещи, которые мы можем измерить. В данном случае – давление и объем.

Например, легко измерить давление воздуха и определить объем (указанный на боку) вашей автомобильной шины. Теперь, используя отношения, очень похожие на то, которое вывел Клаузиус, также можно легко определить количество атомов газа в шине, даже при том, что фактически их не видно. Это было действительно чертовски сильно.

Клаузиус также предположил, что скорость атомов в контейнере с газом будет *иметь некоторое распределение*. Другими словами, не все

атомы газа движутся с одинаковой скоростью, но каждый атом имеет скорость в определенном диапазоне. Правда, Клаузиус не стал определять этот диапазон. Скорее он исключил эту необходимость из своих вычислений, рассматривая каждый атом как перемещающийся на средней скорости. При этом Клаузиус внес огромный вклад в решение, казалось бы, недоступной проблемы. Определение этого диапазона скоростей и его важность оставили Максвеллу.

Максвелла, как ни странно, привели к кинетической теории кольца Сатурна. В 1855 году номинацией Премии Адамса по математике, присуждаемой в Кембридже раз в два года, было «Движение колец Сатурна». В то время было неясно, были ли кольца твердыми, жидкими или газообразными. Действительно, истинный характер колец Сатурна был заманчивой загадкой с тех пор, как Галилео в 1610 году впервые посмотрел на них через свой телескоп. Будучи в Абердине, Максвелл посвятил большую часть своего времени проблеме, и в письме Томсону описывал кольца как «большой слой обломков, которые сталкиваются и встряхиваются в своем движении вокруг Сатурна, где нет надежды на состояние покоя и согласованности».

Максвелл построил теорию, которая показала, что кольца Сатурна не могли быть твердым телом, газом или жидкостью, а скорее состояли из множества небольших твердых, сталкивающихся частиц, обращающихся вокруг планеты, которые находились в устойчивом состоянии и все вместе выглядели как твердые. Это решение принесло ему приз. Сегодня мы действительно знаем, что кольца Сатурна состоят из крошечных обломков скальных пород, которые сталкиваются друг с другом, пока обращаются вокруг планеты. Теперь Максвелл был готов задуматься о другой системе сталкивающихся частиц: резервуаре, наполненном атомами газа.

В своем эссе по кольцам Сатурна он прокомментировал проблему построения математической модели, которая могла должным образом разобраться со столкновением такого количества частиц. Максвелл позже отметил, что работа Клаузиуса над кинетической теорией дала этому пониманию отправную точку. Однако, тогда как Клаузиус принял решение рассматривать каждый атом в газе как движущийся на фиксированной (средней) скорости, Максвелл был полон решимости

найти фактическое распределение, или диапазон скоростей, доступный атомам газа.

В XIX веке большинство ученых полагало, что такое распределение скоростей (если оно вообще существовало) было просто признаком того, что система атомов газа еще недостаточно «успокоилась». Другими словами, система не была в равновесии, а скорее была в состоянии *не-равновесия*. Предполагалось, что при достаточном количестве времени система в конечном счете придет к равновесию, а атомы газа будут двигаться на одной и той же скорости^[89].

Скорость атомов

Максвелл начал работу над кинетической теорией еще в то время, когда был преподавателем в колледже Маришаль. В письме к своему знакомому физику и математику Джорджу Габриелю Стоксу (1819–1903) от 30 мая 1859 года он описывал свою работу как «упражнения в механике». По-видимому, у Максвелла были серьезные сомнения в том, насколько правильно кинетическая теория описывала свойства газов. Тем не менее в 1860 году он опубликовал революционную работу, доказав то, о чем только размышлял Клаузиус: скорости атомов газа распределяются особым образом, когда система находится в равновесии.

Равновесие системы – важное условие. В данном случае это означает, что температура, количество атомов газа и объем резервуара, содержащего их, остаются неизменными; они постоянны. Максвелл понял, чисто с практической точки зрения, что столкновения, происходящие между атомами в газе, приводят к *случайному* движению. Поэтому, к разочарованию его современников, он полностью игнорирует явные столкновения, происходящие между атомами газа (и стенами емкости), и вместо этого обращается к *теории вероятности*. Законы вероятности управляют такими вещами, как выигрыш в лотерее, шансы на который являются очень небольшими; открытие следующей карты, дающей вам двадцать одно очко (или нет) в блек-джеке; падающая с частотой 50 % «орлом» или «решкой» вверх монета и тому подобное. Максвелл продемонстрировал, что эти же идеи применимы и к пониманию свойств очень большого количества сталкивающихся атомов газа.

Максвелл рассмотрел скорость атомов газа в равновесии. Для скорости, вектора, необходимо рассматривать и число, и направление движения. Предполагая, что у каждого атома газа есть одинаковая вероятность переместиться в любое из доступных направлений^[90], он показал, что у атомов газа действительно есть целый диапазон доступных скоростей. Поэтому они все не двигаются с одинаковыми скоростями; скорее, очень небольшое число движется очень медленно или очень быстро, в то время как движение большинства протекает на большем количестве промежуточных скоростей. Другими словами,

согласно распределению Максвелла, когда система в равновесии, существует более высокая вероятность нахождения атома газа, движущегося на промежуточной скорости, чем на очень низких или очень высоких скоростях. Теперь на практике мы понимаем, что распределение Максвелла применимо к газу, который ведет себя как *идеальный газ*, в котором атомы газа не взаимодействуют посредством притяжения и отталкивания, как это происходит в настоящем газе.

В 1860 году Максвеллу была нужна всего лишь одна страница выкладок, чтобы получить этот удивительный результат, который также позволит ему вычислить другие важные характеристики газа, которые соответствовали экспериментальным наблюдениям. Безусловно, в системе, которая не находится в равновесии, тоже будет проходить распределение скоростей атомов газа. Однако вот в чем подвох: это не будет распределение Максвелла.

Рассмотрим еще раз нашу систему атомов газа, где количество атомов и объем резервуара неизменны, но температура со временем изменяется. Давайте предположим, что наша неравновесная система стремится к равновесию, и поэтому температура в конечном счете будет постоянной. В то время как над системой происходят изменения, ее распределение скоростей тоже меняется, и пока система наконец не достигнет равновесия, распределение будет продолжать изменяться. Однако как только система придет в равновесие, скорости примут распределение Максвелла вне зависимости от начального состояния системы или того, как она изначально была подготовлена. Наконец, стремление нашей неравновесной системы к равновесию является спонтанным процессом – это означает, что энтропия увеличивается и необратимо растет в течение всего процесса^[91]. Развитие нашей системы в сторону распределения Максвелла в равновесии играет крайне важную роль в понимании определенных физических процессов.

Рассмотрим горячую тарелку супа. Если вы подуете на ложку, прежде чем положить ее в рот, суп в ней станет холоднее. Это вызвано тем, что суп состоит из атомов, перемещающихся на разных скоростях. Внутри супа атомы с более высокими скоростями (более горячие) расположены выше атомов с более низкими скоростями (более холодных). И в результате того, что вы дуете на ложку супа, более горячие атомы уносит поток воздуха, в то время как более прохладные

остаются. Если бы все атомы двигались с одинаковой скоростью, не было бы холодных и горячих атомов; они все имели бы одинаковую температуру. Вы могли бы бесконечно дуть на суп, но в таком случае его температура не изменилась бы.

До Максвелла вероятность и статистику использовали для анализа данных (в общественных науках и физике). Однако Максвелл применял и то, и другое, чтобы точно описать сам фактический физический процесс. Максвелл годами занимался термодинамикой и все же написал не очень-то много работ по этой теме. Многие о его исследованиях известно из переписки с Томсоном и Тейтом и из его «Теории теплоты», написанной в 1870 году и после этого выдержавшей 11 переизданий. В дополнение к собственному вкладу в науку Максвелл изучал идеи Джозайи Уилларда Гиббса (1839–1903), Больцмана и Клаузиуса, а также способствовал «примирению» взглядов Клаузиуса, Тейта и Томсона.

Несмотря на свой эксцентричный характер, Максвелл был щедрым и бескорыстным человеком, с глубоким чувством долга. Когда его жена, Кэтрин, была больна (у нее было слабое здоровье, и болела она часто), Максвелл в течение трех недель сидел у ее кровати и отвлекался только на работу в лаборатории. Все это время его собственное здоровье неуклонно ухудшалось. Изучая чью-либо научную работу, Максвелл комментировал ее таким образом, что комментарии давали больше понимания темы, чем сама работа. Его комментарии к статье Уильяма Крукса (1832–1919) могли, например, привести к открытию электрона (если бы тот прислушался к ним). Пожалуй, Максвелл обладал поразительным метафизическим чутьем. В письме своему другу он пишет: «...удивительно, что отношение частей к целому в невидимом мире такое же, как и в видимом, и что за пределами нашей индивидуальности и личной жизни лежит иной пласт существования, также наполненный действиями и чувствами».

Максвелл умер 5 ноября 1879 года в возрасте сорока восьми лет в Кембридже от рака брюшной полости (эта же болезнь унесла жизнь его матери). Статистический подход Максвелла к динамике газов позволил Людвигу Больцману прийти к микроскопической интерпретации энтропии, что выходило далеко за рамки термодинамического определения энтропии как «отношения тепла к температуре» Клаузиуса.

Энтропия и вероятность

Людвиг Больцман (1844–1906) родился в Вене и учился в Венском университете, где в 1867 году он и получил докторскую степень. Больцман был импульсивным человеком, менявшим (по выбору) одну академическую специальность за другой – за почти сорокалетнюю карьеру в общей сложности семь раз.

С начала 1870 года Больцман был научной суперзвездой и пользовался огромным спросом. В 1894 году министру культуры Австрии пришлось предложить Больцману зарплату, которая была больше, чем у любого другого профессора в Австрии, чтобы тот согласился преподавать теоретическую физику. Прежде Больцман уже дважды был преподавателем в Венском университете, с 1867 по 1869 год как доцент и с 1873 по 1876 год как преподаватель математики. Тем не менее в 1900 году он в третий раз покидает университет.

В 1902 году он последний раз вернулся в Вену, вновь став преподавателем теоретической физики; все два года его отсутствия должность была вакантна. Хорошо зная его характер, австрийские власти позволили Больцману вернуться взамен на его обещание никогда не устраиваться на любую другую работу за пределами Австрии. Больцман сдержал это обещание. Личность Больцмана была такова, что он всегда переходил из одной крайности в другую: сам он шутил про свой характер, говоря, что родился между Масленицей и Пепельной средой – между празднованием и епитимией, так сказать. Сегодня врачи, скорее всего, поставили бы Больцману диагноз «биполярное расстройство» (впрочем, у него были и другие проблемы со здоровьем: астма, мигрень, плохое зрение и стенокардия).

Больцман был исключительным теоретиком (что любопытно, ведь при этом он был профессором экспериментальной физики в университете города Грац, Австрия, с 1876 по 1890 год – его самое долгое пребывание на одной должности). Вот как он сам описывал себя: «Я теоретик с головы до пят. Мои мысли и дела всецело направлены на развитие теории. Ни одна жертва в ее славу не была бы слишком велика, ведь теория – смысл всей моей жизни».

Несомненно, Больцман был только вторым по значимости теоретиком после Максвелла. Но Больцман был известен не только благодаря своей смелости в исследовании теории, но и исключительным педагогическим талантом, чем никогда не мог похвастаться Максвелл. Более того, он внимательно относился к своим студентам и обращался с ними как с равными, ведя дискуссии и позволяя даже критиковать себя.

В 1866 году, в возрасте 22 лет, Больцман написал первую значимую научную работу, которая называлась «О механическом значении второго начала». В ней он противопоставлял неоднозначной природе второго начала надежную фигуру принципа сохранения энергии, описанного в первом начале. Он попытался дать общее доказательство второго начала и связал его с классической механикой, описанной Ньютоном.

Хотя Максвелл сам не формулировал второе начало, он рассматривал этот подход как в корне неверный, поскольку для него второе начало было чистой воды вероятностным, статистическим по своей природе и поэтому не имело основы в виде чисто классического описания с точки зрения механики. Больцман в своем заблуждении был не одинок. Клаузиус также пытался вписать второе начало в принципы механики. Очень скоро Больцман понял, что этот подход в корне неверен, в то время как Клаузиус даже после нескольких попыток не был разубежден.

Первую такую попытку Клаузиус предпринял в 1862 году, представив «дезинтеграцию», которая должна была стать мерой значительности разделения между атомами и молекулами в объекте. В 1870 и в 1871 годах он публикует работы, которые должны были описать второе начало с точки зрения механики. На его последнюю работу быстро откликнулся Больцман, заявив в своей работе, что Клаузиус по сути повторил его опыт 1866 года. В следующей работе в 1872 году Клаузиус любезно ответил, что «чрезвычайный спрос» на его работы затрудняет ознакомление с текущей научной литературой. Тем не менее все эти подходы были ошибочны, и хотя Клаузиус не достиг успеха со статистической природой второго начала, это смог сделать Больцман, продолжив тем самым работу, начатую Максвеллом.

В 1868 году Больцман не упоминал работу Максвелла, скорее всего, потому, что он все еще учил английский (в частности, чтобы иметь

возможность прочитать оригинал работы Максвелла по электромагнитной теории), чем из-за недосмотра с его стороны. Однако спустя два года после этой неудавшейся попытки, и уже будучи знакомым с работой Максвелла по распределению скоростей атомов газа, Больцман нашел то, что искал – объяснение энтропии и второго начала с точки зрения вероятности и статистики.

Вспомните, что закон Максвелла описывает возможный диапазон, или распределение скоростей атомов в идеальном газе в равновесии при определенной температуре. Мы уже выяснили, что «энергия движения» является кинетической и объект, обладающий скоростью, должен находиться в движении и, следовательно, обладать кинетической энергией. Следовательно, распределение Максвелла также описывает распределение атомов идеального газа по кинетической энергии в состоянии равновесия. Другими словами, Максвелл описывает распределение кинетической энергии идеального газа в равновесии – вот что понял Больцман. В 1868 году Больцман смог показать, что идея распределения может быть расширена на *полную энергию* системы в равновесии – и кинетическую, и потенциальную. Фактически, применяя более общий подход к проблеме, Больцман также смог вывести распределение Максвелла для находящейся в равновесии системы атомов идеального газа.

Итак, пока атомы газа данной системы движутся, сталкиваясь друг с другом и со стенками контейнера, внутри которого они находятся, когда система пребывает в равновесии, система в целом принимает значения энергии из диапазона, задаваемого *распределением Больцмана*. Каждая из этих энергий описывает систему как пребывающую в некотором *микросостоянии*. Каждое микросостояние описывается всеми положениями атомов газа и соответственно их скоростями в данный момент времени. С течением времени система переходит из одного микросостояния в другое и, если дать ей достаточно времени, испытает все доступные микросостояния. Однако она не будет переживать каждое микросостояние с одной и той же частотой; более вероятные состояния будут возникать чаще. Согласно распределению Больцмана, микросостояния с более низким уровнем энергии – более вероятные, а вероятность их возникновения определяется *вероятностью Больцмана*^[92].

Распределение Больцмана, вероятность Больцмана и микросостояния – основополагающие идеи *статистической механики*, которая позволяет нам правильно рассчитать определенные параметры системы, причем не только системы атомов газа, но и всех *классических систем* (в отличие от *квантовых*). Такие величины, как давление и температура, можно рассчитать, иногда с помощью компьютерного моделирования. Итак, несмотря на то что мы не можем видеть атомы, их хаотичное движение и возникающие в результате микросостояния^[93], с помощью методов Больцмана и аналогичных им мы можем правильно описать многие вещи, которые мы наблюдаем в повседневной жизни.

Когда вы смотрите на какой-либо объект, вы наблюдаете его физическое состояние, или *макросостояние*^[94]. Опять-таки, давайте снова вспомним о шарике, наполненном воздухом. Вы не можете видеть воздух, в котором молекулы движутся, сталкиваясь друг с другом и со стенками шарика. Вы видите форму (объем) шарика и можете измерить его температуру. В этом случае макросостояние вашей системы^[95] прекрасно описывается свойствами, которые вы можете наблюдать и измерить: температурой и объемом^[96]. Тем не менее микросостояния, возникающие в результате столкновения молекул, скрыты от глаз.

Таким образом, множество микросостояний являются *скрытыми* состояниями системы, в то время как макросостояние – это состояние системы в целом, с физическими свойствами, которые мы можем увидеть и измерить. В некотором смысле макросостояние – это грубый, нечеткий вариант системы.

Вот как это примерно выглядит: когда я был ребенком, я любил трясти коробки с моими новогодними подарками. Когда я тряс коробку, содержимое болталось из стороны в сторону (часть его разбивалась) и по сути переходило из одного микросостояния в другое. Я никогда не мог видеть все эти встряски (и все эти «микросостояния»), зато я мог видеть среди всех этих трясок то, что никогда не менялось – коробку в красивой обертке с бантиком наверху: ее «макросостояние» всегда было одинаковым, хотя «микросостояния» внутри коробки изменялись с каждым потряхиванием.

Различия между макросостоянием и микросостояниями, составляющими его, позволяют нам прийти к более

фундаментальному пониманию энтропии, большему, чем «отношение тепла к температуре». Больцман продемонстрировал, что чем больше микросостояний доступно системе, тем выше ее энтропия^[97]. Вспомним, что спонтанный процесс возникает без помощи извне или приложения работы; он просто происходит. Согласно Клаузиусу, спонтанный процесс возникает, поскольку он *предпочтителен с точки зрения энтропии*; это то направление, которое приводит к увеличению энтропии и поэтому является предпочтительным.

Используя концепцию микросостояний Больцмана, мы также можем утверждать следующее: спонтанный процесс возникает, потому что он приводит к появлению большего количества микросостояний. Ярчайший тому пример – смешивание жидкостей. Представьте, что происходит, когда в чашку с кофе наливают сливки. Мы можем вообразить, как сливки собираются наверху чашки, никогда полностью не смешиваясь с кофе. Однако второе начало уверяет нас, что в природе кофе и сливки будут стремиться увеличить их общую энтропию.

Таким образом, вместо того чтобы держаться вместе наверху чашки, сливки движутся через кофе. Этот процесс *диффузии* дает сливкам доступ к гораздо большему пространству в чашке, чем если бы они оставались наверху. Более того, то место наверху чашки, где раньше находились сливки, теперь также доступно для кофе. Получается, что диффузия открыла и сливкам, и кофе доступ к большему пространству в чашке. Это означает, что у обоих возникло больше микросостояний, и в результате энтропия системы максимизировалась.

Итак, означает ли это, что вы никогда не увидите, как сливки спонтанно отделяются от кофе? Если коротко, то да. Причина этого в том, что существует только одно микросостояние, в котором сливки и кофе абсолютно разделены, и множество микросостояний, где они смешиваются (в той или иной мере). В конце концов, это связано с вероятностью: чем больше способов ведет к возникновению явления (смешивания) по сравнению с другим (отделением), тем более оно вероятно. В нашем примере вариантов смешивания гораздо больше, поэтому оно более вероятно (точно так же в лотерее гораздо больше комбинаций, которые ведут к проигрышу, чем к выигрышу).

Однако Больцман никогда не говорил, что шансов *нет*. По сути, существует ненулевая вероятность того, что однажды кофе и сливки не

смешаются. Но этот шанс настолько мал, насколько много способов смешения. Таким образом, когда встречаются частицы кофе и сливок, сталкиваясь друг с другом, они проводят больше времени в *микросостояниях*, результатом чего является *смешанное макросостояние* (физическое состояние), которое мы видим.

Давайте рассмотрим последний пример – нечто более понятное, чем сталкивающиеся частицы, которые создают невидимые микросостояния. Рассмотрим колоду карт.

Первое, что вы заметите в новой колоде карт – все карты расположены по порядку: карты каждой масти следуют одна за другой, от туза до короля. В терминах, о которых мы говорили, это будет «упорядоченное» микросостояние колоды. Теперь представим, что мы поместили нашу колоду в устройство для тасования карт. Когда карты тасуются, колода изменяет начальное микросостояние на другое, потом на третье и так далее. Мы можем представить нечто подобное в случае с газом, где постоянное движение атома вынуждает систему «перетасовывать» микросостояния.

Итак, остановим тасовщик и посмотрим на карты. Как мы видим, текущее микросостояние – «беспорядочное». Все масти перемешаны друг с другом, последовательность нарушена – ничего общего с тем, какой была колода до перемешивания. Положим карты в тасовщик опять и продолжим перемешивать, периодически проверяя новые микросостояния. Конечно, мы предполагаем, опираясь на опыт, что каждый раз, когда мы наблюдаем новое микросостояние, карты находятся в беспорядке. Сколько бы мы ни перемешивали карты, скорее всего, они не вернутся в исходное микросостояние. Нельзя сказать, что это невозможно – скорее, существует гораздо больше способов перейти колоде в новые микросостояния, а не в первоначальное. Понятно, что у колоды карт куда больше беспорядочных *микросостояний*, чем упорядоченных. Поэтому неупорядоченное *макросостояние*, или *фаза*, обладает большей энтропией, чем упорядоченное, и поэтому его возникновение более предпочтительно.

В целом так себя ведет и природа, не только колода карт. Представьте, как вода в виде льда (твердое состояние) тает и превращается в жидкость благодаря теплу, получаемому из окружающей среды, а затем – в пар (газ) благодаря дальнейшему

сообщению тепла. В каждой из последовательных фаз добавление тепла приводит к росту скорости молекул воды. В твердом веществе молекулы воды фактически не двигаются. Как только лед начинает таять, молекулы воды приходят в движение, по мере перехода в жидкое состояние их скорость возрастает. Наконец, с добавлением еще большего тепла молекулы воды переходят от покачивающихся движений к прямым столкновениям друг с другом, и вещество переходит в состояние газа. Увеличение активности движения от твердого, жидкого и до газообразного состояния приводит к увеличению количества микросостояний для каждой из последовательных фаз. Следовательно, как и для колоды карт, – большее количество микросостояний означает бо2льшую энтропию.

Часто рост скорости молекул соотносят с увеличением неупорядоченности системы. Твердое агрегатное состояние является наиболее упорядоченным, а состояние газа – наиболее неупорядоченным. Такое понимание тем удобнее, что также хорошо согласуется с нашей аналогией с колодой карт. Однако оно не учитывает физическое явление, происходящее с далеко идущими последствиями: добавление энергии в форме тепла (q) позволило системе увеличить количество микросостояний (тем самым сменяя фазы в нашем примере выше). Фактически, если мы обозначим изменение (в нашем случае рост) энтропии как ΔS , мы можем записать формулу

$$\Delta S = \frac{\Delta q}{T} ,$$

отражающую термодинамические процессы, которые мы наблюдали ранее.

Во времена Больцмана идея, что вещество состоит из малых невидимых частиц, которые сегодня мы называем атомами, еще не была главенствующей. Нетрудно представить, что теории Больцмана, предполагавшие их существование, могли встретиться с некоторым сопротивлением. Больцмана жестко критиковали, но он отказывался отступать. В 1898 году Больцман опубликовал второй том «Лекций по теории газа». Так что мы можем получить представление, насколько стойко он был убежден в существовании атомов:

«По-моему, это была бы большая трагедия для науки, если бы [кинетическая] теория газов была предана забвению из-за сиюминутного враждебного отношения... Я понимаю, что я всего лишь отдельный человек, бессильно сражающийся с духом времени. И все равно в моих силах сделать такой вклад, что, когда [кинетическую] теорию газов возродят к жизни, заново придется открывать не так уж много».

Среди самых ярых противников Больцмана был Фридрих Вильгельм Оствальд (1853–1932). Он был противником всех теорий химии и физики, которые подразумевали существование атомов, особенно кинетической теории газов. Для Оствальда объединяющей научной концепцией была энергия. Он считал энтропию распадом энергии (что было близко к концепции Томсона), не имевшим ничего общего с движением атомов и микросостоянием систем. Оствальд считал атомы артефактами математической теории, а не проявлениями физической реальности.

Другой противник атомной теории Эрнст Мах (1838–1916) не подписался бы и под объединяющим концептом энергии, который защищал Оствальд. Мах просто не мог принять идею существования атомов, потому что не видел доказательств в пользу их существования. С оглядкой на микроскопическую интерпретацию энтропии у Больцмана Мах писал: «По моему мнению, корни этой теоремы [об энтропии] лежат гораздо глубже, и если привести в соответствие молекулярную [атомную] гипотезу и теорему об энтропии, это было бы удачей для гипотезы, но не для теоремы об энтропии».

Летом 1905 года Больцман читал серию лекций в Калифорнийском университете в Беркли. Он был на пике славы. Студенты стремились попасть на его лекции, а коллеги искали его научного совета. По возвращении в Вену (не имея понятия о работе Эйнштейна 1905 года) Больцман описал свое путешествие в книге «Путешествие одного немецкого профессора в Эльдorado»^[98].

В начале 1906 года Больцман был в отпуске со своей женой и дочерью недалеко от побережья итальянского города Триест. В очередной раз борясь с депрессией, Больцман повесился на оконной раме, пока женщины были на пляже. Вернувшись, его дочь обнаружила его мертвым. Людвиг Больцман похоронен на Центральном кладбище его родного города Вены. На его могильной

плите написано выражение для энтропии через число микросостояний системы:

$$S = k \ln W,$$

где S – это полная энергия системы, k – постоянная Больцмана^[99], а W – общее число микросостояний, соответствующих данному макросостоянию системы.

За гранью тепловых двигателей

Когда мы говорим об энтропии, мы рассматриваем два взаимодополняющих варианта ее истолкования: *термодинамику* и *статистическую механику*. Первоначальное описание энтропии было чисто термодинамическим и пришло из работ Клаузиуса. Он обнаружил, что при работе обратимого теплового двигателя Карно возникает очень интересная величина: «отношение тепла к температуре». Спустя одиннадцать лет он стал называть эту удивительную величину энтропией. Главным результатом наблюдений Клаузиуса стало понимание того, что в необратимых процессах всегда растет уровень энтропии.

Нас интересуют необратимые процессы, поскольку мы каждый день сталкиваемся с ними. Они необратимы без совершения какой-либо определенной работы. Упавший на пол и разбившийся стакан – необратимый процесс: в этом случае из-за того, что он разбился, выросла энтропия, и стакан не станет вдруг целым без приложения работы с нашей стороны – например, склеивания осколков – и даже если вы его склеите, не вернется в первоначальное состояние. Более того, стакан был разбит *спонтанно*^[100]. Это значит, что, кроме небольшой работы, которая понадобилась, чтобы привести его в движение (вероятно, столкнуть с кухонного стола), весь процесс полностью прошел без вашего участия. Таким образом, мы видим, что растущая энтропия отображает «предпочтительное направление» процессов, протекающих в природе. Если мы видим разбитое стекло, то мы все понимаем, что в какой-то момент прошлого оно было целым. Иными словами, в некий момент энтропия стекла была меньше, чем сейчас. Следовательно, похоже, что энтропия связана со временем, или со *стрелой времени*.

Первое начало сообщает нам, что энергия всегда сохраняется, просто переходит из одной формы в другую, а второе начало говорит, что энтропия не сохраняется, но стремится к максимуму. В самом деле, похоже, что природа постоянно порождает энтропию. Неважно, насколько эффективно какое-либо устройство – оно тоже будет создавать энтропию. Это закон природы.

Когда вы едете на машине, двигатель выделяет тепло в окружающую среду, потому что этого требуют законы природы (это компенсация, которую требует природа за то, что вы пользуетесь автомобилем). Поэтому невозможно использовать абсолютно все топливо (энергию) для работы. Более того, будет возникать дополнительная потеря тепла из-за разного рода трений внутри двигателя вашего автомобиля. И поскольку, согласно Клаузиусу, энтропия – это «отношение тепла к температуре», природа снова нашла способ приблизить ее значение к максимуму.

Хотя определение энтропии у Клаузиуса достаточно точное, оно не является полным. Клаузиус пытался объяснить энтропию с точки зрения микроскопических частиц, молекул и атомов, но его попытки были безуспешными. Максвелл же сделал первые шаги в этом направлении. Он продемонстрировал, что атомы газа двигаются на разных скоростях, ограниченных определенным диапазоном, или распределением. По сути, скорость атомов в этом диапазоне такова, что малое их количество перемещается быстрее или медленнее основной массы, которая движется со средней скоростью. Это был первый случай, когда статистический подход использовали для описания физических свойств системы. Более того, он избавлял от устрашающей и со всех практических точек зрения невыполнимой задачи учитывать все столкновения внутри системы атомов газа.

Ранее мы говорили, что при комнатной температуре и давлении шар, наполненный гелием, содержит приблизительно 10^{23} атомов, которые двигаются со средней скоростью около 4 500 км/ч, при этом отдельный атом сталкивается миллиарды раз в секунду с другими атомами. Как вообще можно надеяться точно учесть все это?

Максвелл продемонстрировал, что это и не нужно, таким образом открыв дорогу Больцману. Тот показал, что подход Максвелла применим не только к скорости атомов или их кинетической энергии, но и к общей энергии системы в распределении Больцмана. Это решение стало революционным.

Применяя распределение Больцмана, можно рассчитать множество наблюдаемых свойств системы. Таким образом, хотя мы и не видим атомы и молекулы, теория Больцмана основывается на их существовании, благодаря которому мы наблюдаем видимые свойства объекта. Однако во времена Больцмана существование молекул и

атомов все еще было предметом жарких споров, и он постоянно защищал свою теорию.

Сегодня мы принимаем как данность, что вещество состоит из атомов и молекул. Тем не менее история атома, как и теорий и экспериментов, благодаря которым он был открыт, – поистине увлекательное повествование и тема для части 3.

Часть 3

Частицы: атомы

Глава 9

Предположения об атомах

Размышления о мироустройстве приводят к открытию атомов

...мы обнаруживаем, что две молекулы [или атома] одного вида, например водорода, обладают одинаковыми свойствами, хотя одна содержалась в угле и хранилась неведомо сколько в толще земной породы, а другая – была «заперта» в железном метеорите и после неизвестных странствий по небесам упала в руки земного химика.

*Джеймс Клерк Максвелл,
шотландский физик (1831–1879)*

Древнегреческие философы сыграли значительную роль в формировании начальной теории об атомах. Несколько древних философов создали теорию материи, одна из которых даже предполагала существование фундаментальных строительных блоков, из которых были сделаны не только живые существа и неживые предметы, но и сверхъестественные. Тем не менее их рассуждения были скорее умозрительными и философскими, нежели научными. И хотя они попытались объяснить природу материи и ее состав, их реальная цель состояла в том, чтобы донести до древних греков нечто, глубоко беспокоившее их: природу постоянства и изменений. К сожалению, эти «теории» материи прожили недолго. Хотя был новый всплеск в Средние века и Ренессанс, только в XVII веке они получили новый импульс.

Постоянство и перемены

Греческий философ Гераклит (ок. 540–475 до н. э.) был уроженцем греческого города Эфес, расположенного на побережье Малой Азии (современной Турции). Мы знаем о Гераклите главным образом из уцелевших фрагментов работ Платона и Аристотеля, где его цитируют для опровержения, а также из работ Диогена Лаэртского (ок. III века), который писал биографии греческих философов и рассказал о жизни Гераклита в целом.

Гераклит был пессимистом и во многом презирал человечество. Он высмеял Гомера^[101], которого, как он заявлял, нужно было выпороть и прогнать, и был в плохих отношениях со многими известными умами того времени, такими как Пифагор^[102] (ок. 560–480 до н. э.) и Ксенофонт^[103] (ок. 570–480 до н. э.). О своих согражданах из Эфеса он говорил так: «Будет замечательно, если они повесятся все до единого и оставят город своим детям».

Гераклит представлял себе Вселенную как систему, находящуюся в постоянном изменении, где ничто не остается прежним даже на малейший момент времени (он даже заявлял, что и Солнце новое каждый день). Эта доктрина постоянного изменения^[104] подразумевает, например, что невозможно прикоснуться к одному и тому же объекту дважды; вы можете прикоснуться к объекту, но к тому времени, когда вы сделаете это снова, его состояние уже изменится, как утверждал Гераклит. Однако идея, что все меняется, странна и противоречит нашему восприятию, которое говорит нам, что некоторые вещи, кажется, сохраняют своего рода постоянство.

Вот как Гераклит описывает «постоянство»: хотя река кажется вам чем-то цельным и постоянным, вода в ней находится в непрерывном движении, и таким образом река постоянно меняется^[105]. Интересно отметить, что теория Гераклита относительно постоянного изменения не далека от действительности. Вообразите стакан воды, стоящий на вашем кухонном столе. Предположим, что на всем протяжении дня вы обращаете внимание на этот стакан воды несколько раз, и, конечно, в нем визуально ничего не меняется. По большей части, с *макроскопической* точки зрения, стакан воды – тот же. У него та же

температура, объем и количество молекул воды^[106] каждый раз, когда вы обращаете на него внимание.

Однако с *микроскопической* точки зрения стакан постоянно изменялся. Молекулы воды в стакане находятся в постоянном движении. Безусловно, Гераклит не знал об атомах и молекулах, и поэтому этот пример просто не мог привести. Хотя Гераклит и не верил в атомы, он верил в то, что материя состоит из основополагающих строительных блоков, которые он называл «элементы».

Гераклит верил, что существует три главных элемента: земля, воздух и огонь. Среди них огонь он считал «первичным элементом». Выбор огня в качестве основного элемента был проделан им в том же духе, что и рассмотрение вышеупомянутой реки. Если смотреть на огонь, легко представить, что он неизменен, так как пламя горит без каких-либо существенных признаков изменений. Однако в действительности огонь изменяется в силу постоянного потребления самого топлива, необходимого для поддержания пламени. Таким образом, согласно Гераклиту, огонь является источником всех других элементов: «Все вещи превращаются в Огонь и Огонь – во все вещи...» Более того, в то время как все во Вселенной находится в состоянии постоянных изменений, сама Вселенная вечна. Он говорит: «всегда был, есть и будет существовать вечно живой Огонь»...^[107] В то время как Гераклит считал, что Вселенная находится в постоянном состоянии перемен, Парменид заявлял о прямо обратном.

Греческий философ Парменид (ок. 515–450 до н. э.) родился в богатой и известной семье в греческом городе Элее, на южном побережье современной Италии. Он был основателем Элейской школы, и его самым знаменитым учеником был Зенон (ок. 490–425 до н. э.), в чьих работах, возможно, впервые применялся метод *доведения до абсурда*^[108]. Парменид сильно повлиял на других философов, особенно на Платона, который по достоинству оценивал талант Парменида и даже написал диалог, названный в честь него. Действительно, «Теорию идей»^[109] Платон, возможно, написал под влиянием Парменида. К сожалению, уцелело всего лишь одно произведение Парменида – поэма «О природе», в которой он формулирует свою философию.

В первой части поэмы, «Пути истины», Парменид говорит нам, что Вселенная неизменна, и то что мы считаем изменением – всего лишь иллюзия. Часть противоречий между Гераклитом и Парменидом является результатом того, что Гераклит безоговорочно верил в чувства, тогда как Парменид настаивал, что именно наши чувственные ощущения вводит нас в заблуждение. Для Парменида просто сам факт размышления о чем-либо уже означал, что оно существует: «В действительности существует только то, о чем вы можете думать».

Сущность теории Парменида, опровергающей перемены, такова: каждый раз, когда вы думаете о чем-то или говорите о чем-то, ваши слова или мысли должны относиться к чему-то, что существует на самом деле. Другими словами, для того чтобы мысли были постижимыми, а язык осмысленным, и то и другое требует существования объектов за их пределами. Теперь, так как в любой момент вы можете думать или говорить о чем-либо, все это должно существовать все время. Поэтому не существует перемен, так как изменение требует, чтобы что-то начало существовать или прекратило существование.

Так что, согласно Пармениду, если что-либо существует, оно существует всегда и поэтому не имеет ни начала, ни конца, что делает его в каком-то смысле бесконечным. Кроме того, если вы оспариваете возможность бесконечности более чем одной вещи (бесконечность – уникальное состояние), Парменид возразит вам своим вторым выводом: все существующие вещи объединены в «Одно целое». Парменид был строгим монистом.

Если вам трудно понять логику Парменида, поверьте, вы не одиноки. За мыслью в его оригинальном тексте трудно уследить, и всем мы в долгу у тех, кто эти мысли прояснил. Кроме того, сегодня мы согласимся с тем, что логика Парменида была необоснованной. Парменид, в отличие от Гераклита, верил, что любое изменение – всего лишь иллюзия, которую создают наши органы чувств, а сама Вселенная неизменна. Кроме того, он полагал, что Вселенная объединена общим существованием. Наконец, потратьте еще одну минуту, чтобы осознать, что Парменид настаивал, будто наши чувства являются всего лишь инструментами обмана и какое-либо понимание мироустройства с помощью экспериментальной науки невозможно.

Эти основные моменты теорий Парменида и Гераклита оказали огромное влияние на многих философов, в особенности на тех, кто занимался вопросами материи. Главная цель этих теоретиков древности состояла в том, чтобы объединить разрозненные доктрины Парменида и Гераклита, а не создать полную физическую теорию о материи. Тем не менее в этих первоначальных работах мы находим начала атомной теории, которая была весьма схожа с ее современной версией.

Древние теории материи

Первые атомные теории рассматривали «основной элемент», из которого состояла вся остальная материя. Гераклит считал таким элементом огонь, Фалес из Милета (ок. 624–546 до н. э.) – воду, Анаксимен (ок. 585–528 до н. э.) – воздух^[110], а Эмпедокл объединил эти теории, заявив, что все четыре элемента являются основными. Позже Аристотель заимствовал эту теорию, и в его прочтении она существовала до XVII века.

Родившийся в Акрагасе, на территории современной Сицилии, Эмпедокл (ок. 492–432 до н. э.) был интересной личностью: его описывают как философа, пророка, целителя, политика-демократа, мистика, шарлатана, мошенника и ученого. Его основным вкладом в физику стала теория четырех элементов.

Эти фундаментальные элементы, которые он называл корнями, объединяясь в различном количестве, формируют всю остальную материю: растения, животных, людей, камни – все. И хотя элементы смешиваются друг с другом, чтобы сформировать другие вещи, они все еще сохраняют свои личные особенности. Действительно, Эмпедокл воображал эти четыре элемента неизменными, вечными и неразрушимыми. Эмпедокл верил в вечные метафизические силы: Любовь и Борьбу. Любовь была ответственна за объединение элементов в процессе создания, тогда как противостоящая сила Борьбы отвечала за разделение элементов, в конечном счете приводя к распаду. Космическое сражение между Любовью и Борьбой представляло естественный цикл изменений во Вселенной; Любовь создавала вещи, а Борьба уничтожала их. Они боролись друг против друга, и каждый пытался получить господство над другим.

В теории Эмпедокла мы ясно видим концепт изменяющейся Вселенной, подобно тому, как ее описывал Гераклит, хотя там, где Гераклит верил только в Борьбу, Эмпедокл добавил в свою теорию Любовь – ее космическую противоположность. Вероятно, менее понятно, что Эмпедокл также отчасти использовал доктрину Парменида. В то время как он не верил в неизменную Вселенную, как того требовала теория Парменида, он считал неизменными фундаментальные элементы. Безусловно, это было преднамеренной

попыткой совместить противоборствующие доктрины Гераклита и Парменида, и не один Эмпедокл пытался сделать это. Тем не менее он отказался от монистической теории Парменида в пользу теории четырех элементов (корней) и двух сил. Современником Эмпедокла и теоретиком строения материи был Анаксагор.

Анаксагор (ок. 500–428 до н. э.) родился в городе Клазомены в Ионии (современная Турция). Он был первым человеком, принесшим философию в Афины (скорее всего, его убедил приехать Перикл (ок. 495–429 до н. э.), его ученик), и провел там тридцать лет, но в конечном счете уехал. Похоже, его учение о Земле, Солнце и Луне^[111] доставило ему проблемы (по-видимому, Галилео не был первым человеком с такой судьбой). Анаксагор нарушил закон, запрещающий тем, кто не исповедовал религию, преподавать теории о небесных телах. Его обвинили в неуважении. Решив не дожидаться приговора, он с помощью Перикла покинул Афины и уехал в Лампсак (в Малой Азии), где и остался до конца жизни.

Как и Эмпедокл, Анаксагор попытался опровергнуть теорию неизменного мира Парменида, выступая сторонником идеи о непрерывном изменении, которое мы ощущаем ежедневно. Но, хотя Эмпедокл считал воздух, землю, огонь и воду фундаментальными «кирпичиками», из которых состоит все сущее, Анаксагор, не видя причин для такой дискриминации^[112], заявил, что таких «кирпичиков» бесконечно много.

Для Анаксагора такие вещи, как кость, кожа и волосы, так же были фундаментальными элементами, как у Эмпедокла – воздух, земля, огонь и вода, и таким образом не было никакой причины выбрать одни в пользу других. Так что он решил не выбирать, но считал, что «часть всего есть во всем». Неизвестно наверняка, но возможно, что он пришел к этой теории, изучая процесс питания. Анаксагор отметил, что еда – источник питания животных, благодаря которому у них растут волосы и заживают раны на коже. Он пришел к заключению, что в составе еды есть частицы волос и кожи, что объясняет эти эффекты.

Кроме того, Анаксагор полагал, что материя является бесконечно делимой. Таким образом, если делить волос на части снова и снова, все они будут содержать часть волос. Он говорит: «Всегда существует часть, меньшая чем предыдущая. Но также и для большого всегда есть

большее, состоящего из меньшего. Но относительно себя, каждая часть и большая, и меньшая»^[113].

Однако, вопреки этому, Анаксагор рассматривал эти компоненты материи, часто называемые «семенами» или «материалами», как вечные и неразрушимые, хотя и более свободно, чем Эмпедокл. Это все еще вызывает вопрос: если все на свете состоит из одних и тех же элементов (хотя и в разных пропорциях), тогда из чего состоят сами элементы? Вот что говорит об этом Анаксагор: «всякая вещь является тем, из чего она состоит в большей части». Другими словами, что-то является собой, потому что оно содержит большую часть этого «материала». Если быть более точным, нечто кажется чем-то в *макроскопическом* плане, потому что содержит большую часть того «материала» на *микроскопическом* уровне.

Таким образом, мы видим и в теории Эмпедокла, и в теории Анаксагора попытку создать понятную теорию о материи. Каждый пытался объединить идеи, которые будут объяснять изменяющийся мир, в котором мы живем, учитывая, что некоторые компоненты мироустройства – фундаментальны и неизменны. В итоге каждый по-своему пытался соединить теории Гераклита и Парменида.

Сегодня их идеи могут казаться нам странными и метафизическими, но все же можно найти между ними и современной атомной теорией сходства. Возможно, лучшая тому иллюстрация – теория, выдвинутая Демокритом, который является, несомненно, самым видным древнегреческим атомным теоретиком.

Атом Демокрита

Демокрит (460–370 до н. э.) был уроженцем Абдер, города во Фракии, расположенного на территории современной Греции. Он много путешествовал, возможно, бывал в Египте и Персии. Также он был и в Афинах: «Я отправился в Афины, и никто не знал меня».

Действительно, Демокрит как будто бы так и не вписался в интеллектуальную элиту Афин, и его идеями некоторое время пренебрегали. Тем не менее благодаря своим богатым знаниям и острому мышлению он занял заслуженное место в истории философии. По современным меркам, он был, возможно, самым успешным из древнегреческих философов благодаря знаменательной точности идей. Например, он понял, что Млечный путь – собрание крошечных звезд, а на Луне есть горы и долины, и она похожа на Землю. Независимо от этого мы знаем его, прежде всего, по атомной теории.

Демокрит был учеником Левкиппа (V век до н. э.), у которого была собственная атомистическая теория. На самом деле, распутать атомные теории Демокрита и Левкиппа трудно. Главным образом потому, что мы знаем очень мало о Левкиппе, и даже есть предположение, что он никогда на самом деле не существовал, хотя это кажется маловероятным, поскольку Аристотель и Теофраст (ок. 371–287 до н. э.) точно упоминали его атомистическую теорию. Наиболее вероятно, что Левкипп установил некоторые основные принципы, и Демокрит опирался на них, расширяя теорию в целом.

Демокрит полагает, что все во Вселенной – включая человеческий разум и душу^[114], и даже богов – состоит из *atomos* (греческое слово, обозначающее *неделимое*, от него произошло слово «*атом*»). Демокрит считал атомы неделимыми (противопоставьте это теории Анаксагора, который полагал, что фундаментальные частицы бесконечно делимы). Он предположил, что атомы существуют во множестве различных форм и размеров, которые определяют свойства объектов, из которых они состоят. Кроме того, он полагал, что атомы неизменны, вечны и неразрушимы, подобно тому как Эмпедокл определил четыре основных элемента.

Демокрит считал, что материальные объекты существуют во временном состоянии, создаваясь или разрушаясь, когда атомы объединяются или распадаются под влиянием естественных сил; все, что остается в итоге, – атомы, составляющие материальные объекты. Это схоже с теорией Эмпедокла, в которой он описывает четыре элемента, дающие начало материальным объектам под влиянием Любви и Борьбы. Кроме того, Демокрит также считал, что атомы способны двигаться.

Демокрит представлял атомы постоянно находящимися в движении, постоянно сталкивающимися друг с другом. Кроме того, это движение было их фундаментальной особенностью и, как сами атомы, вечным и нерушимым, хотя и способным изменяться при определенных обстоятельствах^[115].

Чтобы атомы находились в движении, должно быть пространство для их движения, и таким образом Демокрит изобрел *пустоту*. Согласно Демокриту, атомы движутся в пустоте с постоянным случайным движением (он сравнил движение атомов с частицами пыли, которые можно увидеть танцующими на солнечном свете, когда нет ветра). Это во многом похоже на то, как мы представляем их сегодня, что описывает современная кинетическая теория.

Вспомните, что в философии Парменида материальные вещи существуют, потому что мы в состоянии думать о них. Он также считает невозможным думать ни о чем, и поэтому оно не может существовать. Таким образом, может казаться, что пустота Демокрита игнорирует этот принцип, так как она кажется ничем. Однако Демокрит рассматривал пустоту как место, независимое от атомов, где атомы могут находиться и перемещаться. Настоящая проблема состоит в том, что Парменид мог вообразить как что-то существующее в действительности только материальные объекты, тогда как Демокрит смог вообразить и материальный объект (атом), и пространство, в котором он находится. Демокрит однозначно говорит об этом: «Не существует ничего, кроме атомов и пустого места; все остальное – мнение».

Демокрит учел теории и Парменида, и Гераклита, так же как их учили Эмпедокл и Анаксагор, предположив, что Вселенная состоит из бесконечного числа неизменных, вечных и неразрушимых атомов, в случайном порядке сталкивающихся друг с другом и способных к

смещению, за счет которого формируются материальные объекты, какими мы их знаем.

Кроме сходства с современной атомной теорией, теория Демокрита предлагает «механическое объяснение» материи: материя состоит из атомов, которые перемещаются в пустоте и сталкиваются друг с другом (при этом одни столкновения вызывают другие) благодаря определенным законам природы.

Он не связывает божественный замысел и движение атомов, но просто заявляет, что атомы всегда были и будут в движении, а физические законы описывают это движение. Красота такой конструкции состоит в том, что она позволяет дать ей научное описание. Таким образом, можно надеяться разработать математическую теорию, описывающую физические законы, и затем с помощью экспериментов ее проверить.

Очевидно, Демокриту не были доступны ни необходимые математические расчеты, ни эксперименты. Кроме того, теории Демокрита угрожал кое-кто еще – а именно Аристотель^[116], который мешал развитию теории Демокрита. В своих работах он явно упоминал атомную теорию^[117] Демокрита, но лишь для критики. Иронично, но именно таким образом мы и получили большую часть имеющихся знаний о теории Демокрита.

Почему Аристотель?

Аристотель (384–322 до н. э.) родился в Стагире, в Греции. Его отец был придворным врачом царя Македонии. Эта должность перешла к нему по наследству. Аристотель учился у Платона (427 до н. э. – ок. 347 до н. э.) в Афинах с восемнадцати лет и провел там следующие двадцать лет жизни, до смерти Платона. В 343 году до н. э. Аристотель стал учителем Александра Великого, которому тогда было тринадцать лет, и учил его три года, пока отец Александра не назначил того регентом в Пелле^[118].

Труды Аристотеля стали первой всесторонней системой западной философии, затрагивавшей темы политики, этики, логики, метафизики и науки. Едва ли была область знаний, о которой он не писал^[119]. Он верил, что человеческие знания невозможно уложить в одно понятие.

Аристотель стал первым, кто разделил их на категории. Здесь мы будем останавливаться на Аристотелевой теории материи и формы.

Так же, как и другие, Аристотель стремился ответить на вызов теории Парменида о постоянстве, оставляя при этом возможность перемен в мире, как того требовал Гераклит^[120]; его теория материи и формы – попытка примирить их. Согласно Аристотелю, объекты, как мы их видим, состоят из двух частей: «материи» и «формы». Форма дает конкретную схему материи, и именно благодаря форме мы идентифицируем объект как «вещь»; знать вещь означает знать ее форму.

Например, представьте, что скульптор начинает с комка глины и делает из него собаку. Здесь глина – материя, а собака – форма, которую придал глине скульптор. Теперь представьте, что скульптор снова начинает превращать кусок глины, прежде имевший форму собаки, в нечто другое, например кошку. Конечно, материя – все еще глина, но теперь форма изменилась: была собака, стала – кошка. Однако скульптор не создает форму; она существовала всегда. Вместо этого скульптор объединяет форму и материю. Согласно Аристотелю, изменение происходит за счет изменения формы материи.

Кроме того, Аристотель считает, что этот процесс обусловлен четырьмя причинами: материальной, формальной, движущей и целевой. Эти первоначала управляют тем, как создается материальный объект. Мы можем понять их, задав четыре вопроса: «Из какого материала сделан объект? Что это за объект? Как был создан объект? Какова цель этого объекта?» Самый важный из них – последний, известный как целевая причина. В самом деле, если бы в философии Аристотеля имелся какой-то один основополагающий принцип, то это был бы вопрос, связанный с целевой причиной^[121].

Именно целевая причина дает материи определенную цель, когда она сменяет различные формы. Таким образом, теория Аристотеля о материи и форме пытается объединить на вид разрозненные идеи об изменении и постоянстве. С теорией Аристотеля о форме и материи связаны понятия «возможного» и «действительного». Опять-таки, представьте скульптора и глину. Когда глина была просто материалом на рабочем месте скульптора, у нее была возможность, среди прочего, принять форму собаки или кошки. Но глина благодаря усилиям скульптора приобрела форму, усиливая действительное. Таким

образом, чем больше форм что-то может иметь, тем больше его действительное. Аристотель также включил эти принципы в свое миропонимание, где его версия Бога была изображена как совершенство, состоящее из чистой формы и действительного^[122].

Работы Аристотеля были вновь открыты после падения Римской империи под ударами арабской цивилизации, правившей в регионе от Персии до Испании. Среди арабов были мусульманские и еврейские ученые, которые перевели работы Аристотеля (и фактически все важные работы греческой, а также персидской и индийской культур) на арабский язык. Средневековые христиане приобретали эти переведенные работы, к 1100-м годам начиная брать под контроль Толедо (Испания) и Лиссабон (Португалия).

Мусульманские и еврейские ученые включали приложения к оригинальным работам. Таким образом, мало того что они переводили оригинальные работы с греческого языка на арабский, они также доработали идеи, которые древние греки оставили незаконченными. Это произошло в самое подходящее для христианских ученых время, потому что к середине XII века они уже начинали задаваться вопросом об отношениях между Богом и, в общем-то, всем остальным. Именно Аристотель обеспечил им то понимание, которое они искали, – благодаря работам, переведенным с арабского языка на латынь^[123].

Вероятно, христианские ученые выделяли Аристотеля среди других древнегреческих философов по нескольким причинам. С одной стороны, он создал целостную систему философии, которая включила в себя практически все. Его работы были написаны в академическом стиле, но все же были доступны широкой аудитории, сохраняя достаточную примесь здравого смысла. Здравый смысл Аристотеля проистекал частично из того, что он во многом был эмпириком – тогда как Демокрит был скорее теоретиком и мыслителем, Аристотель был более наблюдательным; он наблюдал природу и полагал, что таким образом мы можем получить от мира полезную информацию. Наконец, видение бога у Аристотеля хотя и не относилось к христианскому богу, очевидно, достаточно подходило в качестве точки отсчета, чтобы его можно было включить в новую версию христианства того времени. Главным образом этому способствовал св. Фома Аквинский (1225–1274).

Однажды успешно усвоенный христианством (и с учетом того, что ранние европейские университеты были связаны с христианской церковью), Аристотель стал авторитетом во всех областях науки и оставался им примерно до XVII века. Таким образом, у работ Демокрита действительно не было шанса на успех по этим и некоторым другим причинам^[124]. Тем не менее XVII век изменит это, поскольку ученые начнут стремиться понять мир более системно (механистически, или механически) при помощи новых инструментов, доступных им благодаря быстро развивающимся физике и математике.

Глава 10

Две новые философии

Рациональный взгляд на природу против духовного

Семнадцатый век был революционным для математики и физических наук. В это время появились многочисленные мощные методы в математике, которые также обеспечивали новые, не доступные прежде подходы к решению проблем физики. Эти инструменты дополняли новую *механическую философию*, предлагавшую систематическое представление о мире, освободившемся от вмешательства бога и работающем по основополагающим законам, установленным природой и понятным человеку.

Конкурентом, или, возможно, дополнительной «философией» наряду с механической философией, была *алхимия*. Благодаря метафизическим и духовным догмам она и препятствовала, и продвигала начала экспериментальной химии. Когда алхимия исчезла, экспериментальная химия продолжила развиваться, став зрелой наукой, которая признала атом как концептуально необходимое понятие, но все еще отказывалась полностью охватить его как физический объект.

«Завершение» Аристотеля

Теория Аристотеля о материи, как и все остальные его мысли, стала догмой. Однако это не остановило постоянно увеличивавшийся поток критики. Помните, Аристотель думал, что объект состоит из двух частей, материи и формы, которые сосуществовали в объекте, тем самым создавая его. Они не только давали форму объекту, но также и определяли его физические и химические свойства.

Проблема здесь вот в чем: независимо от объекта и его особенностей, каждый вынужден прийти к заключению, что субъект обладает определенными свойствами просто по той причине, что они

заложены в него изначально. Так почему же тогда небо «голубое»? Оно «голубое», поскольку это врожденная часть его формы. Почему золото блестит? Потому что «блеск» – часть его формы. Вы видите здесь проблему? Мы останавливаемся на том, что ничего не узнаем об основных принципах или механизмах, которые действительно управляют свойствами рассматриваемого объекта.

Атомная теория Демокрита значительно пострадала от критических замечаний Аристотеля, но не была забыта полностью. Наоборот, в эпоху Средневековья^[125] атомные теории Демокрита и Эпикура (341 – ок. 270 до н. э.)^[126] были известны и вызывали определенный интерес даже тогда.

Более того, во время итальянского Ренессанса^[127] произошел скачок благодаря открытию Поджо Браччолини (1380–1459)^[128] в 1417 году единственной уцелевшей рукописи большой работы *De Rerum Natura* («О Природе вещей») римского поэта Лукреция (99–55 до н. э.).

Лукреций был современником Юлия Цезаря (100–44 до н. э.) и Цицерона (106–43 до н. э.). Он полагал, что атомы – чрезвычайно мелкие частицы материи, имеющие те же свойства, что и вещество, частью которого они были. Его взглядов придерживались приблизительно до XIX века, когда выяснилось, что у атомов есть некоторые уникальные свойства, отличающие их от самого вещества, например электрический заряд. Сегодня мы знаем, что *объемные свойства* предметов зависят от большого количества атомов, составляющих вещество данного объекта, и, таким образом, свойства единственного атома не определяют его объемные свойства.

Поэма Лукреция, в которой ярко описаны работы Демокрита, Левкиппа и Эпикура, была очень популярной в XV и XVI веках и как художественная, и как философская работа. Работа Диогена Лаэртского, которого не принимали во внимание в Средневековье, вновь получила популярность, особенно десятая книга «Жизни философов». Эта работа имела особое значение для развития атомных теорий и включала три письма Эпикура (*письмо Геродоту*^[129] было самым важным из них) в дополнение к жизнеописанию Эпикура.

В течение XVI века понятие атома рассматривали в физических и философских теориях. К середине XVI века идея, что вещество может действительно состоять из атомов, получала все более широкое распространение. Вот что говорил об этом Николай Коперник^[130]:

«Это крошечные, незаметные, неделимые частицы, называемые атомами. Сами по себе они незаметны, и если два или несколько атомов отделить от объекта, то они не сформируют мгновенно видимое тело, но их можно умножать, пока они не соединятся, чтобы сформировать общую массу». Однако именно XVII веку случилось увидеть полное переосмысление древних теорий материи.

XVII век был временем значимых достижений в математике и физике, которые дали ученым инструменты, чтобы те могли получше взглянуть на многие нерешенные физические проблемы, например о настоящей природе вещества, что выдвинуло ранние атомные теории, особенно Демокрита, на первый план. Атомная теория Демокрита, даже при всех ее недостатках, все еще предлагала «механическое» объяснение материи: материя состоит из атомов, находящихся в движении, которым управляют определенные (тогда неизвестные) физические законы, и сами атомы определяют физические и химические свойства рассматриваемого объекта.

Для ученых XVII века эта картина вещества была более привлекательной, чем доктрина Аристотеля о материи и форме (в конечном счете ее начали высмеивать), потому что она определила фундаментальные особенности, которые можно было использовать в экспериментах и теоретически глубже понять законы природы. Таким образом, природу рассматривали как своего рода великую «машину», состоящую из определенных «деталей», которые работают только по физическим законам (а не по велению некоей вселенской силы). На самом деле в XVII веке законы природы часто сравнивали с механическими часами, как метко сформулировал Роберт Бойль (1627–1691):

«Несколько частей, из которых состоит этот любопытный двигатель, устроены и подогнаны таким образом, что они приводят в движение множество шестеренок и деталей, двигаются несколькими способами, и все это без знаний и плана; и при этом каждая из них отлично выполняет свою роль для разных целей, ради которых ее создали, так размеренно и равномерно, как будто она знает это и беспокоится о выполнении своего долга».

Это новое представление о природе как механизме для ученого XVII века было существенным шагом вперед, к свободе от доктрины Аристотеля. Оно утверждало потрясающую веру в то, что каждый

может систематически познавать явления природы вместо того, чтобы искать прибежища у неопределенных объяснений о скрытой цели, врожденных качествах или тайных силах, управляющих этими процессами. Этот новый способ познания природы называли *механистической философией*.

Мировая машина

В очень ярком эпизоде из «Мира» (написанного между 1629 и 1633 годами) ^[131]Рене Декарт (1596–1650) поясняет, что он – сторонник механистической философии и считает аристотелевское понятие формы и связанных с нею качеств неспособным объяснить физические явления:

«Если вы находите странным, что я не использую качества, которые называют теплом, холодом, влажностью и сухостью..., как делают различные философы, я говорю вам: эти качества, как мне кажется, нуждаются в объяснении, и, если я не ошибаюсь, не только эти четыре качества, но также и все другие – и даже все формы неодушевленных предметов могут быть объяснены без иных предположений об их материи, кроме движения, размера, формы и расположения их частей».

Несомненно, как и многие его современники, Декарт придерживался механистической философии во многом из-за желания опровергнуть философию Аристотеля. Декарт ссылаясь на механизмы в моделях, которыми он объяснял поведение мира. На самом деле для него не было никакого принципиального отличия между рукотворными механизмами и законами природы: «Нет никакой разницы между машинами, созданными людьми, и разнообразными предметами, которые создает сама природа».

Единственным исключением в идеях Декарта был тот факт, что детали искусственных машин должны быть достаточно большими, чтобы их можно было видеть и работать с ними, тогда как «детали», из которых состоит природа, могут быть очень маленькими – невидимыми для нас. Как мы узнали из части 1, Декарт утверждал, что «движение» в природе сохраняется ^[132]. Так что для Декарта, даже если Бог когда-то привел в движение все, например планеты, то после, чтобы мировая машина продолжала работать, он не нужен ^[133].

Таким образом, Бога представляли как архитектора и создателя «мировой машины», и эта машина, когда-то приведенная в движение, всегда будет работать без вмешательства Бога. Эта идея привлекла многих ученых XVII века, потому что теперь природа должна была поддаваться описанию с помощью четко определенных

математических принципов и физических законов – в конце концов, это ведь машина.

Возможно, никакой другой человек не сделал больше, чтобы заложить фундамент и привести эту концепцию к успеху, чем Ньютон. Тем не менее – и это один из самых ироничных поворотов истории – по существу он опроверг свою собственную теорию. В 1678 году Исаак Ньютон (1643–1727) написал «Начала», которые описывали (среди прочего) три основных закона движения и действие сил в их рамках.

Первый закон Ньютона гласит:

«Объект будет оставаться в состоянии покоя (его скорость будет равняться нулю), а объект, который движется с постоянной скоростью, будет продолжать движение по прямой линии, пока приложенная сила не подействует на любой из них».

Другими словами, если объект не двигается, то он не придет в движение без приложения к нему какой-либо силы – толчка или удара, который подействует его в движение.

Более того, объект, который движется по прямой с определенной скоростью, продолжит движение, если, опять-таки, какая-то сила не вмешается, внеся изменения. Поскольку пребывание в состоянии неподвижности – просто частный случай движения с постоянной скоростью (скорость равна нулю), мы можем утверждать, что естественное стремление объекта – поддерживать свою скорость и движение по прямой линии. Эту особенность называют *инерцией*, и это – фундаментальная особенность материи.

И Галилео, и Декарт работали над понятием инерции, а формализовано оно было в первом законе Ньютона^[134]. Сегодня это не кажется нам чем-то грандиозным, но в конце XVII века Галилео первым предложил ввести это понятие. До этого большинство людей думало (благодаря Аристотелю), что естественное состояние объекта – состояние покоя. Идея заключалась в следующем: чтобы поддерживать объект в движении, необходима постоянная сила, иначе он перейдет в состояние покоя. Действительно, кажется, это лучше согласуется с повседневным опытом.

Например, когда вы ведете автомобиль, необходима постоянная сила (от подачи топлива), чтобы продолжать движение. Однако на ваш автомобиль воздействует внешняя сила, создавая трение между

дорогой и шинами. Именно эта сила заставляет автомобиль замедляться, иначе бы он продолжал движение благодаря инерции.

Эксперименты Галилео с движением объектов вниз по наклонной плоскости (как мы узнали из части 1) позволили ему разобраться с понятием инерции. И объекты, и наклонная поверхность были сделаны из твердых материалов, и возникавшее в результате трение было минимальным^[135]. Таким образом, поскольку Галилео наблюдал за объектом, проходящим значительное расстояние после движения по наклонной поверхности, он вообразил такую ситуацию, в которой трение абсолютно отсутствовало, и пришел к заключению, что при этих обстоятельствах объект будет двигаться без остановки по инерции. Именно эти «мысленные эксперименты» привели Галилео ко многим проницательным выводам.

Второй закон Ньютона описывает эффект, который оказывает внешняя сила, действующая на движущийся объект:

«Ускорение объекта *прямо* пропорционально приложенной силе и *обратно* пропорционально массе объекта».

Другими словами, если приложенная сила F производит ускорение a объекта с массой m , то второй закон Ньютона математически выглядит так:

$$F = ma,$$

где сила и ускорение – *векторы* (у них есть величина и направление), а масса – *скаляр* (есть только величина). Чтобы выразить ускорение, мы преобразовываем выражение и получаем:

$$a = \frac{F}{m},$$

Так, для данной массы, если приложенная сила увеличивается, скажем, вдвое, ускорение также увеличится вдвое, а если приложенную силу увеличить втрое, ускорение вырастет в три раза... и так далее. Ускорение объекта *прямо* пропорционально приложенной силе. Теперь для данной приложенной силы, если масса увеличивается вдвое, мы видим, что ускорение уменьшается вдвое; а если втрое, то ускорение уменьшится в три раза... и так далее. Ускорение *обратно*

пропорционально массе объекта. Вторым закон Ньютона также дает первое точное определение приложенной силы – до этого силу путали с импульсом или энергией (как мы говорили в части 1).

Наконец, есть *третий закон Ньютона*:

«Два объекта действуют друг на друга с силами, которые равны по величине, но противоположны по направлению».

Иногда мы называем эти силы силой *действия* и силой *противодействия*. Мы можем утверждать, что для каждого действия есть равная и направленная в противоположную сторону сила противодействия. Третий закон Ньютона означает, что нет такой вещи, как «одинокая сила», – все силы во Вселенной существуют в «парах», где обе силы (данной пары) равны по величине, но направлены в противоположные стороны.

Например, книга, лежащая на столе, за счет своего веса действует на стол с силой, направленной вниз^[136], а стол, в свою очередь, действует на книгу с силой, которая равна по величине, но направлена вверх. Некоторые примеры кажутся немного менее очевидными. Представьте себе, что вы ехали на машине и в ваше лобовое стекло врезался жук. Даже при том, что последствия для жука стали явно намного более плачевными, чем для автомобиля, приложенные силы были равны.

Законы движения Ньютона по существу объясняли теорию, по которой мир работает как хорошо смазанная машина. Однако Ньютон видел это не совсем так. В «Оптике» он пишет:

«В то время как кометы движутся по самым разнообразным вытянутым орбитам, одна лишь воля случая не может заставить все планеты двигаться одинаковым образом по орбитам с общим центром, и некоторые незначительные отклонения в движении планет могут возникать из-за взаимодействия комет и планет, и эти возмущения будут стремиться расти до тех пор, пока система не начнет нуждаться в исправлении».

Ньютон просто не мог поверить в рискованный «вариант» мировой машины, где Бог был всего лишь архитектором и создателем, как считал Декарт (и многие другие). Например, он боялся, что пролетающая комета может заставить планету отклониться от орбиты, таким образом требуя, чтобы «рука Бога» исправила эту небольшую астрономическую ошибку.

Это может казаться противоречащим законам движения Ньютона, но Ньютон не видел противоречия. Он рассматривал свои законы как применимые после того, как Бог привел все в движение, и до тех пор, пока все не станет настолько неправильным, что потребуются его вмешательства. Неудивительно, что отказ Ньютона (или, скорее, упрощенная версия механистической философии) навлек на себя критику, в особенности со стороны его вечного соперника, Лейбница.

В письме, написанном в 1715 году и вскоре опубликованном, Лейбниц говорит:

«У сэра Исаака Ньютона и его последователей также есть очень странное мнение относительно того, что делает Бог. Согласно их теории, Господь Всемогуший хочет время от времени “заводить” Вселенную как часы: иначе она прекратит работать. Похоже, он не осознавал, что следует создать мир по принципу вечного двигателя. Нет, Божественная машина, по словам этих господ, столь несовершенна, что время от времени ее приходится заводить... и даже чинить, как часовщик поправляет свою работу...»

Однако Ньютон, пославший свой ответ Лейбницу через Сэмюэла Кларка (1675–1729), считал, что Бог не только архитектор и создатель, но и хранитель. Таким образом, его необходимое вмешательство не является отражением несовершенства конструкции, а скорее «его мастерства, ничто не работает без его непрерывного управления и контроля».

Итак, в то время как Декарт, Лейбниц, Бойль и многие другие видели в механистической философии с мировой машиной объяснение и дополнение существования Бога, Ньютон настаивал, что все это ничто иное как атеизм, который он просто не мог принять.

Пока математики и ученые XVIII и начала XIX века – в частности, Пьер-Симон Лаплас (1749–1827), Леонард Эйлер (1707–1783), Жозеф Луи Лагранж (1736–1813) и Симеон Дени Пуассон (1781–1840) – развивали Ньютоновы законы движения, вера в то, что божья воля необходима для поддержания баланса, прошла. Император Наполеон I прокомментировал «Трактат о небесной механике»^[137] Лапласа, заявив, что, хотя он и описывает Вселенную, он не упоминает ее создателя. Лаплас самодовольно ответил: «У меня не было нужды в этой гипотезе».

Удивленный его ответом, Наполеон поделился этим фактом с Лагранжем, который прокомментировал: «Ах, это прекрасная гипотеза; она объясняет множество вещей».

Ньютон, казалось, был в меньшинстве относительно принятия механической философии, исключавшей вмешательство Бога. Возможно, это частично вынудило его исследовать иные науки, включая алхимию.

Свинец в золото

В то время как XVII век увидел начало механистической философии и ее растущую популярность, уже существовала другая «философия» – алхимия. На самом деле к тому времени алхимия уже существовала в множестве форм.

Одно из самых ранних упоминаний алхимии нашли в китайском императорском указе, выпущенном императором Цзином в 144 году до н. э., который установил, что тех, кто изготавливает поддельное золото, например фальшивомонетчиков и алхимиков, следует карать публичной казнью. По-видимому, предыдущий император, Вэнь, позволил алхимикам создавать золото. Это было проблемой для императора Цзина. Проблема заключалась в том, что алхимики создавали поддельное золото, растрачивая деньги (не говоря уже о трате времени), и, следовательно, совершали преступление, чего император Цзин допустить не мог.

Ранняя история алхимии также проявляется в 200 году до н. э. с «Физикой и мистикой» Болоса из Мендеса^[138] (грека, жившего в Египте). Тем не менее основное направление развития алхимии пошло из Эллинистического Египта^[139], городов дельты Нила, особенно Александрии^[140]. Основным вопросом эллинистической алхимии было превращение веществ, в особенности производство золота и серебра из «простых металлов». Это отличало ее от китайской алхимии, которая искала эликсиры долголетия, бессмертия и совершенства человеческой души.

Китайская алхимия была тесно связана с даосизмом и существовала примерно с 300 года до н. э. Подобные мысли присутствовали и в индийской алхимии, возможно, уже в VIII веке до н. э., – санскритская Атхарваведа описывает использование золота как средства продления жизни. Тексты тантрической хатха-йоги, написанные после VIII века, с их мистическим подтекстом сходны по смыслу с китайскими. Действительно, большинство видов алхимии были пронизаны мистицизмом.

Мистика, окружающая алхимию, часто приводила к ее осуждению как вклада в раннюю экспериментальную химию. Тем не менее можно обоснованно утверждать, что определенные аспекты алхимии

переходили из одного времени в другое и стали впоследствии экспериментальной химией, которую мы знаем сегодня. Таким образом, алхимия в некотором смысле была скромным началом экспериментальной химии^[141].

Большинству из нас знакома основная задача алхимика – преобразование «простых» неблагородных металлов (ртути, свинца, олова, меди и железа) в драгоценные – золото и серебро (в процессе, известном как *chrysopoeia*, от греч. *chryso* – «золото», и *poeia* – «создание»), эту цель преследовали до 1720-х годов. В то время как идея преобразовать один материал в другой сегодня кажется нам смешной, эта идея, по существу, вытекала из философии Аристотеля. Аристотель принял теорию Эмпедокла о четырех элементах, изменив ее и присвоив «качества» каждому из элементов: земля была холодной и сухой; огонь был горячим и сухим; вода была холодной и влажной; воздух был горячим и влажным.

Для алхимика это означало следующее: чтобы превратить одно вещество в другое, нужно поменять одно или оба его свойства на свойства другого. Например, если мы рассмотрим воду (холодную и влажную), то, нагрев ее, алхимик, казалось бы, преобразовал ее в воздух (горячий и влажный), так как вскипяченная вода в конечном итоге испаряется. Аристотель действительно верил в такие преобразования элементов. Кроме того, он полагал, что каждое вещество состояло из всех элементов, отличие было только в соотношениях элементов в этих веществах.

Эту идею развил в своей работе алхимик Джабир ибн Хайян (ок. 721–815)^[142]. Джабир последовал примеру Аристотеля, но заменил его концепцию свойств «природами». Однако большая часть его работы была посвящена ртутно-серной теории металлов. Джабир думал, что металлы состоят из ртути и серы. Заметьте, не из любой ртути и серы, а скорее их форм, которые были схожи с обычной ртутью и серой, известным нам сегодня. Джабир считал, что металлы отличаются только чистотой серы и ртути, которую они содержат. Поэтому золото было проявлением самой чистой формы серы и ртути в идеальном отношении.

Однако, так как все металлы содержат серу и ртуть, должно было быть возможно преобразовать любой из них в золото при помощи катализатора, или эликсира, который Джабир назвал по-арабски «al-

iksir». Поколения алхимиков унаследовали эту теорию, и в западной алхимии этот эликсир стал известен как философский камень, который обладал силой разделять и перераспределять фундаментальные составляющие материи, тем самым позволяя создавать нечто совершенно новое.

В Средневековье философский камень стал чем-то большим, чем просто инструментом для преобразования неблагородных металлов в драгоценные золото и серебро. Его стали связывать с эликсиром жизни, который возвращает больному телу идеальное здоровье, обеспечивая долгую жизнь. Поэтому философский камень стали связывать со способностью преобразовать «низшее качество» в «идеальное качество»: обычный сплав – в драгоценный металл, больное тело – в здоровое.

Для средневекового алхимика эта дуальность хорошо вписывалась в представление о «макромире и микромире» (или герметическую философию), в котором человек (микрокосм) был тесно связан со Вселенной (макрокосмом). Таким образом, процесс превращения обычного металла в золото, как верили, имел ту же природу, что и процесс очищения души.

Парацельс (1493–1541)^[143], который доработал ртутно-серную теорию металлов Джабира до версии *tria prima*, утверждал, что вся материя (не только металлы) состоит из «духовных основ»: соли, серы и ртути. Они также были символическими категориями (как и четыре элемента в теории Аристотеля, они обладали приписываемыми качествами), поскольку были основными составляющими материи. Опять-таки, Парацельс говорил не о соли, сере и ртути, которые мы знаем сегодня.

Парацельс первым применил алхимию в медицинских целях, которые он считал главными для этой науки: «Многие считают, что алхимия нужна для создания золота и серебра. Для меня нет иной цели, кроме как изучить, какие действие и сила могут быть скрыты в медицине».

Парацельс считал, что здоровье и болезни имеют отношение к связи человеческого тела и Вселенной. Парацельс рассматривал медицину как средство для достижения «гармонии» между телом и Вселенной. Алхимиков часто воспринимали как воров, жуликов или негодяев, но

все же эту науку практиковали люди всех профессий, и ей нередко покровительствовали короли.

Образованный и талантливый Исаак Ньютон начал изучать алхимию приблизительно в 1669 году и продолжал в течение приблизительно тридцати лет. Его алхимические манускрипты насчитывают больше миллиона слов (для сравнения: в Библии 773 692 слова), и частью его личной библиотеки были 138 книг по алхимии. Таким образом, хотя мы знаем его по работам в области физики, называемой классической механикой, или ньютоновской механикой (обсуждаемой в его «Началах»), по сути, он написал больше книг и провел больше времени, изучая алхимию.

Алхимия привлекала Ньютона тем, что, в отличие от механистической философии, которая по существу исключала необходимость существования Бога, алхимия фактически требовала некоего его духовного присутствия. Мы можем это понять из взглядов средневекового алхимика на микромир – макромир и основываясь на точке зрения Парацельса на здоровье и медицину. Кроме того, Ньютон, вероятно, рассматривал алхимию как дающую дополнительное по отношению к механистической философии и менее ограничивающее представление о природе^[144].

В XVII веке наука, которую мы теперь называем (экспериментальной) химией, только зарождалась, тогда как алхимию все еще практиковали многие ученые. Однако исторически очень трудно, даже почти невозможно четко разграничить, когда закончилась алхимия и началась экспериментальная химия. На самом деле эти слова были в значительной степени взаимозаменяемыми приблизительно до конца XVII века. Только в начале XVIII века «алхимия» и «химия» приобрели их современные значения. Под «алхимией» теперь понимали исключительно попытки превратить «простые» металлы в золото и серебро.

В конечном счете теория Аристотеля о четырех элементах, как и теория *tria prima* Парацельса, уступят место более совершенным моделям, а древние атомные теории Демокрита и Эпикура наконец получат свое признание. Алхимия уступит место химии, когда экспериментальные методики, которым она дала жизнь, откроют дорогу рациональной разработке экспериментов. Более того, механистическая философия даст основу всем этим вещам, когда

новое поколение ученых уверует, что природу действительно можно понять рационально, как устройство, функционирующее по определенными законам – как мировую машину.

Глава 11

Природа атомов

Физические основы устройства атомов

В течение XVIII века слова «частица», «корпускула», «элемент» и «атом» использовали как синонимы для обозначения строительных блоков вещества. Фактически с тех пор, как 2000 лет назад появилась теория Демокрита, никаких новых догадок о том, что такое атом, не было. Для химика атом как мельчайшая частица вещества был концептуально симпатичен, однако не помогал приблизиться к пониманию его главной заботы: как в материи протекают разные реакции.

Представьте на мгновение, что вы химик конца XVIII века, который работает с реагентами, смешивает их, смотрит, как они взаимодействуют, как протекает химическая реакция, создает новые вещества. Как понимание того, что атом – мельчайшая составная частица материи, поможет вам объяснить протекание химической реакции, которую вы только что наблюдали?

Для многих химиков того времени атом не играл значительной роли в их каждодневных экспериментах. Несомненно, химики нарисовали бы «схемы, где присутствует атом». Однако для большинства химиков они были не более чем инструментом визуализации, полезным в организации размышлений о химической реакции, но не дающим подробного объяснения процесса. Чего химики действительно желали, так это объяснения огромного количества экспериментальных данных.

Как знание об атоме (если бы даже оно существовало) на самом деле могло предоставить такую информацию? Более того, если бы атом был действительно самой маленькой, неделимой частью материи, как бы вы поняли это? Сколько бы он весил? Есть ли различные типы атомов? Вот над чем размышляли некоторые химики.

Со всеми этими атомными теориями, блуждающими вокруг, атом вносил очень мало определенности и предлагал больше путаницы, чем ясности. Было крайне нужно найти путь к ответам на некоторые из этих вопросов. Первое ощущение ясности пришло с уточнением атомного понятия под названием «элемент».

Элементы и атомы

В 1661 году Роберт Бойль написал свою главную работу «Скептический химик». В ней он жестко критикует теории элементов Аристотеля и Парацельса. Что важнее, он предложил идею *элемента* как чего-то, что нельзя дальше разделить посредством каких бы то ни было экспериментов^[145]:

«...определенные простые и примитивные или совершенно однородные тела; которые не состоят из каких-либо иных тел, или друг друга, являются компонентами, из которых состоят все эти так называемые идеально смешанные тела и на которые они в конечном счете распадаются».

Более ста лет спустя, в 1789 году, Антуан Лавуазье повторяет это в «Элементарном трактате о химии»:

«Если мы будем использовать термин “элементы”, чтобы выразить нашу идею о последней точке, которую [химический] анализ может достигнуть, мы должны признать элементами все вещества, до которых мы можем любыми средствами низвести тела в процессе распада».

Конечно, речь шла о средствах, доступных в то время. Таким образом, смогут ли будущие поколения ученых разработать новые методы дальнейшего разделения этих вещей, которые они называли элементами, показало бы только время. Однако это не было первоочередной проблемой, и не должно было быть. Вот как Лавуазье продолжает:

«Не то чтобы мы наделены правом утверждать, что эти вещества, которые мы рассматриваем как простые, не могут состоять из двух или даже большего количества [элементов]; но, раз эти [элементы] нельзя разделить, или раз мы до настоящего времени не обнаружили средства их разделить, для нас они выполняют роль простых веществ, и мы ни в коем случае не должны считать их составными, пока эксперименты и наблюдения не докажут, что это так».

Лавуазье знал, что в будущем то, что в его время называли элементами, может на самом деле оказаться более сложными веществами. Эти вещества, будучи разделенными при помощи новых методов, наконец показали бы, из чего же состоят вещества. Однако важно определение *элемента*, которое дают Бойль и Лавуазье.

Как уже упоминалось, тогда понятие атома было расплывчатым. Но, дав атомам физическую индивидуальность, концепция элемента начала расчищать путь. Элемент – это атом определенного типа, это действительно так просто.

Уникальные особенности атома, зависящие от его элемента, определяют то, как он будет взаимодействовать с другими элементами. Наши знания об этих взаимодействиях дают нам основу понимания химических реакций, и именно через эти химические реакции вещество «создается» и «разрушается».

По состоянию на август 2018 года мы знаем о 126 элементах, тогда как Лавуазье в «Элементарном трактате по химии», изданном в 1789 году, определил тридцать три, среди которых были теплород и свет. Он включал и известные сегодня элементы: кислород, азот и водород. Были и другие элементы, с которыми мы знакомы сегодня, – золото, серебро, железо, медь, олово и ртуть.

Как объединяются элементы

В 1789 году Лавуазье показал, что общая масса (или вещество) сохраняется – она не изменяется от начала до конца химической реакции^[146]. Другими словами, если вы тщательно взвесите исходные материалы (реагенты) и получите значение, равное одному грамму, сумма конечных материалов (продуктов), после того как химическая реакция закончилась, тоже будет равняться одному грамму^[147]. Все очень просто. В ходе химической реакции никакая масса не прирастает, никакая масса не исчезает. Так что же именно происходит?

По-видимому, «вещи» просто «реорганизовывают» себя. В конце концов, если ничего не теряется и не появляется, но то, что вы получили на выходе, отличается от того, что было в начале, – значит, вещи каким-то образом переставляются, верно?

Давайте рассмотрим эту ситуацию на примере карт. Скажем, у нас есть совершенно новая колода карт, прямо из пакета (исходные материалы, или реагенты), и теперь мы перетасовываем колоду карт (химическая реакция) и получаем как бы новую колоду (конечный продукт). Очевидно, эта новая вещь – просто измененная колода карт. То есть никакие карты не были потеряны или добавлены в нее (если я

только не хочу сжульничать в карточной игре); скорее, просто порядок карт поменялся.

Так, химическая реакция подобна колоде перетасовываемых карт. Джон Дальтон (1766–1844) пришел к заключению, что как меняют порядок предметы, так меняют порядок и атомы элементов, составляющие исходные материалы. Таким образом, закономерно возникает следующий вопрос: если мы хотим провести химическую реакцию, сколько исходных материалов необходимо, чтобы получить желаемые конечные материалы?

Другими словами, действительно ли важно реальное количество, или нужна какая-либо сумма перемешанных друг с другом исходных материалов, чтобы получить желаемый конечный материал? Возможно, химические реакции похожи на кулинарию, где вы просто добавляете «часть» этого или «немного» того. Клод Луи Бертолле (1748–1822), ученик Лавуазье, думал именно так.

Когда вы готовите яблочный пирог, вы можете использовать пять яблок, шесть яблок и так далее, но большинство из нас просто назовет его «яблочным пирогом», не описывая его как «яблочный пирог из пяти яблок» или «яблочный пирог из шести яблок». Бертолле именно так представлял, что элементы объединяются в ходе химической реакции при создании нового соединения.

Бертолле был уважаемым ученым, идеи которого имели вес в научном сообществе на рубеже XIX века. Он полагал, что элементам, составляющим сложное вещество, не нужно находиться в определенных соотношениях друг с другом, они могут браться в различных пропорциях, и в результате получится та же самая смесь продуктов – тот же самый «яблочный пирог». Кроме того, по данным Бертолле, соотношения количеств элементов в соединении определены количествами используемых исходных материалов. Поэтому, если исходные материалы подобраны так, что некоторые элементы используются в бо2льших количествах, чем другие элементы, у конечного продукта реакции в составе так же будет больше элементов. Как и в кулинарии, если в рецепт добавить больше сахара, блюдо будет слаще.

Эта концепция не устраивала Жозефа Луи Пруста (1754–1826), он не считал химию кулинарным искусством. Пруст провел детальные исследования в хорошо оборудованной лаборатории и обнаружил, что

формирующие определенное вещество элементы не находятся друг с другом в переменных пропорциях, а эти соотношения фиксированы. Таким образом, различные соотношения тех же самых элементов дают в результате разные соединения, а не просто вариации одного и того же соединения, как считал Бертолле, – таким образом, действительно имеет значение, используете ли вы пять яблок или шесть. Пруст объясняет это так:

«...свойства соединений неизменны, пока неизменна пропорция составляющих их элементов. В этих двух аспектах они идентичны. Вследствие смены агрегатного состояния этих веществ может измениться их внешний вид, но не свойства».

В 1799 году Пруст ввел закон *постоянства состава* и затем до 1808 года спорил по этому поводу с Бертолле, пока тот наконец не сдался. Возможно, Бертолле пришел к своим заключениям, анализируя нечистые вещества и смеси. У закона постоянства состава, или *закона Пруста*, есть несколько далеко идущих выводов, как мы увидим через минуту. Однако одно нужно отметить: готовите ли вы вещество в лаборатории или же находите в природе, соотношения в нем элементов, которые нужны для этого соединения, в обоих случаях одни и те же; метод изготовления данного соединения не меняет его химический состав.

Теперь это может показаться тривиальным, но в начале XIX века это не было общепринятой истиной, и исследование Пруста и других убедили нас в этом важном факте. Закон постоянства состава и *закон сохранения Лавуазье* сформировали основу, на которой Дальтон начал работать со своей атомной теорией.

Современная атомная теория: начало

Джон Дальтон, сын ткача, родился в семье квакера в Иглесфилде, Камберленд, в Англии. Когда ему было двенадцать, школу, в которой он учился, передали его старшему брату, который позвал Джона помогать в обучении; два года спустя братья купили свою школу.

В 1793 году Дальтон переехал в Манчестер, чтобы преподавать математику в Нью Колледже. Сначала Дальтона заинтересовала метеорология, и в том же году он издал «Метеорологические наблюдения и эссе». Однако у него было много научных интересов, и скоро он обратился к исследованию газов, заинтриговавших его во время исследования атмосферы Земли, являющейся смесью газов, которые мы называем воздухом.

Дальтон задался вопросом: почему экспериментальные данные его времени указывали, что атмосфера Земли была *однородной*? Другими словами, почему состав атмосферы мало изменялся по мере увеличения высоты? Он знал, что атмосфера Земли является смесью газов с разными плотностями. (Сегодня мы знаем, что атмосфера Земли состоит из азота на 78,09 %, кислорода на 20,95 %, аргона на 0,93 %, углекислого газа на 0,039 % и небольшого количества других газов. Воздух также содержит переменную объемную долю водяного пара в зависимости от температуры, составляющую в среднем приблизительно 1 %.) Таким образом, Дальтон ожидал, что более плотные газы будут находиться ниже, в то время как менее плотные будут преобладать на больших высотах. Это и правда имело некоторый смысл.

В конце концов, нефть, смешиваясь с водой, за счет меньшей плотности поднимается вверх. Воздушный шар, заполненный гелием, летит вверх в направлении высоких слоев земной атмосферы, потому что гелий менее плотный, чем воздух. Так почему менее плотные газы не должны быть выше более плотных в атмосфере Земли? Во времена Дальтона не было известно, что это действительно так. Тем не менее это не слишком заметно на уровне нескольких миль выше Земли (на эти высоты распространялись экспериментальные данные во времена Дальтона), но становится хорошо заметно на больших высотах. Любой, кто бывал на большой высоте (возможно, вы занимались

сноубордингом или пешим туризмом в горах), может засвидетельствовать, что дышать ощутимо тяжелее – из-за меньшего количества кислорода.

Так случилось, что кислород – один из наиболее плотных газов, составляющих воздух, и поэтому его содержание при удалении от поверхности Земли становится все меньше. Тем не менее такая смесь газов, как атмосфера, несколько отличается от смеси жидкостей, например нефти и воды. В то время как жидкости с разной плотностью при взаимодействии полностью расслаиваются, газообразные смеси ведут себя слегка иначе. Частицы (атомы, молекулы) газа движутся дальше и быстрее (за данный отрезок времени), чем частицы жидкости. За счет этого каждая частица подвергается приблизительно миллиарду столкновений с другими частицами каждую секунду. Как следствие, смеси газа имеют тенденцию... смешиваться. А именно, смешиваться таким образом, что частицы (более или менее) равномерно распределяются повсюду (или однородно, как мы говорили раньше), не формируя четко определенные слои, как это делают жидкие смеси.

Поэтому атмосфера Земли – однородная смесь газов, плотность которых меняется в зависимости от высоты, снижаясь на больших высотах. Вспомните, что мы говорили об идее движущихся частиц как об основе кинетической теории. Однако Дальтон просто не верил в кинетическую теорию. Он полагал, что атомы объекта остаются на месте (статическая модель вещества). Он также считал, что атомы объекта всегда находятся в прямом контакте друг с другом. Это согласовывалось с отказом Дальтона принять понятие «действия на расстоянии». Дальтон полагал, что объекты могут воздействовать друг на друга, только если они вступают в контакт.

Дальтон был не единственным, кто не признавал действия на расстоянии^[148]. В самом деле, это был важный момент в формировании атомной теории Дальтона. Так как же Дальтон объяснял смешивание газов в атмосфере? На самом деле, очень просто – он пришел к выводу, что сила взаимного отталкивания^[149] между частицами газа должна отвечать за их смешивание, пока они не придут в некоторое состояние равновесия, оставаясь на одном месте в тесном контакте.

Интерес Дальтона к газам, возможно, начался с его исследований атмосферы Земли, но скоро его привлекло поведение самих газов^[150]. Дальтон был убежден, что растворимость газа в воде связана с весом атомов газа^[151]. В результате Дальтон сконцентрировал свое внимание на определении массы атомов.

Как вы можете представить, определить массу атома не так-то просто. В конце концов, вы не видите атом, и поэтому не представляется возможным просто положить его на весы и измерить массу. Закон постоянства состава, каким его знал бы Дальтон, гласил, что когда вещи, из которых состоят вещества, объединяются, чтобы сформировать сложное вещество, они делают это в определенном соотношении.

Безусловно, закон постоянства состава не подтверждает существование атомов, но для Дальтона закон был сильным аргументом в пользу этого. Дальтон, должно быть, задавался вопросом, почему соединение может быть сформировано только таким способом, в определенных пропорциях. Он, должно быть, спрашивал себя: в чем же дело, почему эти соотношения строго зафиксированы?

В конце концов Дальтон сделал большой шаг вперед и пришел к заключению, что причиной были атомы (элементов), которые формируют вещество. Не было никаких сомнений – Дальтон полагал, что атомы являются физической основой вещества, а элемент (как мы и говорили прежде) придает атому его индивидуальность и соответствующие физические свойства. Это было смелым предположением в начале XIX века, когда большинство ученых не знали, что делать с атомами. Начав с этого, Дальтон намеревался определить атомные массы элементов.

Создание системы масс атомов было суровым испытанием в 1800 году. Дальтону нужно было сделать несколько разумных предположений, или гипотез. Во-первых, Дальтон не только решил, что закон постоянства состава подразумевает, что атомы объединяются в определенных соотношениях, но и что они делают так только в отношениях целых чисел, а не дробей. Таким образом, пропорции были бы, например, два к одному (2: 1); три к четырем (3: 4) и т. д. – не один к одной четверти (1: 1/4); половина к одной пятой (1/2: 1/5) и так далее. Причина была проста: Дальтон полагал, что атомы были *неделимы*:

«Вещество, пусть и может делиться множество раз, но не бесконечно. Таким образом, должна быть некоторая величина, по достижению которой дальнейшее деление вещества становится невозможным. Существование таких мельчайших частиц вещества едва ли может быть подвергнуто сомнению, хотя они, вероятно, слишком маленькие, чтобы их можно было показать, совершенствуя микроскоп».

Поэтому теория, что атомы неделимы, означает, что вы не сможете разделить их пополам на трети или четверти и т. д., следовательно, они должны объединяться в простых отношениях целых чисел. Все очень просто.

Вспомните, Лавуазье говорил, что в ходе химической реакции масса (вещество) сохраняется. Кроме того, интерпретация Дальтоном закона постоянства состава была такова: во время химической реакции атомы объединяются так, что их количества относятся как целые (не дробные) числа, чтобы сформировать сложное вещество. Определившись с этими двумя понятиями, мы можем прийти к выводу, что во время химической реакции сохраняются именно отдельные атомы; атом – *дискретная* единица сохранения массы в химической реакции. Другие главные заключения Дальтона о природе атомов следующие.

– Все атомы определенного химического элемента одинаковы. Понятие химических элементов, выдвинутое Бойлем и Лавуазье и получившее развитие в атомной теории Дальтона, было главным, отличавшим ее от древнегреческих атомных теорий, которые мы обсуждали ранее. Атомы формируют вещество, но не все атомы одинаковы. Скорее атомы отличаются друг от друга только тем, какой элемент они формируют – элемент «определяет» свои атомы, так сказать. Дальтон писал: «Мельчайшие частицы всех однородных тел абсолютно одинаковы по массе, форме и т. д.».

Некоторые элементы уже знакомы вам (наряду с их химическими символами), например кислород (O), водород (H), медь (Cu), свинец (Pb), золото (Au), серебро (Ag) и алюминий (Al).

– Атомы неизменны. Века неудавшихся попыток алхимиков превратить свинец в золото, несомненно, убедили Дальтона, что

невозможно превратить атом одного элемента в атом другого элемента. В самом деле, вы не можете преобразовать кислород в водород. Однако сегодня мы знаем, что атомы не так уж неизменны (или вечны) – на самом деле они «разваливаются», переживая радиоактивный распад, который мы обсудим позже. Во времена Дальтона об этой особенности определенных атомов не знали, что было, вероятно, хорошо, поскольку это, скорее всего, просто запутало бы вопрос природы атомов.

– Атомы объединяются, чтобы сформировать более крупные объекты, известные как молекулы. Атомы – основополагающие частицы, из которых состоит вещество. Однако группа атомов может объединиться, чтобы сформировать нечто немного большее – не достаточно большое, чтобы быть замеченным невооруженным глазом, но большее, чем отдельный атом. Эти комбинации атомов формируют молекулы или соединения.

– В химических реакциях только перестраивается порядок атомов. Теперь мы знаем, что это связано с сохранением атомов в ходе химических реакций. Так как атомы не создаются и не разрушаются, они должны просто перестроиться («перемешаться»), чтобы сформировать молекулы. Кроме того (как только что было отмечено), они не изменяют свою природу, чтобы стать другим элементом в химической реакции.

Эти идеи сформировали систему взглядов Дальтона на атомы и позволили ему разработать собственную очень впечатляющую атомную теорию, которая выводит ряд атомных масс для различных элементов. Давайте посмотрим, как же он смог совершить этот подвиг.

Атомная масса элементов

Атомы очень малы. Их масса колеблется в пределах 10^{-22} – 10^{-24} грамм. Теперь представим средних размеров атом массой приблизительно 10^{-23} грамм, что составляет примерно 0,000000000000000000000001 грамма. Теперь представьте крупинку песка размером 1/156 сантиметра, чья масса составляла бы примерно 0,001 (10^{-3}) грамма^[152]. Поэтому крупинка песка в 100 000 000 000 000 000 000 раз больше, чем один-единственный атом, массой 10^{-23} грамм, – неудивительно, что вы не можете увидеть атом. Так каким же образом Дальтон определял массу атомов некоторых основных элементов, таких как кислород, водород и азот?

Должно быть ясно, что когда кто-то взвешивает любой объект, его общая масса зависит от массы всех атомов, из которых он состоит. Очевидно, отдельные массы всех атомов, составляющих объект, несомненно сложатся в массу объекта в целом. Если объект состоит только из одного типа атомов (одного элемента), то все еще проще: количество атомов в объекте, умноженное на массу элемента, равняется общей массе объекта.

Для экспериментальных целей хорошим начальным примером для «объекта», состоящего из атомов одного типа, лучше всего подойдет газ, например кислород, азот, водород и т. д. Кроме того, в некоторых случаях мы можем взять два различных газа, представляющих собой простые вещества, и смешать их вместе таким образом, что они претерпят химическую реакцию, образовав продукт. Например, если смешать газ водород с газом кислородом, они сформируют водяной пар (при правильных условиях)^[153].

Наблюдая сохранение массы/атомов после взвешивания реагентов (водорода и кислорода) и конечного продукта (водяного пара), мы понимаем, что суммарная масса используемых реагентов и масса конечного продукта будут равняться друг другу. Вопрос заключается в том, как определить массу атомов, вовлеченных в эту химическую реакцию (а именно кислорода и водорода)?

Предположим, мы определяем полные массы кислорода и водорода, используемых в химической реакции, которую Дальтон и другие

проводили с помощью средств, доступных в XIX веке. Общая масса кислорода (или водорода), используемых в химической реакции, равна количеству использованных атомов кислорода (водорода), умноженному на реальную массу единственного атома кислорода (водорода). Далее мы можем разделить (например) общую массу использованного кислорода и водорода, чтобы получить отношение количеств использованных атомов (кислорода и водорода), умноженное на отношение реальных масс их атомов.

Это последнее отношение и есть *относительная масса*, которую мы пытаемся определить, хотя мы все еще не определили реальную, «абсолютную» массу атома кислорода или атома водорода. Честно говоря, сама масса атомов не так важна, если мы можем получить их относительную массу, которая является отношением реальной массы данного атома к некоторому произвольному *этало*ну.

Например, согласно современным данным, относительная масса атома кислорода приблизительно равна 16, тогда как у атома водорода – приблизительно равна 1. Это означает, что атом кислорода в шестнадцать раз тяжелее, чем атом водорода. Однако это не означает, что кислород фактически весит 16 некоторых единиц. Также по современным стандартам «опорным» атомом для нашей текущей системы является углерод, которому приписывают относительную массу, равную примерно 12. Это означает, что атом углерода в двенадцать раз тяжелее, чем атом водорода, но всего в 0,75 раза тяжелее, чем атом кислорода ($12 \div 16 = 0,75$).

Я действительно говорил, что мы близки к определению относительной массы, но еще не достигли результата. В то время как мы знаем отношение полных масс кислорода и водорода, участвующих в химической реакции (мы взвешиваем их), мы не знаем отношение между атомами кислорода и водорода, которые объединяются, чтобы создать воду. Если бы мы знали, то могли бы определить и относительный вес кислорода и водорода.

Сегодня общеизвестно, что формула воды – H_2O , но Дальтон понятия не имел, что это так. Недостаточное количество экспериментальных данных и плохое понимание того, как объединяются атомы, чтобы сформировать вещества, не позволяли ему выяснить это. Дальтон должен был решить эту проблему, и он сделал это, создав очень простое правило: *правило наибольшей простоты*

Дальтона. Правило Дальтона было не чем иным, как предположением, которое было необходимо ему, если он хотел добиться какого-то прогресса в определении относительных масс атомов.

Дальтон предположил, что если два элемента объединяются (такие как кислород (О) и водород (Н)) и результатом их взаимодействия может быть только один продукт, то объединение их атомов возможно самым простым способом в соотношении 1: 1. Теперь, если эти элементы объединяются, чтобы создать два продукта реакции, то соотношение для первого продукта становится 1: 1, а для второго – 1: 2. Это предположение может объяснять и более сложные случаи: те же элементы при создании третьего продукта должны давать пропорцию 1: 3. Помните, что это было предположением, которое иногда работало, а иногда терпело неудачу.

Вернемся к нашему примеру с кислородом и водородом, образующими водяной пар. Во времена Дальтона вода была единственным продуктом, или соединением (сложным атомом, как называл его Дальтон) реакции с участием элементов кислорода и водорода. Поэтому отношение составляющих ее атомов – 1: 1, что сделало формулу воды таковой: НО, – так считал Дальтон. Сегодня мы знаем, что верная формула воды – Н₂О.

Однако были некоторые случаи, в которых правило Дальтона действительно работало. Рассмотрим угарный газ и углекислый газ, которые, как считал Дальтон, состоят из углерода (С) и кислорода (О). Зная, что для получения диоксида углерода используется вдвое больше кислорода, чем для формирования углекислого газа, и применяя правило наибольшей простоты Дальтона, мы получаем соответствующие формулы: СО₂ и СО – и они верные. Заметьте, что отношение количеств кислорода в двух оксидах – 2: 1, в то же время количество углерода 1: 1.

Это пример того, что Дальтон называл *законом кратных отношений*, который гласит, что, когда те же элементы объединяются, чтобы сформировать несколько соединений, они делают это таким способом, что соответствующие элементы находятся в целочисленных отношениях. В нашем примере с оксидами углерод находится в отношении 1: 1 в двух веществах, в то время как кислород находится в соотношении 2: 1. Сегодня это нас совсем не удивляет. В конце концов, это результат веры в то, что атомы являются неделимыми единицами,

из которых состоит материя; если вы не можете разделить атомы, тогда у вас не может быть одного вещества с дробным отношением между его элементами, и при этом у вас не может быть нескольких веществ, сформированных теми же элементами с дробным отношением между его элементами. Однако правило наибольшей простоты было слишком простым, как и закон кратных отношений^[154].

С твердой верой в атомы, впечатляющей физической интуицией, вооруженный несколькими простыми правилами, Дальтон смог составить таблицу *относительных масс*, которую он представил в 1803 году на встрече Литературного и философского общества Манчестера. В 1805 году ее впервые опубликовали, а в 1808 году она вышла в свет с систематическими объяснениями метода, когда Дальтон опубликовал первый том книги «Новая система химической философии». В ней на основе водорода он рассчитывает следующие относительные массы: водород (H) – 1; азот (N) – 5; углерод (C) – 5,4; кислород (O) – 7; фосфор (P) – 9; сера (S) – 13 и так далее, включая еще несколько элементов и веществ.

Вспомните относительные веса – это только отношение весов, а не сам вес элемента. Например, согласно теории Дальтона, азот в пять раз тяжелее водорода. Беглый взгляд на современную периодическую таблицу элементов показывает, что Дальтон получил относительные веса неверно (за исключением водорода). Как же Дальтон наделал столько ошибок?

Ну, вспомните, что у него не было способа выяснить точные соотношения числа атомов в конкретной молекуле, и он применил свое (очень произвольное) правило наибольшей простоты. Кроме того, хотя у Дальтона была замечательная интуиция, он был довольно посредственным экспериментатором, и, таким образом, данные его экспериментов были сомнительными. Но, вероятно, больше всего Дальтона подвел тот факт, что вещества, с которыми он работал, – газы, такие как кислород, азот, водород и т. п., – не являлись *одноатомными*.

Строгая вера Дальтона в неделимость атомов означала, что он рассматривал газы, с которыми работал, как состоящие из одиночных атомов, или одноатомные по природе. В целом это не лишено смысла, так как большинство элементов действительно существует именно в таком виде. К сожалению, газы, с которыми работал Дальтон, не

являются таковыми. Скорее, они существуют как два атома, «связанные» вместе, или как *двухатомные* молекулы.

Например, кислород, водород и азот существуют в природе в виде молекул O_2 , H_2 и N_2 , опровергая теорию Дальтона. Когда появились более точные экспериментальные данные, стало ясно, что расчеты количества атомов веществ Дальтона были ошибочными. Сам Дальтон пытался доработать свою атомную теорию, и, исследуя воду, в 1810 году он утверждал: «В конце концов, можно допустить, что вода может быть трехмолекулярным веществом», – то есть ее формула может выглядеть так: H_2O или HO_2 , а не как изначально предложенная HO .

В то время не было способа узнать точное отношение, в котором объединялись элементы, формируя соединения. Неудача системы атомных масс Дальтона не должна принижать его вклад в исследования атома, которые имеют актуальность и по сей день (далее мы обсудим это подробнее).

Можно предположить, что повторяющаяся обработка всех экспериментальных данных, возможно, позволила бы Дальтону выяснить соотношение атомных масс путем систематического устранения несоответствий – это было бы невероятно громоздкой работой. К счастью, новое решение ждало буквально за углом.

Глава 12

Последние сомнения разрешены

Атом как физическая реальность

К середине XIX века открытие первого начала и связанные с ним исследования нанесли окончательный удар по теплородной теории и ввели понятие энергии. Хотя не все были убеждены, но популярная теория, что тепло возникает вследствие движения элементарных частиц вещества, привлекла еще больше внимания к атомам.

В XIX веке ученые-новаторы, такие как Клаузиус, Максвелл и Больцман, строили свои теории, основываясь на предположительности существующих атомов. Позже, в 1905 году, молодой Альберт Эйнштейн написал труд (работая в патентном бюро) о хорошо известном физическом явлении того времени – броуновском движении, которое впервые было упомянуто в 1827 году.

Теория Эйнштейна правильно описала броуновское движение и основывалась на существовании атомов, которые пребывали в постоянном движении. Кроме того, теория Эйнштейна позволила получить первые экспериментальные доказательства существования атомов. Опыты, проведенные вскоре после этого, наконец подтвердили прогнозы, сделанные в новой теории Эйнштейна. Атом как физическое явление природы (а не просто удобный инструмент наглядного представления) теперь навсегда закрепился в современной химии и физике.

Смешивая объемы

В 1808 году Жозеф Гей-Люссак (1778–1850) повторял известный эксперимент по получению водяного пара из газов – водорода и кислорода. Ему удалось сделать это путем смешивания определенных объемов каждого из газов и воспламенения смеси при помощи электрической искры. Он заметил, что объемы кислорода и водорода, участвующие в реакции (объединяющиеся объемы), относятся друг к другу как небольшие целые числа. На самом деле, при тщательном исследовании не только собственной работы, но и других работ, он

пришел к заключению, что объемы газов, участвующих в химической реакции, всегда относятся друг к другу как простые целые числа:

«Кажется, что газы при взаимодействии всегда объединяются в простых отношениях; и мы в действительности наблюдали во всех предыдущих примерах, что это такие отношения, как 1: 1, 1: 2, 1: 3».

Кроме того, Гей-Люссак заметил, что если конечным продуктом реакции также был газ, то его объем и объемы газов, участвующих в реакции, также относились как целые числа. Например, он обнаружил, что при смешивании объемов водорода и кислорода для получения водяного пара происходит следующее:

2 объема водорода (газ) + 1 объема кислорода (газ) → 2 объема водяного пара.

Закон объемных отношений Гей-Люссака похож на другой известный закон. Дальтон точно так же рассуждал не об объемах, но об атомах, вовлеченных в химические реакции: атомы при химической реакции с образованием молекул объединяются в простых отношениях целых чисел. Таким образом, можно предположить, что Дальтон был счастлив услышать об этих результатах, возможно даже считал их полезными для переосмысления противоречий его собственной атомной теории. Но это было очень далеко от истины.

Дальтон справедливо предположил, что у разных атомов разные размеры. Он также полагал, что атомы газа расположены очень плотно, что они прямо соприкасаются друг с другом. За счет малого расстояния между ними атомы остаются неподвижными. Поэтому, согласно модели Дальтона, если вы хотите заполнить воздушный шар каким-либо газом, для этого понадобится больше маленьких атомов, чем больших.

По аналогии вообразите обычную коробку (в этом примере она выступает вместо шара), в которую мы хотим поместить шары (атомы), заполнив ее целиком. Теперь представим, что мы используем мячи для гольфа, укладывая их в коробку максимально плотно. Отметив, сколько мячей для гольфа потребовалось, чтобы заполнить коробку, мы освобождаем ее и начинаем снова. Однако на этот раз вместо мячей для гольфа мы используем баскетбольные мячи. Как и с мячами для гольфа, мы укладываем их максимально плотно. Как и

ожидалось, чтобы полностью заполнить ту же самую коробку, требуется меньше баскетбольных мячей, чем мячей для гольфа.

Что беспокоило Дальтона в результатах Гей-Люссака: казалось, что они гласили, будто независимо от типа атома (элемента) или его размера всегда нужно одно и то же количество атомов, чтобы заполнить один и тот же объем – то есть коробку полностью заполнит одинаковое количество мячей для гольфа или баскетбола. Что еще хуже, Дальтон думал: что если результаты Гей-Люссака означают, будто все атомы имеют одинаковый размер?

Дальтон отказывался верить результатам исследований Гей-Люссака и находил утешение в собственных экспериментах, которые показывали ошибки в результатах Гей-Люссака. Однако реальность была такова, что именно результаты исследований Дальтона были неверными, поскольку опыты были довольно трудными, а Дальтон был посредственным экспериментатором. Однако новая теория, казалось, давала некое новое понимание.

Число Авогадро

В 1811 году Амедео Авогадро (1776–1856) (урожденный Лоренцо Романо Амедео Карло Авогадро ди Куаренья э ди Черрето), посмотрев на результаты исследований Гей-Люссака, пришел к заключению, что при равных температуре и давлении равные объемы газа (например, два воздушных шара одинакового размера) содержат одинаковое количество «частиц». Эти частицы могут быть отдельными атомами, молекулами или даже составлять их смесь.

Таким образом, если два воздушных шара имеют одинаковый размер, один из которых заполнен гелием, а другой простым воздухом (смесью кислорода, углекислого газа, азота и водяного пара), то количество частиц в каждом из них будет одинаковым при том условии, что их температура и давление (комнатная температура и атмосферное давление) одинаковы. Авогадро не был первым, кто предложил эту теорию, но он первым сформулировал ее как полноценную научную концепцию. Из *закона Авогадро* следуют некоторые очень интересные выводы.

Если при постоянных температуре и давлении в определенном объеме содержится одинаковое количество частиц, то теории Дальтона

и Авогадро противоречат друг другу. В чем же проблема? Вспомните: Дальтон считал, что у атомы разных типов отличаются размерами. Это было разумным предположением, и сегодня мы знаем, что оно было верным. Однако Дальтон также предположил, что атомы газа расположены очень близко друг к другу, из-за чего он не верил в действие на расстоянии. Поэтому для Дальтона воздушный шар, заполненный газом, внутри был плотно заполнен атомами. Проблема была именно в этом. Давайте вернемся к нашей аналогии.

Ранее мы укладывали шары (или мячи для гольфа, или баскетбольные мячи) в коробку до тех пор, пока она не заполнялась целиком. На этот раз давайте откажемся от этого требования, но вместо одной коробки мы представим две одинаковых. В одну мы поместим баскетбольный мяч, а в другую – мяч для гольфа. Мы продолжим класть мячи в коробки до тех пор, пока одна из них не заполнится. Коробка с баскетбольными мячами заполнится первой (так как они больше, чем мячи для гольфа, а коробки имеют один и тот же размер), поэтому мы остановим эксперимент, как и обещали.

Таким образом мы закончим с двумя коробками равного размера (объема), которые содержат одинаковое количество «частиц». Конечно, атомы действительно ведут себя иначе, чем баскетбольные мячи или мячи для гольфа, но в этом случае (будьте уверены) наша аналогия по форме абсолютно верна. Таким образом, если мы сможем сосчитать количество малых и больших частиц в двух разных шарах, то обнаружим, что шары одинаковы по размеру и количество больших внутри одного равно количеству малых частиц внутри другого, а также что внутри довольно много оставшегося свободного пространства.

Как вы видите, частицы (атомы, молекулы или их смесь) газа расположены не так уж плотно по отношению друг к другу. Скорее они находятся в движении, перемещаясь в окружающем их вакууме. Действительно, модель атомов в свободном пространстве уже знакома нам из древнегреческих атомных теорий Демокрита и Эпикура. Закон Авогадро о равных количествах частиц для равных объемов при постоянной температуре и давлении значительно продвинул понимание природы газов. Авогадро никогда не доказывал свою теорию, он также не мог определить фактическое количество частиц при определенной температуре или давлении. Однако закон Авогадро следует из кинетической теории газов.

Основываясь на кинетической теории газов, можно рассчитать среднюю *полную поступательную кинетическую энергию* (E_k) идеального газа при температуре T и количестве частиц N при помощи уравнения

$$E_k = \frac{3}{2} NkT,$$

где k – просто константа, известная как постоянная Больцмана. Поступательная кинетическая энергия – кинетическая энергия, связанная с движением по осям x , y или z (направления измерения длины, ширины и высоты). Этот результат, который можно прямо получить при помощи распределения Максвелла (как обсуждалось в части 2), показывает, что E_k не зависит от массы частиц или их типа, но зависит только от температуры. Это означает, что при равной температуре, если два объема различных газов содержат то же количество частиц, у обоих объемов значение E_k будет одинаковым.

Другой вывод из кинетической теории газов состоит в том, что давление P идеального газа в объеме V можно описать при помощи уравнения

$$P = 2 / 3V \cdot E_k,$$

или, проще,

$$P = NkT / V$$

после подстановки одной из формул, приведенных выше, в другую. Учитывайте, что два различных газа обозначены как 1 и 2. Их соответствующие выражения для давления будут:

$$P_1 = N_1kT_1 / V_1$$

и

$$P_2 = N_2kT_2 / V_2.$$

Поэтому если два разных идеальных газа имеют равные объемы, давление и температуру, то количество их частиц будет равным, так как имеется равенство $P_1 = P_2$, где объем и температура одинаковы при условии

$$N_1kT / V = N_2kT / V,$$

или попросту

$$N_1 = N_2.$$

Это и есть закон Авогадро. Однако реальные газы отличаются от идеальных газов тем, что частицы в них претерпевают воздействия притяжения и отталкивания. Как следствие, в реальных газах количество частиц равняется числу Авогадро, только когда они ведут себя «идеально», что происходит при низком давлении и/или высоких температурах.

Сегодня мы узнаем закон Авогадро по фундаментальной константе, названной *числом Авогадро* – это количество частиц в одном *моле* вещества. Один моль любого вещества – количество вещества (в граммах), которое равно его атомной массе. Например, атомный вес углерода составляет 12 граммов на моль, и поэтому 1 моль углерода равняется 12 граммам. Другой пример – вода, атомный вес которой 18 граммов на моль, и поэтому 18 граммов воды (или приблизительно одна столовая ложка) – это один моль воды. Хотя Авогадро говорил всего лишь о количестве частиц в объеме газа^[155], числом Авогадро называется число частиц, в определенном количестве вещества (один моль), и оно применимо к газу, жидкости и твердому телу.

В 1909 году Жан Батист Перрен (1870–1942) впервые экспериментально определил число Авогадро, изучая броуновское движение (позже мы обсудим это более подробно), и получил результат $6,7 \cdot 10^{23}$ частиц/моль. Он был первым, кто связал его со значением моля вещества и предложил назвать его в честь Авогадро. Сегодня значение определено более точно – $6,022 \cdot 10^{23}$ частиц/моль^[156]. Идеальный газ при 32 °F и атмосферном давлении заполнил бы объем (воздушный шар), равный 22,4 литра и содержал бы ровно $6,022 \cdot 10^{23}$ частиц.

Авогадро думал, что газ, состоящий из одного элемента (как кислород, водород, азот и т. д.), мог состоять из молекул, тогда как Дальтон настаивал, что они могли существовать только как атомы. В то время было принято считать, что атомы одного элемента отталкивают друг друга, тогда как атомы разных элементов притягивают друг друга. Идеи Авогадро явно противоречили этому.

Далее, если бы атомы одного элемента на самом деле притягивали друг друга, то было бы непонятно, что останавливало их от слияния и

перехода в жидкое агрегатное состояние. Сегодня мы знаем, что атомные взаимодействия имеют разные виды и силу, что позволяет одним элементам притягивать друг друга в определенной мере.

Закон Авогадро и тот факт, что атомы одного элемента в газе могут сформировать молекулы, позволяет нам объяснить закон объединяющихся объемов Гей-Люссака. Вспомните результат исследования Гей-Люссака по образованию водяного пара из кислорода и водорода:

2 объема газа водорода + 1 объем газа кислорода → 2 объема водного пара.

Вспомните, Дальтон считал, что верное уравнение смешения отдельных атомов в общем объеме выглядит так:

1 атом водорода + 1 атом кислорода → 1 молекула водного пара.

Другими словами, Дальтон думал, что образование водяного пара происходит с помощью одного атома водорода, объединяющегося с одним атомом кислорода – вместе они формируют одну молекулу воды. Поэтому, если у нас есть объем вещества, содержащий несколько атомов кислорода и несколько атомов водорода, согласно теории Дальтона процесс будет происходить до тех пор, пока все атомы не разделятся на пары.

Давайте попытаемся совместить уравнение Дальтона и результаты исследования Гей-Люссака. Возьмем одинаковое количество атомов в равных объемах газа (при одинаковых температуре и давлении) в соответствии с законом Авогадро.

На рис. 12.1 у нас есть правильные величины объемов каждого газа, вовлеченных в химическую реакцию, как это определил Гей-Люссак, взаимодействующие по правилам уравнения Дальтона. Далее, так как мы используем закон Авогадро, количество атомов в каждом объеме должно быть одинаковым, но какое именно это количество – неважно.

По-видимому, в этой схеме есть неточность, поскольку в результате процесса у нас остаются атомы водорода. Это было бы нормально, если бы мы знали, что так и происходит, но экспериментальные свидетельства показывают, что нет. Давайте исключим из нашего

процесса уравнение Дальтона – в конце концов, это были всего лишь его размышления. Вместо этого допустим, что атомы одного и того же элемента в газообразном состоянии могут объединиться, чтобы формировать молекулы, как считал Авогадро, а не существуют в виде отдельных атомов, как того требовал Дальтон.

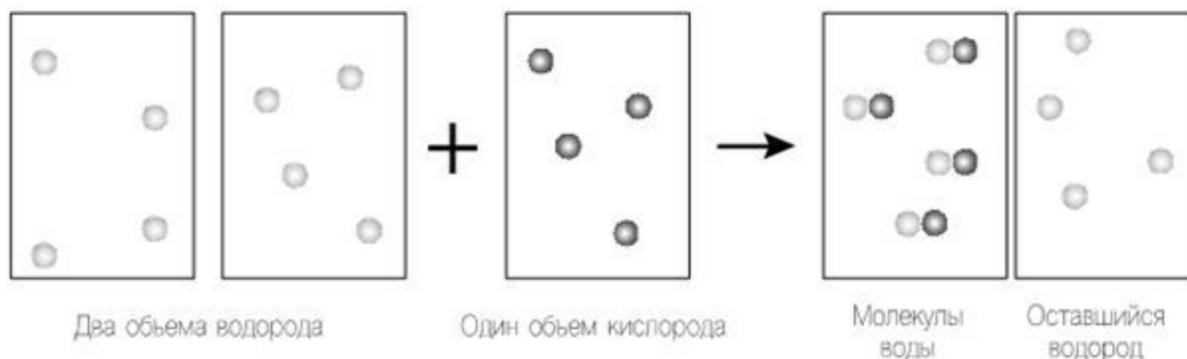
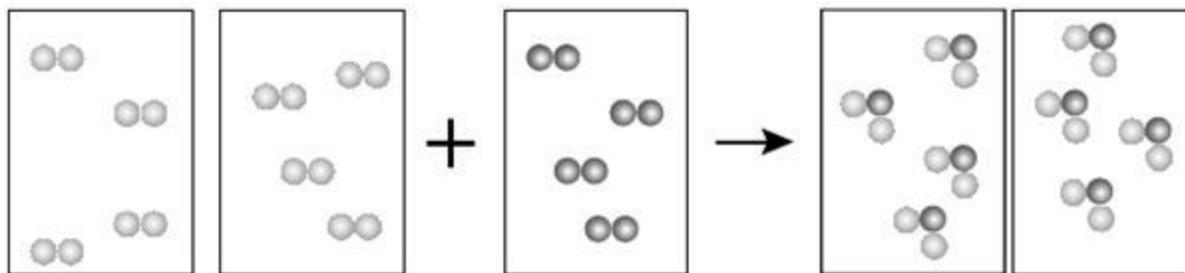


Рисунок 12.1. Следуя теории Гей-Люссака, мы берем два объема водорода, объединяющихся с одним объемом кислорода для создания одного объема водяного пара. Далее мы применяем уравнение Дальтона для объединения объемов. Поскольку объем, давление и температура объемов одинаковы, мы применяем закон Авогадро, сохраняя одинаковое число «частиц», которые в этом случае являются отдельными атомами в каждом объеме.

А именно, давайте предположим, что в водороде и кислороде два отдельных атома объединяются, чтобы сформировать двухатомные молекулы H_2 и O_2 соответственно, а не просто существуют как отдельные атомы H и O . Теперь вернемся к нашему эксперименту, используя только результаты Гей-Люссака для объединенных объемов и закон Авогадро (рис. 12.2).

Так как мы исключили уравнение Дальтона, мы просто возвращаемся к закону Авогадро и используем одинаковое количество частиц в каждом объеме. Единственное оставшееся у нас требование Гей-Люссака напоминает нам, что все атомы водорода и кислорода превратятся в итоге в водяной пар; другими словами, у нас не может остаться свободных атомов, как было прежде. И вот тут мы наблюдаем нечто интересное. Если мы считаем истинными теории Гей-Люссака

и Авогадро, мы видим, что формулой молекулы воды является H_2O – не HO , как считал Дальтон.



Два объема водорода

Один объем кислорода

Два объема молекул воды

Рисунок 12.2. Еще раз рассмотрим результаты исследований Гей-Люссака вместе с законом Авогадро. Однако на этот раз мы игнорируем уравнение Дальтона и вместо этого предполагаем, что водород и кислород существуют как двухатомные молекулы, H_2 и O_2 соответственно. Это соответствует теории Гей-Люссака и закону Авогадро, и в результате не остается «лишних» атомов.

Однако мы в некотором смысле сжульничали; в конце концов, мы предположили, что кислород и водород существуют как двухатомные молекулы. Мы знаем, что это действительно так, но во времена Дальтона это было неизвестно. Даже с исключением допущения Дальтона и применением результатов Гей-Люссака с законом Авогадро у нас остается еще множество вариантов. Все, что мы сделали, так это обнаружили один достаточно хорошо (и, как известно сегодня, правильно) работающий принцип. Таким образом, остается вопрос: как мы согласуем все эти методы и результаты?

В то время как закон объемных отношений Гей-Люссака и закон Авогадро решают не только проблему того, как соединяются водород и кислород при образовании воды, они все же вынудили нас отклонить предположение Дальтона о том, как объединяются атомы (правило наибольшей Дальтона). Более того, изучая различные реакции, а не только одну, как это сделали мы, можно достигнуть соответствия между разными реакциями, придя к правильным химическим уравнениям. На самом деле у Авогадро было собственное простое

правило. Он утверждал, что верное уравнение для данной химической реакции будет согласовываться с уравнениями других связанных химических реакций, а также результатами Гей-Люссака и его, Авогадро, законом.

Закон Авогадро был совершенно новым взглядом на атомы газа. То, что у газов при равном объеме, температуре и давлении одинаковое количество частиц, будь это атомы или молекулы, также означало, что внутри газа имеется большое количество свободного пространства и что атомы не находятся в постоянном контакте друг с другом. Далее, предполагая, что атомы газа могут объединиться, формируя молекулы, бросало вызов популярной идее, что одинаковые атомы могут только отталкивать друг друга.

В 1811 году эта идея была не слишком популярна, а Авогадро не предложил разумного доказательства. Он не вычислил и не определил экспериментально количество частиц, занимающих данный объем при постоянном давлении и температуре, чтобы показать, что оно одинаково независимо от вида частиц. По этой причине идеи Авогадро оставались забытыми в течение почти полувека.

Понятие атома и его роли в химии все еще оставалось предметом открытого спора. В целом все были согласны, что предположение, будто вещество состоит из атомов, было хорошим инструментом для химических реакций и наглядного отображения структур молекул, которые формировались. Означало ли это, что вещество по природе состоит из неделимых микроскопических частиц, которые следует называть атомами, – было совсем другим вопросом. Нехватка однозначного метода для определения относительной (и, конечно, абсолютной) массы атомов и молекул и их химических формул привела к возникновению нескольких несовместимых атомных теорий. Тем не менее атомная теория, так или иначе, внесла свой вклад в химию.

Поворотный момент наступил в 1858 году (спустя два года после смерти Авогадро), когда Станислао Канниццаро опубликовал статью, показывающую, что работа Авогадро, за незначительными исключениями из общего правила, позволяла определить относительные массы многих веществ, существующих в газообразном состоянии. Вспомните, что подход Дальтона требовал знания количества исходных материалов, используемых в химической

реакции при создании интересующей молекулы, и предположения, из скольких атомов состоит молекула. Подход, предложенный Канниццаро, сокращал процесс определения относительной атомной массы до почти тривиального измерения удельного веса^[157]. К сожалению, статья Канниццаро в научном сообществе сперва привлекла внимание очень немногих. Но скоро это изменилось.

В 1860 году Канниццаро выступал на международной химической конференции, проходившей в немецком городе Карлсруэ. Его речь произвела большое впечатление на аудиторию, состоявшую главным образом из выдающихся европейских химиков. Позже друг Канниццаро Анджело Павези раздал ту самую брошюру со статьей Канниццаро посетителям. Систему Канниццаро, основанную на законе Авогадро, вскоре приняли.

Успех Канниццаро, утвердившего работу Авогадро как первостепенную в рамках атомной теории, был обязан точным вычислениям. Однако, пожалуй, самым значительным фактором послужило то, что в отличие от Авогадро, Канниццаро обеспечил (практически тривиальные) экспериментальные средства, позволяющие проверить гипотезу. Следовательно, то, что прежде было всего лишь предположением, теперь можно было легко проверить и внедрить. Более того, это произошло в самый подходящий момент.

По сравнению со своими первыми днями атомная теория изменилась. Благодаря первому началу (в формулировке 1850 года) тепло больше не рассматривали как поток частиц (известных как теплород); атомы больше не были покрыты слоем тепла (как предполагал Дальтон), а кинетическая теория благодаря трудам Клаузиуса, Максвелла и позднее Больцмана вступала в свои права.

Революционная работа Максвелла 1860 года описывает атомы газа как частицы,двигающиеся со скоростями, значения которых лежат в четко определенном диапазоне и подчиняются так называемому распределению. Таким образом, атомы газа не только не расположены в определенных местах, как представлял Дальтон, они еще и движутся с разными скоростями. С согласованной теорией относительных масс можно было разработать периодическую таблицу элементов, которая распределила бы их в группы или семьи, выявляя таким образом определенные тенденции в их свойствах. Атомная теория, которая наконец-то работала с экспериментальными данными, дала химикам

средства объяснять химические реакции, а также наконец-то появилась возможность записывать химические формулы.

Броуновское движение

Работа Дальтона и других ученых прочно закрепила статус атома как неделимой частицы, из которой состоит все вещество. К 1860-м годам химическая теория с атомом как ее важнейшим элементом вступила в свои права и, к удовлетворению химиков, дала средства изучать химические реакции количественным путем.

Новая атомная теория допускала точное определение относительных масс. Именно это было целью успешной атомной теории, но, как Дальтон ни старался, его метод во многом требовал догадок. Вернув к жизни закон Авогадро, Канниццаро смог наконец установить надежную систему определения относительных масс для многих атомов и молекул. Это стало переломным моментом, поскольку теперь можно было определить точное количество атомов, которые объединялись во время химической реакции, чтобы сформировать итоговый продукт. В самом деле, закладывалась сильная атомная теория (для химии).

В то время, хотя и было трудно отрицать успех понятия атома в химии, не было никакого реального способа выяснить, не было ли это все просто математической абстракцией. Теория атомов стала инструментом создания химических уравнений и рационализации молекулярных формул, но все еще не было никакого средства экспериментально определить, существуют ли атомы. Из-за отсутствия экспериментального подтверждения многие ученые не принимали атомную теорию, хотя и считали ее эффективным инструментом. Положение атома как основной составляющей частицы материи все еще было под угрозой, пока работа двух физиков, один из которых был теоретиком, а другой – экспериментатором, не изменила все раз и навсегда.

В 1900 году Альберт Эйнштейн (1879–1955) закончил Политехнический институт Цюриха (с 1911 года известный как Швейцарская высшая техническая школа). Не получив должность ассистента на неполной ставке, Эйнштейн отправился на поиски работы. Сменив два места работы, в 1902 году (с помощью отца друга) он получил место технического эксперта третьего класса в швейцарском Патентном бюро в Берне. Для Эйнштейна работа в

патентном бюро была довольно простой, благодаря чему у него оставалось достаточно времени, чтобы сосредоточиться на научных исследованиях. Сам он так описывал это время:

«Практическая профессия – спасение для такого человека, как я; академическая карьера побуждает молодого человека к научному производству, и только сильные характером могут сопротивляться искушению поверхностного анализа».

Действительно, эти семь лет, которые Эйнштейн провел в патентном бюро, были лучшими в его жизни, о чем он сам вспоминал множество раз. В это время он опубликовал не менее 32 работ, и одна из них, написанная в 1905 году, стала кульминацией его трудов.

В этом году в свой самый успешный (и, возможно, любого другого ученого) период научных исследований двадцатилетний Альберт Эйнштейн написал четыре работы, каждая из которых окажет колоссальное влияние на физику, а также получил степень доктора философии в теоретической физике в Университете Цюриха.

Одна из этих работ «О движении взвешенных в покоящейся жидкости частиц, требуемом молекулярно-кинетической теорией теплоты» была нетривиальным дополнением его докторской диссертации («*Новое определение молекулярных измерений*»). В этой работе Эйнштейн рассматривает броуновское движение, которое является движением «больших» частиц^[158] (броуновских частиц) в совершенно неподвижной жидкости^[159].

Ботаник Роберт Броун (1773–1858) исследовал этот тип движения в 1827 году, наблюдая его в микроскоп. Броун заметил, что когда очень мелкие частицы, содержащиеся в частицах пыльцы, рассеяны в воде, они совершают хаотическое движение, как будто непрерывно «наталкиваясь» друг на друга. Сначала он думал, что частицы были «живыми» и состояли из того, что он назвал «примитивной молекулой» живой материи. Однако позже он нашел доказательства обратного, но так и не смог глубже объяснить это движение.

В своих автобиографических примечаниях Эйнштейн описывает свою цель – доказать существование атомов. К этой цели он двигался с 1905 года:

«В данной статье будет показано, что, согласно молекулярно-кинетической теории тепла, тела микроскопического размера, взвешенные в жидкостях, в результате тепловых молекулярных

движений должны совершать такие движения, которые легко могут быть обнаружены микроскопом».

Эйнштейн полагал, что атомы (или молекулы), из которых состоит жидкость, всегда находятся в движении, как описывает кинетическая теория, а причиной движения «броуновских частиц» является постоянное столкновение этих частиц с окружающими их молекулами, что заставляет броуновскую частицу «болтаться». Но как же это было возможно? Даже при низком увеличении неточного микроскопа Броуна, эти частицы все еще были достаточно большими, чтобы их можно было рассмотреть. Тогда как одна молекула воды слишком мала для такого наблюдения^[160], а броуновская частица намного больше нее. На самом деле, если бы мы должны были оценить различие в размере этих двух частиц, мы бы обнаружили, что молекула воды приблизительно в 6700 раз меньше^[161], чем броуновская частица. Трудно предположить, что такая крошечная молекула воды могла оказать какой-либо реальный эффект на намного большую броуновскую частицу – не так ли?

Конечно, с броуновской частицей сталкивается не единственная молекула; броуновская частица сталкивается со всеми молекулами воды, которые окружают ее. Группы молекул воды коллективно воздействуют на броуновскую частицу, заставляя ее наконец сдвинуться с места. Эйнштейн представлял, что в целом движение броуновских частиц возникает из-за двух отдельных эффектов: дрожание броуновской частицы в результате столкновений молекулы воды и ее смещение, из-за которого она со временем перемещается из своего изначального положения.

Диффузия броуновской частицы – результат того, что сила, возникающая из-за сталкивающихся молекул воды, со временем меняется. Это изменение означает, что в один момент времени броуновская частица перемещается на определенное расстояние в одном направлении, в то время как в другой момент времени она перемещается в другом. Таким образом, «толчок» в одной точке и последующий «толчок» в другой в конечном счете приводят не только к движению частицы туда-обратно, но и к тому, что она меняет свое местоположение.

Рассмотрим резиновый шар, который уронили на землю. Шар (скорее всего) будет отскакивать не только вверх-вниз, но и отходить

(диффундировать) от своего начального места приземления. Примерно так же движется и броуновская частица. Эйнштейн знал, что если правильно вычислить и экспериментально подтвердить характеристики перемещения, будет доказано существование атомов. То есть способность молекул воды перемещать броуновскую частицу от ее отправной точки подтвердило бы существование молекул.

Эйнштейн вывел выражение для *среднего квадрата смещения броуновской частицы*^[162]. Давайте потратим одну минуту, чтобы разобраться в нем получше. Представьте себе броуновскую частицу, которая подвергается бомбардировке жидкими молекулами (рис. 12.3). Если при помощи микроскопа мы наблюдаем броуновскую частицу в течение определенного промежутка времени (для этого мы используем секундомер), то сможем определить расстояние, которое она проходит от начального положения за определенный временной интервал. Мы обнаружим, что броуновская частица будет перемещаться на разные расстояния в течение различных промежутков времени. А точнее, броуновская частица перемещается тем дальше, чем больше отрезок времени.

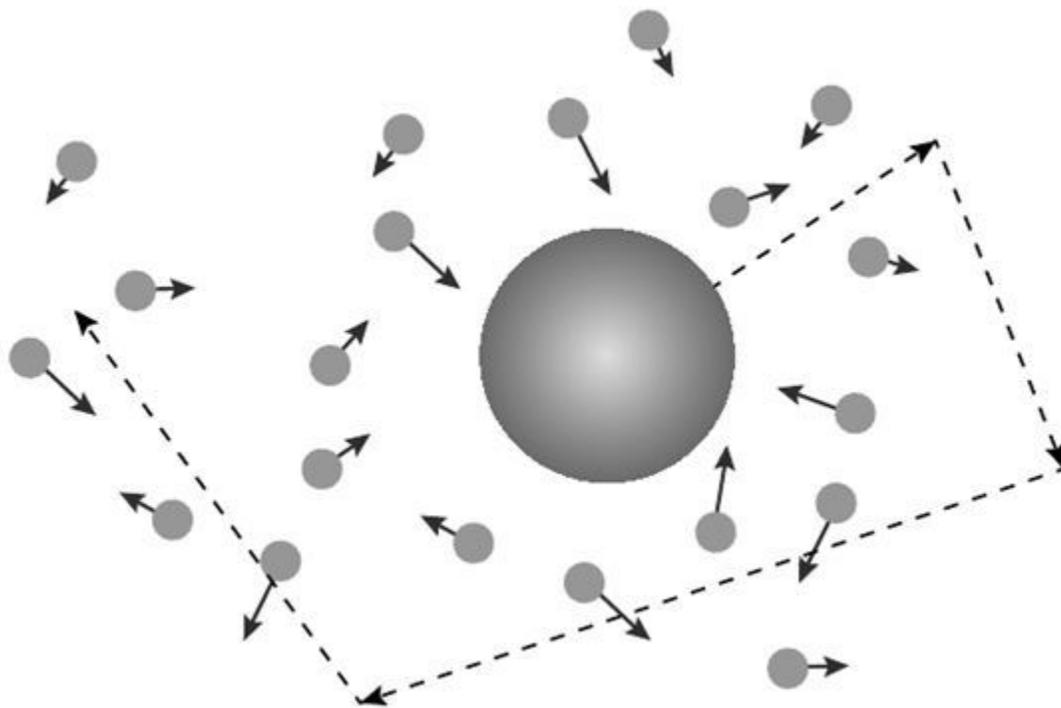


Рисунок 12.3. Броуновская частица (более крупная частица) сталкивается с меньшими частицами жидкости. Постоянные

столкновения с меньшими частицами жидкости вынуждают броуновскую частицу сдвигаться. С течением времени эти движения заставляют броуновскую частицу перемещаться в жидкости (см. пунктирные стрелки).

Давайте вновь проведем аналогию с шаром: чем больше времени проходит, тем дальше шар перемещается от точки касания с поверхностью при первом падении на пол. Подобным образом мы наблюдаем перемещения нашей броуновской частицы за данный временной интервал и вычисляем расстояние, которое она пройдет, и затем мы проделаем это снова и снова, и снова, пока не получим надежное среднее значение, или *среднее смещение* на этот интервал времени.

Давайте подробнее остановимся на *усредненном квадрате смещения* броуновской частицы. Вместо того, чтобы просто рассчитать среднее смещение, мы возводим в квадрат каждое значение смещения за данный временной интервал и вычисляем *среднее* значение этих возведенных в квадрат значений. В конце мы получаем среднее значение за временной интервал. Конечно, это звучит довольно просто. На самом деле сегодня вы легко можете получить предсказанное Эйнштейном значение для среднего квадрата смещения броуновской частицы, используя компьютерное моделирование.

Однако представьте, что вам пришлось бы проделать эксперимент, который мы только что более-менее описали. Именно это в 1909 году сделал Жан-Батист Перрен. В конце концов, после нескольких неудавшихся попыток других экспериментаторов измерить значение для среднего смещения, получавших значение, превышавшее предсказанное Эйнштейном^[163], Перрен подтвердил результаты вычислений Эйнштейна. Это позволило закрыть вопрос о существовании атомов.

Фридрих Вильгельм Оствальд, противник существования атомов, в 1909 году наконец признал эту теорию: «Теперь я убежден, что недавно, спустя сотни и тысячи лет, мы получили экспериментальные данные дискретной природы материи, ее атомного строения». Однако другой исследователь, Эрнст Мах, остался противником теории атомов на всю жизнь.

В качестве бонуса уравнение Эйнштейна также дало и новое подтверждение числу Авогадро^[164]. Идеи Эйнштейна утвердили положение кинетической теории, которая описывает (среди прочего) атомы и молекулы как частицы, постоянно находящиеся в движении. Вычисления Эйнштейна включали статистические методы, например методы Максвелла и Больцмана. На самом деле в своем выражении он использовал более общий вариант уравнения Больцмана для энтропии.

В 1906 году Больцман вернулся домой в Вену из Калифорнии, не зная о работе Эйнштейна; позже в этом году Больцман покончил с собой после многих лет борьбы с приступами депрессии. Работа Эйнштейна, содержащая доказательства существования атомов и принимавшая во внимание кинетическую энергию, подходила к поведению вещества статистически и действительно понравилась бы Больцману (а также Максвеллу и Клаузиусу).

Строение атома: части частиц

Атом всегда был синонимом *неизменного, неразрушимого и неделимого*. Его представляли как самую маленькую частицу материи, из которой состоит окружающий мир. Однако сегодня мы знаем, что атомы состоят из отрицательно заряженных электронов, положительно заряженных протонов и незаряженных нейтронов. Большая часть массы атома приходится на ядро, которое состоит из нейтронов и протонов (за исключением атома водорода, который содержит всего один протон в ядре). Остальная часть атома состоит из крошечных электронов – один электрон в 1836 раз легче, чем протон (у протона и нейтрона примерно одинаковая масса).

Одна из наиболее ранних моделей строения атома предполагала положительно заряженное ядро в центре, в то время как электроны перемещались по орбитам вокруг него. Между орбитами электронов и ядром имеется большое количество свободного места (это правда, атом состоит из большого объема пустоты). В части 4 мы увидим, что эта модель атома помогает понять его природу, хотя она и была изначально некорректна. Таким образом, атом оказался сложнее, чем думали первоначально. Действительно, атом – элементарная составляющая вещества, но даже у нее есть собственная внутренняя структура.

Появление правильного описания этой структуры стало проблемой для методов классической физики, которая показала явные недостатки, при работе со «слишком маленькими частицами». Требовался совершенно новый способ описать не только вещество, но даже, например, свет. Понимание «неизменного» атома в значительной степени изменило все и ознаменовало новую эру физики и рождение *квантовой механики*.

Часть 4

Неопределенность: квантовая механика

Глава 13

Дискретный

Хитрый секрет энергии

Чем больший успех приобретает квантовая механика, тем глупее она выглядит. Как бы насмехались над ней обыватели, если бы имели возможность проследить ее своеобразное развитие!

Альберт Эйнштейн, немецкий физик (1879–1955)

К 1900 году мы прошли большой путь в понимании энергии. Первый закон, установленный около 1850 года, гарантировал, что вся энергия сохраняется: она никогда не создается из ничего, не исчезает, а просто переходит из одной формы в другую.

Сейчас нам понятно, что теплота – именно форма энергии, а не какая-то *невесомая жидкость*, когда-то известная как *теплород*. Существование атомов как фундаментальных составляющих материи приобретало всеобщее признание, помогая вновь подтвердить сформулированное гораздо раньше предположение, что теплота является результатом их движения. В самом деле, кинетическая теория и статистическая механика принесли результаты, согласующиеся с экспериментами, предположив само существование атомов. Через работы Максвелла и, особенно, Больцмана связь между *макроскопическим* миром, который мы видим вокруг нас, и *микроскопическим* миром атомов, который мы непосредственно не наблюдаем, становилась яснее. «Сообщницу» энергии, энтропию, четко доказывало второе начало термодинамики. А Больцман показал, что связь энтропии с атомами заключена в наборе расположений, или *микросостояний*, которые атомы переживают, двигаясь, с течением времени; чем больше расположений, или микросостояний, доступно системе атомов, тем больше ее энтропия. Ах, да, наше понимание

энергии и ее спутников выглядело весьма полным. К сожалению, это и близко не было верным.

Тепловое излучение

Когда объект нагрет, происходит нечто довольно интересное. Помимо того, что он становится горячим, он также светится, или дает *тепловое излучение*. Многие из нас, вероятно, знакомы с тем, как меняет цвет нагревательный элемент электрической печки, когда он становится горячее, начиная с тускло-красного и потом алая с повышением температуры. На самом деле, если бы мы были способны повысить температуру еще больше, то обнаружили бы, что свечение нагревательного элемента переходит от красного к более голубому.

В терминах *частоты* теплового излучения оно переходит от низких к высоким, как и температура. Хотя мы наблюдаем отдельный цвет, горячий объект (например, нагревательный элемент печи) обычно испускает тепловое излучение в непрерывном наборе цветов, или частот, называемых *частотным спектром* объекта для данной температуры. В общем случае любой предмет с температурой выше абсолютного нуля, 0 К (градусов Кельвина), будет излучать^[165]. Это как будто невинное свойство материалов оказалось просто невозможно объяснить согласно физике начала XX века, что указывало на необходимость совершенно нового подхода.

Наш рассказ о тепловом излучении и учении о частотных спектрах, называемом спектроскопией, начинается с Густава Кирхгофа (1824–1887). Кирхгоф, помимо других вещей, изучал частотный спектр Солнца, очень горячего объекта. Ранее, примерно в 1814 году, Йозеф Фраунгофер (1787–1826) также изучал спектр Солнца. Фраунгофер заметил, что, когда он пропустил свет, излученный Солнцем, через *дифракционную решетку*^[166], получился спектр цветов (как в радуге^[167]) от красного до фиолетового, который оказался «преимущественно непрерывным», за исключением некоторых «черных линий», которые создавали впечатление, будто что-то в спектре не хватало. Фраунгофер картографировал более 570 из этих черных линий солнечного спектра, обозначая самые заметные из них латинскими буквами от А до К, а слабые – другими буквами. Однако он так и не смог объяснить их происхождение.

В подобном эксперименте Кирхгоф тоже обнаружил эти таинственные черные линии. Однако он также заметил кое-что еще более интересное. Кирхгоф работал вместе с Робертом Вильгельмом Эберхардом Бунзеном (1811–1899) над спектром, созданным веществом, которое было нагрето пламенем. Бунзен специально разработал для этой цели особую горелку, которая давала почти бесцветное пламя. Благодаря разработке Бунзена, поместив вещество в пламя *горелки Бунзена* и пропустив пучок излученного света через дифракционную решетку, получали спектр, характерный только для того конкретного вещества, а не пламени.

Одним из изучаемых веществ была соль натрия, похожая на поваренную (хлорид натрия). Когда ученые поместили соль натрия в пламя, то обнаружили, что вдобавок к тому, что пламя изменило цвет на желтый, излученный свет после прохождения дифракционной решетки дал спектр, состоящий из двух линий, окрашенных в желтый цвет, которые точно соответствовали двум из линий солнечного спектра, известным как линии *D* (согласно обозначениям Фраунгофера).

Итак, представим спектр Солнца, возникший при прохождении узкого пучка солнечного света через дифракционную решетку. Обратив внимание на этот спектр, теперь представим прохождение узкого пучка света, испущенного пламенем с солью натрия (пучок солнечного света сейчас перекрыт) – так, чтобы этот пучок через дифракционную решетку проходил тот же самый путь, что и свет Солнца. Так Кирхгоф заметил^[168], что две желтые линии спектра натрия и две черные линии *D* солнечного спектра совпали при наложении. Это, несомненно, интригует, но такая связь, если она вообще существует, – не совсем понятна. Но это еще не все. Кирхгоф вернулся к узкому пучку солнечного света, работая с ним как прежде, но теперь позволяя ему проходить через пламя с натрием до дифракционной решетки. Спектр Солнца был таким же, за исключением того, что в этот раз две линии *D* были темнее.

Итак, давайте подведем итоги: спектр Солнца по отдельности показывает две темные линии *D*, которые еще больше темнеют, когда солнечный свет сначала проходит через пламя с натрием, а спектр одного пламени с натрием демонстрирует две желтые линии, перекрывающиеся двумя темными линиями *D* солнечного спектра.

Такое впечатление, что пламя с натрием играет одновременно две роли: фильтрует, или *поглощает*, солнечный свет, чтобы «наличие» – или, точнее, «отсутствие» – двух линий *D* стало более темным; и создает, или *излучает*, собственные две линии *D*, желтые, а не черные.

В 1859 году эта серия экспериментов привела Кирхгофа к важнейшему выводу: любое вещество, способное излучать на данной частоте, должно также и поглощать на той же самой частоте. Более того, на данной частоте излучательная способность вещества в точности равна его поглощательной способности. Это связано с тем (и нам вскоре это будет понятно лучше), что излучение и поглощение атома осуществляются тем же самым путем, а не двумя различными процессами.

Интересный сопутствующий факт: по-видимому, атмосфера над поверхностью Солнца содержит, в частности, горячие пары натрия, которые поглощают некоторую долю излучения, идущего из ядра Солнца, приводя в результате к появлению двух линий *D* натрия, которые при прохождении через пламя с натрием становятся даже темнее. Таким образом, эти эксперименты также сообщают что-то об атмосфере Солнца, находящейся примерно в 93 миллионах милях от Земли.

Кирхгоф перешел к формулировке соотношения между интенсивностью излучения объекта и количеством энергии, поглощенной им на определенной частоте, когда он находится в состоянии *теплового равновесия*. Закон Кирхгофа и задачи, которые были поставлены Кирхгофом в результате, привели теоретиков, как и экспериментаторов, к революции в физике, которая в конечном счете достигла кульминации в *квантовой механике*. Возможно, нам стоит пристальнее рассмотреть эту провоцирующую теорию.

С хорошей точностью, когда вы помещаете еду в духовку и нагреваете ее до определенной температуры, а духовка достигает этой температуры и впоследствии ее поддерживает, система (еда и духовка) в конечном итоге приходит в тепловое равновесие. Допустим, мы поместили индейку в духовку и нагрели ее до 400 °F (204 °C). Как только температура достигла этих градусов и поддерживается некоторое время, мы можем утверждать (для наших целей), что духовка и индейка находятся в тепловом равновесии.

Далее, как мы говорили ранее, мы ожидаем, что индейка и внутренние стенки духовки испускают и поглощают тепловое излучение. Но это вовсе не означает, что индейка станет светиться красным, как электрический нагревательный элемент духовки; материалы все-таки разные. Тем не менее она излучает и поглощает – преимущественно в инфракрасной области спектра, которую мы не можем увидеть просто своими глазами. Поскольку тепловое равновесие установилось, индейка излучает с той же скоростью, что и поглощает. То же самое относится к внутренним стенкам духовки и всему тому, что мы туда добавляем и чему позволяем достичь теплового равновесия. Итак давайте добавим печеную картошку и доведем ее до теплового равновесия. Сфокусируемся только на индейке и картошке.

Чтобы упростить рассуждение и сосредоточить наше внимание на индейке и картошке – вещах, находящихся *внутри* духовки, – давайте заменим духовку «ящиком», который способен поддерживать желаемую температуру всего, что находится внутри. Более того, давайте сделаем стенки такими, что они ни поглощают, ни излучают сами, а идеально отражают излучение индейки и картошки. Вследствие этого излучение и поглощение затрагивает лишь индейку и картошку. Понимание закона Кирхгофа требует от нас понимания двух вещей:

- Часть энергии теплового излучения, испущенного индейкой, приходится на *полное количество* энергии теплового излучения, поглощенного картошкой, и наоборот [\[169\]](#).

- Вследствие теплового равновесия индейка, и картошка будут излучать тепловую энергию в том же темпе, в котором они будут ее поглощать [\[170\]](#).

Эти положения, записанные математически, означают [\[171\]](#):

$$\frac{E_1}{\alpha_1} = \frac{E_2}{\alpha_2},$$

где E – количество энергии, испущенной объектом в единицу времени (это *темп излучения*, или *излучательная способность*), α –

доля энергии, поглощенной объектом, а подстрочные индексы обозначают объекты (например, 1 – индейка, 2 – картошка).

Представим идеальный объект, поглощающий все падающее на него тепловое излучение независимо от частоты. Это означает, что $\alpha = 1$, то есть 100 % излучения, падающего на идеальный объект, поглощается. Такое тело по цвету абсолютно черное, так его и называют – *абсолютно черное тело* (АЧТ). Как мы уже знаем, объект, поглощающий на данной частоте, должен также излучать на ней (при подходящих условиях, например будучи нагретым). В случае нашего абсолютно черного тела мы утверждаем, что, когда оно нагрето (аналогично натрию, помещенному в пламя), оно будет излучать свой спектр – на всех частотах.

Таким образом, если один объект в нашей системе – абсолютно черное тело – скажем, им мы заменим картошку, тогда наше уравнение примет вид:

$$E_1 / \alpha_1 = E_{\text{АЧТ}},$$

и поскольку не имеет значения, каковы точные характеристики других объектов (индейки, картошки и т. п.), мы можем убрать подстрочные индексы в левой части равенства и просто записать:

$$E / \alpha = E_{\text{АЧТ}},$$

что по-простому означает: отношение мощности теплового излучения объекта (излучательной способности) к доле поглощаемой им мощности теплового излучения равно излучательной способности идеального объекта, называемого абсолютно черным телом, излучающим и поглощающим на всех частотах. Обычно это уравнение записывают для определенной частоты ν , а также из нашего обсуждения ясно, что также подразумевается и определенная температура T :

$$E / \alpha = E_{\text{АЧТ}}(\nu, T).$$

Значение данного уравнения заключается в том, что знание спектра излучения абсолютно черного тела (правая часть) дает нам отношение (левая часть) для любого объекта. Другими словами, для любого объекта в состоянии теплового равновесия при температуре T отношение излучательной способности к доле поглощенного излучения на определенной частоте ν является *универсальной функцией*, равной соответствующей излучательной способности абсолютно черного тела на указанной частоте, находящегося в тепловом равновесии при той же температуре. Хотя абсолютно черное тело – идеализированный объект, его фактически можно воспроизвести известными материалами, встречающимися в природе, такими как сажа или графит.

Кирхгоф поставил теоретикам и экспериментаторам задачу найти форму спектра излучения абсолютно черного тела, поскольку считал, что ее решение имеет основополагающее значение:

«Это очень важно найти [спектр излучения абсолютно черного тела]. На пути его экспериментального обнаружения стоят серьезные трудности; тем не менее есть надежда, что его можно найти экспериментально, потому что его форма, несомненно, проста, как и у других функций, с которыми мы познакомились прежде, не зависящих от свойств отдельных тел».

Кирхгоф был прав, ожидая экспериментальных трудностей. На то чтобы собрать достаточные экспериментальные свидетельства, которые позволили бы дать ответ на вопрос Кирхгофа, ушло почти сорок лет. В 1900 году 42-летний Макс Планк наконец решил эту проблему.

Проблема излучения абсолютно черного тела

Макс Планк (1858–1947) родился в Киле (в современной Германии), он был шестым ребенком [\[172\]](#) выдающегося юриста и профессора права Кильского университета, Иоганна Юлиуса Вильгельма Планка, и его второй жены, Эммы Патциг. Культура семьи Планка сказалась на его жизни и работе, наградив стремлением к совершенству в научной деятельности, неподкупностью, преданностью идеалам, надежностью и щедростью.

В 1867 году, когда Планку было 9 лет, его отец получил приглашение в Мюнхенский университет. Семья переехала, и Планк поступил в гимназию имени Максимилиана, где заинтересовался математикой и физикой. Впрочем, Планк преуспевал и в других дисциплинах, особенно в музыке. Таким образом, к выпуску, когда Планку было шестнадцать лет, ему предстояло принять непростое решение в выборе будущего между музыкой и физикой. Он сделал выбор в пользу физики, но музыка продолжила играть важную роль в его жизни. Действительно, Планк был замечательным пианистом (с даром абсолютного слуха), каждый день наслаждающимся исполнением произведений Шуберта и Брамса.

В 1874 году Планк поступил в Мюнхенский университет, собираясь изучать физику. Профессор физики Филипп фон Жолли (1809–1884) отговаривал Планка от такого занятия: «В этой области почти все уже открыто, и остается лишь заполнить несколько пробелов».

Планк мудро оставил этот совет без внимания. Под руководством Жолли Планк проводил эксперименты, единственные в его карьере, в конечном итоге перейдя в теоретическую физику. В 1877 году Планк в течение года учился в Берлинском университете у наиболее выдающихся немецких физиков – Германа Гельмгольца (вспомним часть 1) и Густава Кирхгофа. К сожалению, ни один, ни другой не вызвали сильного вдохновения. Планк вспоминал Гельмгольца плохо подготовленным к лекциям, а Кирхгофа «сухим и монотонным». Между тем, самостоятельно изучая работы вышеупомянутых ученых и Клаузиуса (см. часть 2) по термодинамике, Планк наконец нашел, что искал.

Планк подходил к физике со страстью – с «духовной жаждой», как это описывал Эйнштейн – в поисках вещей, абсолютных и фундаментальных. Он говорил:

«...чрезвычайно важно, что внешний мир – нечто не зависящее от человека, что-то абсолютное, и поиск законов, применяемых к этому единственному, представляется мне самым грандиозным научным стремлением в жизни».

В самом деле, Планк рассматривал поиск абсолютного как «самую благородную и самую стоящую задачу науки».

В 1879 году, когда ему был уже двадцать один год, Планк защитил докторскую диссертацию, посвященную второму началу термодинамики и понятию энтропии. Вообще термодинамика, особенно понятие энтропии, останется центральной темой в ходе почти всех работ Планка. К сожалению, карьера Планка поначалу развивалась медленно, поскольку он был не в состоянии произвести большое впечатление своей работой о понятии энтропии.

Одна из возможных причин – тот факт, что эта область исследования была относительно новой. Когда Планк обнаружил, что большую часть его работы по энтропии уже проделал Джозайя Уиллард Гиббс (1839–1903), он еще больше разочаровался. Более того, его труду по термодинамике разбавленных растворов не хватало химического описания, так успешно примененного другими учеными, например Якобом Хендриком Вант-Гоффом (1852–1911). Однако его усилия не стали напрасными, и навыки, которые он улучшал, в итоге ему помогли.

Хотя варианты формы спектра абсолютно черного тела начали появляться в 60-е годы XIX века, реальный прогресс с экспериментальными успехами пришел только в 90-е годы^[173]. В 1893 году Вильгельм Вин (1864–1928) представил обобщенное математическое выражение для спектра абсолютно черного тела, известное как *закон смещения Вина*. В 1896 году он пошел дальше, дав более конкретное математическое выражение, чем предыдущее. Этот вариант, *закон излучения Вина*, отлично согласовывался с доступными экспериментальными данными, тем самым оказавшись решением, которое давно искали после постановки задачи Кирхгофом, – или так, во всяком случае, казалось.

Между 1887 и 1894 годами Планк потратил бо2льшую часть своего времени на увлекательную новую область физической химии, пионерами в которой были Сванте Август Аррениус (1859–1927) и Вант-Гофф. Как уже говорили, эту работу в основном не заметили, на что Планк позже обратил внимание. Тем не менее она несомненно помогла ему получить место экстраординарного профессора в Кильском университете в 1885 году^[174] и впоследствии, в 1889 году, стать преемником Кирхгофа в Берлинском университете^[175], а в 1892 году – ординарным профессором.

Переезд Планка в Берлин приблизил его к тому, что позже стало эпицентром теоретических и экспериментальных исследований излучения абсолютно черного тела. К 1890-м годам вряд ли кто-то из физиков не знал, что Кирхгоф, Больцман и Вин утвердили свой вклад в термодинамику в решении проблемы абсолютно черного тела. Таким образом, в 1894 году, когда Планк приступил к проблеме абсолютно черного тела, он ожидал, что его любимые средства термодинамики – особенно концепция энтропии, которую он некоторое время оттачивал на проблемах физической химии, – сослужат ему хорошую службу.

Планка соблазнили несколько вещей, связанных с этой проблемой. Во-первых, Планк был заинтересован в сохранении роли термодинамики и концепции энтропии в области электродинамики (учении об электричестве, магнетизме и свете, например тепловом излучении). Также это была важная для физического сообщества проблема, и ясно, что Планк часто обсуждал проблему абсолютно черного тела с коллегами из Берлина, в частности с Вином и Генрихом Рубенсом (1865–1922), каждый из которых принимал активное участие в исследовании АЧТ. Но, что самое важное, Планку эта проблема дала возможность искать нечто абсолютное:

«Измерения Отто [Люммера] и Эрнста [Прингсгейма] из физико-технического института, проведенные для исследования спектра теплового излучения, обратили мое внимание на теорему Кирхгофа, утверждающую, что в полости с идеально отражающими стенками, из которой выкачан воздух и которая содержит совершенно произвольные излучающие и поглощающие тела, со временем установится состояние, в котором тела примут одинаковую температуру, а все свойства излучения – даже его [спектр] – не зависят от структуры и состава тел, а только от температуры. Поэтому этот [спектр теплового

излучения] представляет собой абсолютную величину; и, поскольку поиск абсолютного всегда мне представлялся прекраснейшей (*schönste*) задачей исследования, я охотно принялся за нее».

У Планка был еще один повод работать над проблемой излучения абсолютно черного тела. Несколько электрических компаний поручили ему разработать лампочки накаливания, которые дали бы больше всего света при наименьших затратах энергии.

Планк вообразил ящик с идеально отражающими стенками, содержащий объекты, которые он назвал резонаторами^[176]. Резонаторов много, каждый излучает и поглощает тепловое излучение на различных частотах. Сегодня мы бы уподобили резонаторы Планка атомам или молекулам. Однако Планку не нужно было давать никакой информации о составе резонатора, поскольку, как мы знаем, закон Кирхгофа выполняется независимо от конкретных особенностей объектов в системе.

В самом деле, Планк придерживался этого обобщенного описания во всех своих теориях и использовал его в своих целях на каждом шагу. Получается, что подход Планка имел много общего с методом, используемым Фурье для формулировки своего закона (см. часть 2): они оба концентрировали внимание на общих свойствах системы, имеющейся под рукой, вместо того чтобы увязать в микроскопических подробностях.

В то время Планк не верил в существование атомов и молекул. В самом деле, он был одним из главных оппонентов Больцмана и в 1881 году прямо отвергал атомы:

«При правильном использовании [второе начало термодинамики] несовместимо с гипотезой об имеющих предел атомах. Вследствие этого стоит ожидать, что в ходе дальнейшего развития теории будет борьба между двумя теориями, которая будет стоять жизни одной из них. Было бы преждевременным сейчас предсказывать исход этой битвы; но в данный момент мне кажется, что, несмотря на крупный успех атомной теории в прошлом, нам в конце концов придется от нее отказаться...»

Главной проблемой для Планка было то, что концепция атомов и молекул, и то, как теоретики ее использовали, например, в кинетической теории и статистической механике, подрывало его интерпретацию энтропии. Видение Планка этой физической величины

прямо противоречило микроскопическому варианту Больцмана с его атомами, микросостояниями, и – больше всего – с его вероятностями.

Для Планка энтропия была «абсолютным» законом, не связанным с вероятностным или статистическим поведением, как его описал Больцман. В частности, для Планка стремление системы к равновесию из неравновесного состояния (а конкретней, *макросостояния*, как отмечалось в части 2) должно не только приводить к росту энтропии – как требовало второе начало, – но и сама энтропия должна возрастать *на каждом шагу того пути* к равновесному состоянию.

В 1876 году Больцман уже усвоил урок: критика со стороны Лошмидта заставила его пересмотреть природу второго начала термодинамики. К 1877 году Больцман пришел к заключению, что второе начало по своей природе носит вероятностный характер. В результате Больцман рассматривал возрастание энтропии (требуемое вторым началом), которому подвергается система при стремлении к равновесию из неравновесного состояния, как возрастание *в целом*, происходящее не на каждом отдельном шагу.

Получается, что система может, образно говоря, «сделать два шага вперед и один шаг назад», в том смысле, что для нее возможно перейти из состояния с большей энтропией в состояние с меньшей энтропией, пока энтропия возрастает *в целом* до того, как система достигнет равновесия. И все же с этой ошибкой Планк оказался в хорошей компании.

В 1872 году, когда Больцман написал «Дальнейшее изучение теплового равновесия молекул газа», он не только придерживался той же точки зрения, что и Планк, но и был убежден, что реально ее обосновал:

«...наш результат эквивалентен доказательству того, что энтропия должна всегда *возрастать* или оставаться постоянной [в состоянии равновесия], и поэтому дает микроскопическую интерпретацию второго начала термодинамики».

А в 1903 году молодой Эйнштейн (ему тогда было двадцать три года) также допустил ту же самую ошибку, написав свою единственную на тот год публикацию «Теорию оснований термодинамики»:

«Мы вынуждены предположить, что более вероятные распределения будут следовать за менее вероятными, то есть W [или энтропия] *всегда*

возрастает до того момента, когда распределение становится постоянным, а W [или энтропия] достигла максимума [Курсив мой. – С. Б.]».

Он снова допустил эту ошибку в 1904 году в своей публикации «Об общей молекулярной теории теплоты». Эйнштейн изучал книгу Больцмана с 1901 года, но, по всей видимости, пропустил слегка спрятанное обсуждение замечания Лошмидта, которое сподвигло Больцмана на собственные размышления по данной теме. Наконец, в публикации 1910 года Эйнштейн правильно сформулировал второе начало. Короче говоря, все – и Больцман, и Эйнштейн, и Планк – ошибочно считали, что энтропия системы, переходящей из неравновесного состояния в равновесное, *всегда* возрастает, на каждом этапе перехода. Верно (в терминах теории вероятности), что для системы *наиболее вероятно* увеличивать энтропию на каждом этапе перехода, но *не всегда*. На самом деле основной мотивацией решения проблемы абсолютно черного тела было желание доказать, что энтропия *всегда возрастает*, и это сильно повлияло на способ решения вопроса.

С моделью резонаторов на руках Планк был подготовлен. Представим систему Планка в неравновесном состоянии при некоторой начальной температуре с резонаторами, поглощающими и испускающими тепловое излучение на их различных частотах. Через некоторое время температура изменится, а энтропия необратимо возрастет (см. часть 2). В конце концов система резонаторов придет в равновесие: температура станет постоянной, а энтропия достигнет своего максимального значения.

Планк хотел разработать теорию, описывающую изменяющееся состояние системы при ее эволюции от какого-то исходного неравновесного состояния к равновесному, и в процессе показать, что окончательный спектр теплового излучения резонаторов является не чем иным, как спектром излучения абсолютно черного тела. Более того, Планк хотел создать теорию без использования вероятностей и статистики, иначе она бы запятнала абсолютный характер его видения энтропии.

Планк начал свое исследование в 1894 году, совершив значительный прогресс, убедивший его в том, что можно достичь успеха с подходом, лишенным вероятностной, или статистической, интерпретации

энтропии. Однако к 1898 году, после нескольких уступок критике со стороны Больцмана, Планк понял, что нужен новый подход.

Система резонаторов Планка, взаимодействующих с тепловым излучением внутри идеально отражающих стенок ящика, не была единственной системой, которая необратимо эволюционировала к равновесию из изначального неравновесного состояния^[177]. Рассмотрим неравновесную систему атомов газа. Такую систему будут приводить к состоянию равновесия столкновения между ними. Эволюция будет необратимой, сопровождающейся ростом энтропии. Как только система придет в состояние равновесия, ее энтропия станет максимальной, а сама она достигнет (в случае идеального газа) распределения Максвелла по скоростям, которое будет впоследствии поддерживаться. Все это в 1872 году доказал Больцман в «Дальнейшем изучении теплового равновесия молекул газа». Он посоветовал Планку использовать подобный подход при решении его проблемы. После сильного сопротивления совету Больцмана к весне 1898 года Планк был готов согласиться.

Не то чтобы до этого у Планка не было прогресса. Наоборот, к тому времени его почти четырехлетняя работа дала уравнение, описывающее динамику одиночного излучателя, взаимодействующего с тепловым излучением. Следуя схеме, подобной той, которой придерживался Больцман в 1872 году, Планк смог расширить свое уравнение до «более фундаментального», связывающего среднюю энергию резонатора с общим выражением для спектра излучения абсолютно черного тела, соответствующего системе в равновесном состоянии; фактически у него было уравнение для вещества, находящегося в равновесии с излучением.

Однако если Больцман смог прийти к уравнению, управляющему динамикой системы атомов газа, эволюционирующей от неравновесного состояния к равновесному, Планку, несмотря на использование подхода, подобного примененному Больцманом, не удалось получить такое соотношение для эволюции теплового излучения резонаторов. Таким образом, Планку пришлось оставить надежду доказать абсолютный характер роста энтропии, хотя он сохранял веру в это в течение последующих пятнадцати лет. Однако самым большим разочарованием стало то, что никакие его усилия не привели к точной модели равновесного спектра абсолютно черного

тела. В этой связи Планк снова обратился к своей старой знакомой – энтропии.

Используя свое фундаментальное уравнение и закон смещения Вина, Планк был способен подойти к выражению для энтропии резонатора. Из него он легко получил закон излучения Вина. Вин предложил свой закон излучения, основываясь на очень шатких доводах, вообще не делая строгих выводов. Получается, что Планк первым предоставил реальный вывод этого закона, ставшего известным как закон Вина – Планка.

В начале 1899 года, к моменту пятой публикации Планка, описывающей его усилия, закон Вина – Планка отлично соответствовал экспериментальным измерениям. Хотя он и не достиг своей конечной цели, Планк был убежден, что успешно вывел выражение универсальной функции для спектра абсолютно черного тела, которое Кирхгоф призвал найти около сорока лет назад. Однако его победа была недолгой.

Несоответствие и отчаяние

К весне 1900 года улучшенная экспериментальная методика привела к новым результатам, показывающим расхождение с законом Вина – Планка. Начинало походить на то, что почти шесть лет усилий Планка оказались напрасными. Планк решил, что ошибка лежала в его выводе выражения для энтропии резонатора. Переделав вывод, Планк предложил новое выражение для этой величины и, опираясь на него, смог получить новую формулу для спектра абсолютно черного тела. В этот раз он был прав, и новый результат полностью согласовывался со всеми новыми экспериментальными данными.

Планк мог на данном этапе почивать на лаврах, возможно получив за свои усилия Нобелевскую премию – либо единолично, либо разделив ее с Вином. Однако Планку нужно было понимание «абсолютной» природы своего нового выражения. В конце концов, к тому моменту Планк создал, основываясь на изрядном количестве «гениальных догадок», не более чем эффективное уравнение, касающееся взаимодействия вещества и света, без заметного физического понимания его истинной природы. Оставался следующий вопрос: «Что именно, связанное с веществом и энергией, приводит к планковской форме спектра абсолютно черного тела?»

Чтобы ответить на этот вопрос, Планк снова обращается к Больцману, на этот раз к его работе 1877 года. Планк, прежде стойкий противник статистической интерпретации энтропии Больцмана, казалось, немного передумал:

«Я догадывался, что эту величину [энтропию резонатора] будет возможно рассчитать, введя статистическое рассмотрение, важность которого для второго начала термодинамики впервые продемонстрировал Больцман».

Несмотря на уступки Больцману, Планк не перешел полностью на сторону статистического подхода; у него была своя собственная интерпретация природы вероятности физических явлений. Он также не следовал четко и во всем исходному подходу Больцмана, допуская немного вольности при необходимости. Позже (в 1931 году) Планк будет упоминать эту часть своей программы как «акт отчаяния»,

объясняя это тем, что он «должен был получить положительный результат при любых обстоятельствах и любой ценой».

Отправной точкой «акта отчаяния» Планка было уравнение Больцмана, введенное в части 2:

$$S = k \ln W.$$

Вспомним, что это выражение описывает полную энтропию системы в определенном макросостоянии, или физическом состоянии, для соответствующих микросостояний, полная сумма которых равна W . На самом деле Больцман изначально написал это уравнение в виде пропорции:

$$S \propto \ln W,$$

а не в виде того равенства, которое мы сегодня знаем. Именно Планк позже ввел константу k , которую мы сейчас называем постоянной Больцмана, и указал на ее важность. Кроме того, Больцман предложил метод расчета полного числа микросостояний W , или *сочетаний*, как их называл Больцман.

Это был улучшенный вариант метода Больцмана, предложенного в 1868 году, и он должен был стать новым подходом, дополняющим его работу 1872 года. Больцман рассматривал систему из N атомов газа с постоянной полной энергией E . Микросостояние такой системы будет описывать каждый из N атомов газа как имеющий определенную часть полной энергии. Чтобы сделать такое описание возможным, Больцман представил полную энергию в виде:

$$E = P\varepsilon.$$

Таким образом, полная энергия системы появлялась «порциями», каждая величиной ε , а отдельный атом газа мог иметь энергию $0, \varepsilon, 2\varepsilon, 3\varepsilon, \dots P\varepsilon$.

Представим систему, состоящую из двух атомов ($N = 2$), где энергия разделяется на три порции ($P = 3$), поэтому один атом может иметь возможные энергии $0, \varepsilon, 2\varepsilon, 3\varepsilon$. Единственные возможные микросостояния – с учетом того требования, чтобы энергии всех

атомов в сумме равнялись энергии системы ($E = 3\varepsilon$) – это $(0, 3\varepsilon)$, $(3\varepsilon, 0)$, $(2\varepsilon, \varepsilon)$, $(\varepsilon, 2\varepsilon)$, где первая величина в скобках – это энергия «атома 1», а вторая – «атома 2». Каждое микросостояние обозначает атом (либо 1, либо 2) вместе с соответствующим значением его энергии. Другими словами, мы сделали и энергию, и атомы *различимыми* (нам нужно позже поговорить об этом подробнее). Для произвольного числа атомов газа и порций энергии (любые значения N и P) можно записать общее выражение для W ^[178], а значит, и для энтропии.

Для Больцмана этот подход был просто средством достижения цели. На завершающем шаге он позволил размерам системы подходить под очень большое число атомов. Далее он сделал эти порции энергии очень маленькими. Мы уже видели, что реальные системы, подобные шарикку, заполненному атомами газа, содержат очень большое число атомов, вот почему Больцман рассматривал системы таких размеров; он хотел установить связь с реальными физическими системами. Что касается допущения крайне маленьких порций энергии – ну, оно тоже было мотивировано реальными физическими рассмотрениями.

Больцман рассматривал энергию системы, распределенную порциями, как своего рода прием, математический трюк, который сделал возможным написать выражение для энтропии. Он объяснял:

«Следует признать, прием [порции энергии] не соответствует любой [реализуемой] физической проблеме, а на самом деле является задачей, с которой можно намного легче справиться математически и которая переходит непосредственно в [физическую] проблему...»

Однако в представлении Больцмана, да и почти всех остальных ученых того времени, энергия так себя не вела. Наоборот, энергия считалась *непрерывной*, а не *прерывистой*, или состоящей из порций. Впрочем, у Планка был собственный подход к *методу сочетаний Больцмана*.

К ноябрю 1900 года, понимая, что его гениальная догадка нуждалась в более надежных основаниях, Планк снова обратился к статистической интерпретации энтропии Больцмана и к методу, который он использовал для ее вычисления. Чтобы установить аналогию с больцмановской системой из N атомов газа и постоянной полной энергией E , Планк рассматривает набор из N резонаторов, а не один резонатор, которые имеют одну и ту же частоту ν и их собственные постоянные полные энергии.

Планк получил выражение для энтропии одиночного резонатора с частотой ν , а не набора из N резонаторов. То есть Планк предложил просто разделить уравнение Больцмана ($S = k \ln W$) на N , чтобы получить энтропию одиночного резонатора^[179]. Теперь у Планка было два выражения для энтропии резонатора: то, которое он вывел сам, и новое выражение, полученное простым введением делителя в уравнение Больцмана. Далее, как и с энтропией системы, Планк также рассматривал полную энергию системы как сумму энергий всех резонаторов.

Окончательные шаги Планка просты: использовать метод Больцмана для получения W , которое дополнит измененное выражение для уравнения Больцмана, приравнять этот вариант выражения для энтропии к полученному самим Планком; и затем надеяться на некоторое физическое понимание. Планк продолжил выполнять «математический трюк» Больцмана, деля полную энергию системы на P порций, каждая из которых равна ϵ , распределенных между N резонаторами. Об этом он говорил:

«Если E [полная энергия системы из N резонаторов] считается бесконечно делимой, возможно бесконечное число различных распределений. Мы, однако, рассматриваем – и это важно – E как состоящую из определенного числа одинаковых конечных частей...»

Итак, с энергией в виде порций, как было нужно, Планк посчитал полное число микросостояний (W) для его системы из N резонаторов и соответствующую энтропию и завершил приравниванием выражения для энтропии, полученного методом Больцмана, своему собственному. Он обнаружил кое-что интересное. Короче говоря, чтобы два выражения энтропии были равны друг другу, он просто потребовал, чтобы те маленькие порции энергии равнялись:

$$\epsilon = h\nu,$$

где он ввел другую (в дополнение к постоянной k) постоянную, которую мы сейчас называем постоянной Планка.

То есть, в отличие от Больцмана, рассматривавшего порции энергии как удобный прием и в конечном итоге устранившего их тем, что он сделал их бесконечно маленькими, теория Планка потребовала их существования. И каково было физическое понимание, которое Планк

так отчаянно искал? Очевидно, что оно заключается в том, что энергия *на самом деле* состоит из отдельных порций! Другими словами, если говорить об одном из резонаторов Планка (который сейчас мы бы уподобили атому или молекуле), то разрешенные значения энергии являются *дискретными* ($0, \varepsilon, 2\varepsilon, 3\varepsilon$ и т. д.), а не подчиняющимся какому-то непрерывному распределению. Более того, если энергия резонатора увеличивается или уменьшается при взаимодействии со светом, она должна изменяться на ε – ни на бо2льшую, ни на меньшую величину.

Тогда, в общем, получается, что энергия резонатора рассчитывается по формуле:

$$E_{\text{резонатора}} = m h \nu,$$

где $m = 0, 1, 2, 3, \dots$

Планк представил свой вывод 14 декабря 1900 года. Из своих поисков спектра излучения абсолютно черного тела он вышел победителем. Также он достиг желанного физического понимания взаимодействия вещества со светом. Тем не менее, за это он заплатил большую цену.

Он был вынужден обратиться к больцмановскому методу получения полного числа микросостояний, чтобы получить выражение для энтропии. Тот метод вовсе не был популярным и многие его считали в лучшем случае вызывающим сомнения. Что хуже, в отличие от Больцмана, который в конце концов смог аккуратно устранить те раздражающие порции, Планк остался с ними навсегда, поскольку их устранение привело бы к полному и абсолютному провалу его теории.

Полное признание этого довольно хитрого характера энергии означало, что вся физика, которую Планк знал, навсегда радикально изменится. По вполне понятным причинам Планк не желал принимать роль революционера, и для продвижения концепции прерывной, или дискретной, природы энергии, которую мы сейчас называем *квантами* энергии (или *квантом* в случае одной порции), он сделал очень мало.

Он придерживался идеи, что кванты энергии были математическим артефактом, и надеялся, что будущие усовершенствования его теории приведут назад, к «старой доброй физике» (классической физике) с менее радикальными результатами. Он, как и почти все остальные,

предпочел концентрировать внимание на замечательной точности закона излучения Планка, а не на раздражающих квантах энергии, существование которых он подразумевал. Прошло восемь лет с момента, когда Планк впервые представил свою *квантовую теорию* дискретной энергии, и до момента, когда он смог окончательно признать, что она излагала фундаментальную природу энергии:

«...имеется определенный порог: резонатор совсем не отвечает на очень слабые возбуждения; если он отвечает на более сильные, то только так, что энергия является целым кратным элемента энергии $h\nu$, так что мгновенное значение энергии всегда представляет собой такое целое кратное».

В то время как Планк и другие, возможно, колебались в признании квантов энергии, один человек принял их сразу.

Глава 14

Световые кванты

Частицы и волны: начало

В 1905 году, когда ему было двадцать шесть лет, Эйнштейн опубликовал четыре крупные статьи и закончил свою докторскую диссертацию. Каждая из этих статей была революционной и впоследствии изменила физику навсегда. Однако только первую из них, «Об одной эвристической точке зрения, касающейся возникновения и превращения света», Эйнштейн называл «очень революционной» ^[180] – на самом деле это был единственный раз, когда он сказал такое о какой-либо своей работе – и она, в частности, принесет ему Нобелевскую премию в 1921 году ^[181].

Действительно, представление Эйнштейна о свете было очень революционным, и только почти через двадцать лет его аккуратно включили в физику. В отличие от Планка, Эйнштейну было удобно использовать статистические подходы (такие как кинетическая теория или статистическая механика) для решения физических проблем. На самом деле Эйнштейн потратил значительное время на эти методы.

В цикле из трех публикаций между 1902 и 1904 годами Эйнштейн независимо включил некоторые из идей статистической механики, которые уже были сформулированы раньше Больцманом и Гиббсом. Видимо, Эйнштейн был в некоторой степени знаком с работами Больцмана, но, несомненно, вообще не знал трудов Гиббса. Кажется, что Эйнштейн почерпнул знания о работах Больцмана из «Лекций по теории газов», двухтомного труда, изданного в 1896 и 1898 годах. Это факт вызывает сожаление, поскольку данная работа не должна была быть обзором предыдущей работы Больцмана. В частности, метод сочетаний Больцмана, разработанный в 1877 году, который Планк использовал при получении квантов энергии, упомянут лишь мимоходом, а читателя (наверняка запутавшегося) отсылают к исходному источнику, который, кажется, Эйнштейн не смог найти.

Более того, хотя Больцман был выдающимся лектором, его труды были часто излишне длинными и малопонятными, а основные выводы часто прятались в лесу вычислений. Максвелл говорил о рукописях

Больцмана: «Изучая Больцмана, я не мог его понять. Он не мог понять меня из-за моей краткости, а его длинные рассуждения были и остаются таким же серьезным препятствием для меня».

Возможно это отсутствие близости пошло на пользу Эйнштейну, поскольку дало ему возможность разработать статистическую механику с нуля, поистине построив ее своими руками в первые годы его занятий физикой. Как потом стало ясно, подход Эйнштейна к изучению квантов, или квантовая теория, был по своей сути статистической механикой, и методы, разработанные им в годы становления, сослужили ему добрую службу в его стремлениях в течение более чем двадцати лет, особенно в усилиях по изучению природы света.

Энтропия и гипотеза

Как это было в работах Планка, в статье, написанной Эйнштейном в 1905 году, энтропия также играла важную роль. Эйнштейн был заинтересован в вычислении энтропии системы, состоящей из света, находящегося в ящике с объемом V_0 . Хотя может показаться странным рассматривать ящик, полный света, сама эта система не так сильно отличается от других, которые мы обсуждали, вроде ящика (или воздушного шарика) с атомами газа.

Начав с уравнения (изначально выведенного Вином) и используя закон излучения Вина (не Планка), Эйнштейн получил явное выражение для энтропии света в ящике, S_0 . Затем он перешел к рассмотрению энтропии, возникающей при заключении света в меньший объем V (*под-объем*) внутри ящика. Он нашел разность этих энтропий:

$$S - S_0 = k \ln (V / V_0)^{E / hv},$$

где E – полная энергия света в ящике^[182], а $h\nu$, как в уравнении Планка, – квант энергии.

Теперь, если мы определим W из уравнения Больцмана^[183] выражением

$$W = (V / V_0)^{E / hv},$$

в которое входят величины из уравнения Эйнштейна, тогда мы получим:

$$S = k \ln W + S_0.$$

Дополнительный член S_0 возникает, потому что мы представляем систему находившейся в другом макросостоянии до того, которое рассматривается сейчас и имеет энтропию S . Это более общая форма уравнения Больцмана, которая впервые появилась в статье Планка.

Итак, Эйнштейн рассматривал то же самое изменение энтропии для системы, содержащей N атомов идеального газа^[184]. Атомы идеального газа не взаимодействуют, а точнее, ведут себя независимо друг от друга. Более того, здесь мы говорим о *классическом* идеальном газе, тогда как позже мы обсудим его *квантовый* аналог. Опять же, Эйнштейн рассматривал систему, сначала находящуюся в ящике с объемом V_0 , которую внезапно ограничили до под-объема V .

$$S - S_0 = k \ln (V / V_0)^N,$$

где, в данном случае

$$W = (V / V_0)^N.$$

С физической точки зрения, когда энтропия меняется (из-за изменения объема), эти уравнения говорят нам, что две системы ведут себя одинаковым образом. Когда мы их сравниваем (или, что проще, их выражения для W), то видно единственное отличие – там, где в варианте идеального газа стоит N , в случае света стоит E / hv .

Другими словами, в одном случае имеется N атомов идеального газа, а в другом – полная энергия света E , разделенная на «порции», каждая по hv . Эйнштейн поставил перед собой задачу рассмотреть только излучение с низкой плотностью энергии (или низкой интенсивностью) согласно закону излучения Вина, совсем не используя вариант

Планка^[185]. Более того, реальный газ при низких плотностях хорошо описывается моделью идеального газа.

С этими соображениями и уравнениями Эйнштейн построил оригинальную аналогию между этими двумя системами. Но что это за порции, рассеянные по ящику, полному света? Эйнштейн говорит:

«Монохроматическое излучение низкой плотности энергии (в рамках диапазона применимости формулы излучения Вина) в термодинамическом смысле ведет себя так, как если бы оно состояло из независимых друг от друга квантов энергии, каждый со своей величиной $[h\nu]$ ».

Другими словами, согласно Эйнштейну, свет на данной частоте ν (с низкой плотностью энергии) ведет себя как состоящий из порций $h\nu$ – свет состоит из *световых квантов*. То есть энергия светового кванта такова:

$$E_{\text{светового кванта}} = h\nu.$$

Вспомним, что для Планка эти порции представляли собой части, или *кванты* энергии, которые были распределены между N резонаторами. Но системой Планка был свет, находящийся в равновесии с N резонаторами, где резонаторы выполняли роль материи, тогда как системой Эйнштейна был свет, находящийся в равновесии с самим собой. Для Планка эти порции не имели ничего общего со светом и были исключительно прерогативой резонаторов. Другими словами, если Планк требовал от резонаторов обмениваться порциями энергии, на свет, который вообще-то переносил эту энергию туда и обратно, это требование не налагалось – это немного загадочно. Тогда Эйнштейн продолжает:

«Если с учетом зависимости его энтропии от объема монохроматическое излучение (со значительно низкой плотностью) ведет себя как прерывистая среда, состоящая из квантов энергии со своей величиной $[h\nu]$, тогда кажется разумным проверить, являются ли законы генерации и превращения света такими, что они соответствуют свету, состоящему из такого рода квантов энергии».

Эйнштейн говорит, что если сам свет ведет себя как набор световых квантов, то, возможно, он также ведет себя при взаимодействии с веществом. В этой связи он рассмотрел известные экспериментальные

наблюдения и показал, как их можно интерпретировать с позиции его вновь созданной гипотезы световых квантов. Наиболее заметным из этих явлений, которые он рассматривал, был *фотоэлектрический эффект*.

Как все было – до квантов света

До того, как Эйнштейн в 1905 году вернулся к этой теме, природу света обсуждали много раз. Как и с материей, первые теории света пришли от древних греков. Демокрит, основоположник атомизма, считал, что свет состоит из частиц, мало чем отличающихся от атомов, из которых, как он представлял, состоит вся материя. Аристотель думал, что свет – это «возмущение» того, что он рассматривал как один из четырех элементов – воздуха. Декарт в его «Диоптрике», опубликованной в 1637 году, описал свет как «живое действие», которое проходит через воздух и другие прозрачные тела^[186]. По большей части «возмущение» Аристотеля и «живое действие» Декарта были очень ранними описаниями света как своего рода волны, не то чтобы не похожей на волны в океане.

В 1666 году Ньютон купил свою первую призму^[187], желая опровергнуть волновую теорию света Декарта. В 1672 году он дал краткий отчет о результатах исследования в форме письма Королевскому обществу, и, после небольшого ряда уговоров, его опубликовали в «Философских трудах Королевского общества». Работу Ньютона встретили с большим одобрением, хотя и не единодушным. Однако один критик высказался против Ньютона, начав вражду длиною в жизнь.

С объемной критикой на Ньютона обрушился Роберт Гук, считавшийся в Англии экспертом по теме света. Одним словом, говорили, что Гук провел все те же эксперименты, получил другие выводы, и что Ньютон был откровенно не прав. В 1704 году Ньютон наконец опубликовал полный отчет о своей теории света в «Оптике». Он уже подготовил труд, охватывающий бо2льшую часть его работы в 1672 году, но никогда его не публиковал. Крайне болезненно реагируя на критику, он ждал – более чем тридцать лет – до смерти своего давнего конкурента Гука. Ньютонская теория света связала цвет света с той идеей, что свет состоит из частиц, которые Ньютон называл «корпускулами». При том, что его теория цветов уходила своими корнями в результаты экспериментов с призмами, свет как поток частиц был всего лишь теоретической концепцией. Тем не менее главным образом вследствие известности Ньютона, его

корпускулярная теория господствовала в течение более чем века после публикации «Оптики».

Ньютон думал, что свойства света лучше всего объясняются рассмотрением света как потока частиц. Например, он считал, что его законы движения могут объяснить *преломление* – свойство света, приводящее к тому, что он изгибается при переходе из одного вещества в другое. К примеру, переходя из воздуха в воду, свет будет отклоняться на ее поверхности к перпендикуляру к этой поверхности. Именно из-за преломления света объект, подобный карандашу, частично погруженный в воду, выглядит согнутым, или «разломанным».

Согласно Ньютону, преломление происходит из-за того, что частицы света изменяют направление своего движения (которое вызывает изгиб) вследствие сил, действующих на них на границе раздела двух сред. Для Ньютона и его сторонников корпускулярная теория света также объясняла *отражение*. Если мы представим частицы подобными бильярдным шарикам, тогда отражение является ничем иным, как столкновением частиц света с поверхностью и их «отскакиванием» от нее, что очень похоже на столкновение бильярдного шара с бортом стола, за которым следует только отскакивание назад (или «отражение»). Вдобавок Ньютон чувствовал, что были некоторые свойства, которые волновая теория света просто не могла объяснить, например *дифракцию*.

Дифракция – это свойство волн, позволяющее им огибать предметы и проходить через отверстия. Вот почему в случае звуковых волн звук из одной комнаты часто может слышать кто-то другой, не находясь непосредственно на пути идущего звука; звуковая волна выходит из одной комнаты, распространяясь через дверной проем, в другую, где ее потом слышно ^[188].

Ясно, что свет так себя не ведет. Ведь вы не можете видеть что-то, находящееся за углом, не так ли? Степень дифракции зависит от отношения *длины волны* к размеру отверстия, через которое она проходит. Если длина волны много меньше отверстия, дифракция будет незаметной. Но степень дифракции будет значительной, если длина волны сравнима с размером отверстия, и даже еще более значительной, если отверстие меньше длины волны. Обычно она незаметна, потому что у света достаточно короткие волны – намного

короче в сравнении с длинами звуковых волн. Тем не менее, свет будет дифрагировать, если отверстие достаточно маленькое. Франческо Гримальди (1618–1663) примерно в 1660 году открыл дифракцию света.

Несмотря на доводы Ньютона, Гук опубликовал волновую теорию света в 60-е годы XVII века. В 1678 году Христиан Гюйгенс развил волновую теорию (опубликовав ее в 90-е годы XVII века в «Трактате о свете»), способную объяснить отражение и преломление. Однако конец корпускулярной теории Ньютона ознаменовался в начале XIX века, когда Томас Юнг (1773–1829) провел первую явную демонстрацию волновой природы света, показывая, что он обладает свойством *интерференции*. При подходящих условиях, когда световые волны, идущие от двух отдельных источников, объединяются, покажутся области ярче (*усиливающая интерференция*) и темнее (*ослабляющая интерференция*), чем если бы присутствовал только один из источников. Другие волны, например на воде или звуковые, также демонстрируют этот эффект.

Представим, что мы уронили камень вертикально вниз в спокойное озеро. Он вызовет рябь, или волны, распространяющуюся из точки, где он приземлился (она служит источником). Теперь вообразим то же самое с двумя камнями – возможно, по одному в каждой из ваших рук, широко раскинутых, – и выпустим их одновременно. Ясно, что теперь волны будут исходить от двух источников. Поскольку они продолжают распространяться, появятся такие участки поверхности воды, где волны от одного источника будут накладываться на волны от другого. Более того, на одних участках наложения высота волны (которая связана с ее *интенсивностью*) может увеличиться, тогда как на других – уменьшиться. Это иллюстрирует усиливающую и ослабляющую интерференцию соответственно.

Интерференционная природа света, которую позже подтвердили эксперименты и вычисления Огюстена Жана Френеля (1788–1827) семь лет спустя, нанесли серьезный удар поклонникам корпускулярной теории. Окончательным ударом стало определение скорости света в разных средах. Согласно корпускулярной теории света, скорость должна увеличиваться, когда свет проходит из одной среды в другую, более плотную, как и в случае перехода из воздуха в воду. Однако волновая теория света предсказывала прямо противоположный

эффект: свет должен двигаться медленнее в веществе с большей плотностью, и работа Жана Бернара Леона Фуко (1819–1868) и Армана Ипполита Луи Физо (1819–1896) в 1850 году это подтвердила. Дальнейшее развитие взглядов на природу света в XIX веке привело к тому, что волновую теорию приняли все.

В 1864 году Джеймс Клерк Максвелл опубликовал последнюю из цикла статей по электричеству и магнетизму. В ней он написал (теперь знаменитые) четыре уравнения, которые образуют основу всего классического учения об электричестве и магнетизме. Эта работа и его двухтомный «Трактат об электричестве и магнетизме», опубликованный в 1873 году, объединили электрические и магнитные силы и вывели понимание природы света на абсолютно новый уровень. В своей теории Максвелл описывал свет как *электромагнитную волну* и смог верно рассчитать ее скорость:

«Она [вычисленная скорость] настолько близка к скорости света, что кажется, будто мы имеем серьезное основание заключить, что сам свет (включая тепловое излучение и другие виды излучения, если таковые имеются) является электромагнитным возмущением в форме волн...»

Хотя скорость света уже измерили^[189], концепция света как электромагнитной волны была совершенно новой. К сожалению, Максвелл прожил недостаточно долго (он умер в 1879 году), чтобы дождаться подтверждения данного аспекта своей теории.

В 1887 году Генрих Герц (1857–1894) подтвердил теорию Максвелла, фактически создав электромагнитные волны, предсказанные им. Также Герц и другие ученые продемонстрировали, что эти волны показывают ожидаемые свойства: отражение, преломление и дифракцию. Впоследствии эти результаты утвердили теорию Максвелла и волновую концепцию света в умах всех физиков. До того, как Эйнштейн в 1905 году решил встряхнуть самые ее основы.

Фотоэлектрический эффект

По иронии судьбы в том же самом наборе экспериментов, которые проводил Герц для исследования волновой природы света, описанной теорией Максвелла, он также случайно обнаружил фотоэлектрический эффект. Это явление было небольшим бременем для достопочтенной максвелловской теории света. Когда освещают определенные типы металлов, с поверхности испускаются, то есть выбиваются и становятся свободными, электроны (см. рис. 14.1). Это явление называется фотоэлектрическим эффектом, и с помощью теории Максвелла невозможно было объяснить несколько его особенностей:

- Чтобы электроны были выбиты и стали свободными, частота света, попадающего на поверхность (*падающего* света), должна быть больше определенного значения, которое является характеристикой металла, освещаемого им. Другими словами, имеется граничная частота, и частота падающего света должна быть выше нее, иначе фотоэлектрического эффекта не будет. Это не согласуется с волновой теорией света, которая предсказывает, что электроны будут вылетать при *любой* частоте падающего света, если его интенсивность достаточно велика.

- Как только частота света превышает граничное значение, электроны начинают вылетать с определенной скоростью, или кинетической энергией. В то время как число вылетающих электронов пропорционально интенсивности света, кинетическая энергия, или скорость, с которой они вылетают, нет. На самом деле их кинетическая энергия определяется частотой света, а не его интенсивностью.

- Электроны вылетают почти сразу после того, как их выбивает свет. То есть эффект почти мгновенный. Это происходит даже при низкой интенсивности света.

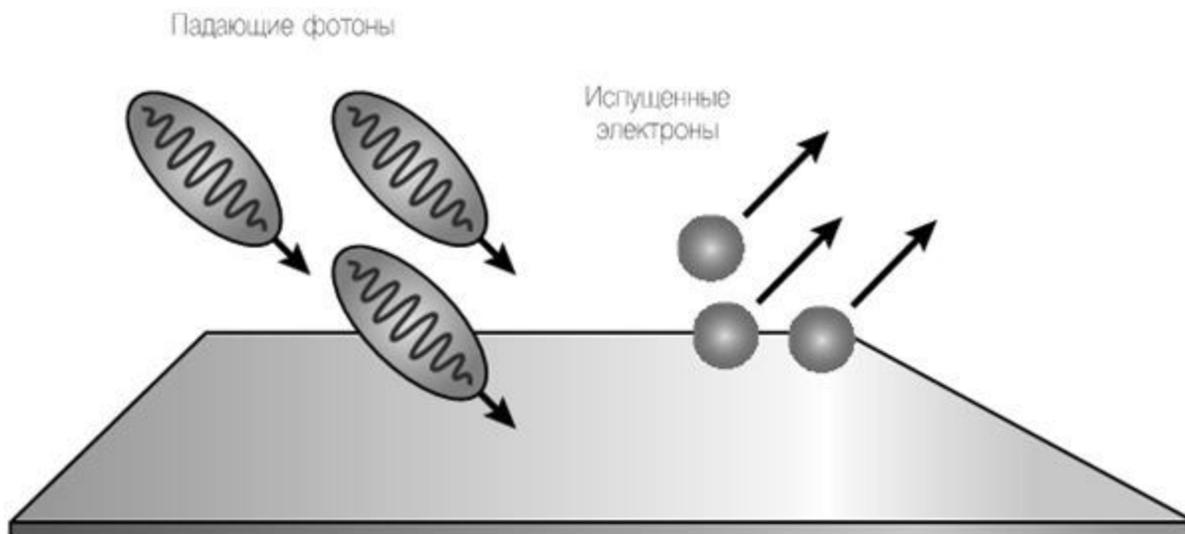


Рис. 14.1. Приходящие (падающие) фотоны энергии $h\nu$ попадают на поверхность металла. Так они выбивают электроны, и те освобождаются от притяжения со стороны металла.

Эйнштейн ясно видел решение всех этих трудностей. Как мы обсуждали раньше, он предположил, что свет состоит из квантов. Другими словами, свет состоит из *частиц* с энергией $h\nu$ у каждой, которые мы сегодня называем *фотонами*. Таким образом, когда свет облучает металл, фотон может столкнуться с электроном и передать ему свою энергию $h\nu$. Эта передача энергии почти мгновенна, поскольку энергия фотона не распределена по большому объему, а сконцентрирована, поэтому передача столь быстра. Итак, когда фотон ударит по электрону, последний улетит за пределы металла, только если энергия фотона «достаточна». Что мы понимаем под достаточностью?

Притяжение между электроном и атомом, с которым он связан, удерживает отдельный электрон в металле; положительно заряженное ядро атома удерживает отрицательно заряженный электрон и не дает ему просто так улететь от него ^[190]. Поэтому фотону нужно иметь достаточную энергию, чтобы освободить электрон от этой силы притяжения. Это минимально необходимое количество энергии – всего, что меньше, будет недостаточно для освобождения электрона. Это объясняет вышеупомянутую граничную частоту.

У фотона должна быть определенная частота ν , то есть определенное количество энергии $h\nu$ (поскольку h – это постоянная), чтобы он мог освободить электрон из тисков атома. Минимальное

количество энергии называется *работой выхода* W – работой, которую нужно произвести, чтобы электрон освободился, – и она является неотъемлемым свойством металла. Более того, она объясняет, почему фотоэлектрический эффект наблюдают только при свете с частотой выше определенной, а не при любой, если интенсивность достаточно велика, как это предсказывается в волновой теории.

Согласно фотонной концепции, чем больше интенсивность, тем больше фотонов с одинаковой энергией. Пусть даже у нас больше фотонов, если у них нет минимальной энергии (работы выхода W), требуемой для освобождения электрона от атома, то ничего не произойдет. А что если энергия больше, чем работа выхода? Что случится с оставшейся энергией? В конце концов, нам известно, что она не исчезает просто так, поскольку, как мы узнали из части 1, энергия сохраняется.

Оставшаяся энергия уходит на сообщение скорости электрону, с которой он улетает. Чем больше энергии остается, тем больше будет скорость электрона при его вылете из металла. На самом деле, чтобы электрон улетел, нужно немного больше энергии, чем просто работа выхода. Как упомянуто, бо2льшая интенсивность означает больше фотонов, и больше фотонов с «достаточной» энергией приведут к тому, что больше электронов вылетят из металла.

Другими словами, при достижении граничной частоты увеличение интенсивности непосредственно увеличит число электронов, покидающих металл. Однако она не повлияет на скорость, с которой они улетают; на нее влияет лишь частота фотона, ударяющего по электрону. Вспомним, что скорость является результатом «оставшейся энергии», о которой мы говорили выше. Сумма того количества энергии и работы выхода W равна количеству энергии, которую имеет фотон, $h\nu$, и которая зависит только от частоты ν фотона. Мы можем суммировать все эти результаты в простом уравнении, впервые написанном Эйнштейном:

$$h\nu = K_{\max} + W,$$

где K_{\max} – максимальная кинетическая энергия, которую может приобрести электрон. Ясно, что это просто уравнение для закона сохранения энергии, подобное тому, о котором мы говорили в части 1, с тем единственным отличием, что сейчас мы говорим о сохранении энергии микроскопических частиц – даже они сохраняют энергию.

Световые кванты Эйнштейна и уравнение сохранения энергии успешно объяснили фотоэлектрический эффект и другие явления которые волновая теория света и теория Максвелла объяснить не смогли. Вы, наверно, воображаете, что физическое сообщество встретило такой прорыв с распростертыми объятиями. К сожалению, нет.

Одинокий исследователь

Концепцию фотонов Эйнштейна встретили с огромным сопротивлением, и прошло почти двадцать лет с ее введения до того, как ее полностью приняли. Общий настрой этого сопротивления можно ощутить в следующей выдержке из письма с рекомендациями, написанного Планком, Эмилем Варбургом (1846–1931), Вальтером Нернстом (1864–1941) и Генрихом Рубенсом (1865–1922) в 1913 году, чтобы Эйнштейна приняли в Прусскую академию наук: «На самом деле не надо предъявлять ему больших претензий за то, что он иногда не достигал цели своих рассуждений, как, например, в гипотезе световых квантов...»

Аргументы оппозиции были ясны: Эйнштейн осмелился бросить вызов волновой теории света, которая зарекомендовала себя, успешно объясняя физические явления, особенно под управлением теории Максвелла. Поэтому вмешательство в нечто, давшее так много объяснений, оскорбило многих физиков.

Планк также столкнулся с неприятием его идеи о квантах энергии, но не с таким, которое терпел Эйнштейн за свои световые кванты, или концепцию фотонов. Вспомним, что, согласно предположению Планка, кванты добавлялись к энергии резонаторов при их взаимодействии со светом. Из этого можно сделать разумный вывод, что, когда свет и вещество взаимодействуют, в результате энергия вещества всегда оказывается квантованной. Планк так и не осмелился затронуть волновую природу света, или теорию Максвелла, с помощью попытки *проквантовать* энергию света, что так решительно сделал Эйнштейн. Планк не хотел иметь с этим дел – он всего лишь выступал за свою теорию – о чем совершенно четко заявил в своем письме Эйнштейну 1907 года:

«Я ищу значения кванта действия [светового кванта] не в вакууме, а скорее там, где происходит поглощение и излучение, и [я] предполагаю, что все, что происходит [со светом] в вакууме, описывается строго [теорией] у Максвелла».

И снова на встрече физиков в 1909 году:

«Я считаю, что сперва нужно попробовать переместить все сложности квантовой теории в область взаимодействия материи с

излучением».

Мне всегда было интересно, что Планк был способен сделать различие между квантами энергии, добавляющимися к его резонаторам (при их взаимодействии со светом), и материей в целом, но не самим светом. То есть для Планка свет и вещество могли быть в равновесии, передавая энергию друг другу, но для вещества эта передача энергии (либо поглощение, либо излучение) к свету должна быть квантована, а для энергии света – нет, у Планка энергия самого света не была квантована. Кажется довольно однобоким, не так ли? Возможно, Планк не хотел низвергать основы сильнее, чем он уже успел.

Отказ Планка посягать на теорию Максвелла и волновую природу свету снизил возражения к его варианту квантовой теории. Более того, у Планка в распоряжении были превосходные экспериментальные данные, которые не только помогли ему в разработке своей теории, но также подтвердили без всякого сомнения его выражение для спектра излучения абсолютно черного тела. На самом деле было достаточно просто взять выражение Планка и сравнить его с экспериментальными данными, и, сделав это, бесспорно, любой увидел бы, что они отлично согласуются.

Так, хотя можно было сомневаться в том, как Планк получил этот результат – а многие физики сомневались – даже самым заядлым скептикам было трудно представить, что он хотя бы что-то сделал неправильно. У Эйнштейна ничего такого не было. Его главным выражением было уравнение сохранения энергии, которое мы обсуждали. Но, в отличие от Планка с его спектром абсолютно черного тела, Эйнштейн не располагал высококачественными экспериментальными данными для сравнения. Ему предстояло более десяти лет ждать подобных результатов.

В 1916 году, когда они появились благодаря работе Роберта Милликена (1868–1953), тот был не очень-то признателен теории Эйнштейна:

«Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта... в каждом случае как будто бы предсказывает наблюдаемые результаты. ...И все-таки пока еще [корпускулярная] теория, с которой Эйнштейн получил свое уравнение, кажется полностью неприемлемой».

В следующей статье Милликен назвал гипотезу световых квантов Эйнштейна «смелой, если не сказать безрассудной, теорией электромагнитной световой [частицы]».

Таким образом, хотя его собственные эксперименты демонстрировали, что уравнения Эйнштейна для фотоэффекта (сохранения энергии) были верны, Милликен отказывался верить, что свет состоит из частиц, называемых фотонами. То есть, хоть Милликен и не отрицал, что его результаты подтвердили правильность уравнения Эйнштейна, он не желал верить, что лежащий в основе механизм, ответственный за уравнения, имеет что-то общее с фотонами Эйнштейна.

Но эти чувства во многом разделяли большинство физиков, и это ясно проиллюстрировал текст решения по Нобелевской премии, присужденной Эйнштейну в 1921 году: «За заслуги в теоретической физике и особенно за открытие закона фотоэлектрического эффекта».

Определенно, Эйнштейн получает признание за «закон фотоэлектрического эффекта», другими словами, за его фотоэлектрическое уравнение, а не за концепцию фотонов. Этот подход сохранится до 1923 года, когда новые экспериментальные результаты обратят практически всех в веру в существование фотонов – подробнее об этом ниже.

До этого же Эйнштейн был одинок в своих стремлениях. Непокколебимый в своей приверженности, он продолжал исследовать квантовую природу света, продвигая фотонную концепцию и заодно квантовую теорию в целом.

Пересматривая взгляды Планка

В своей статье 1905 года Эйнштейн отстранился от Планка, чтобы разработать собственный вариант квантовой теории, а именно концепцию, согласно которой свет состоит из частиц, или световых квантов, которые потом стали называться фотонами. Двумя из крупнейших неправильных представлений о содержании этой статьи являются то, что эта статья была посвящена только фотоэффекту – а она не была; и что Эйнштейн просто развивал работу Планка – тоже неверно. В 1906 году Эйнштейн переосмыслил свою работу 1905 года в духе Планка, показывая, что своим выводом Планк неявно использовал концепцию световых квантов Эйнштейна. Думая над этим, Эйнштейн сказал:

«В то время [в 1905 году, когда я впервые предложил гипотезу световых квантов] мне казалось, что в определенном смысле теория излучения Планка представляет собой аналог моей работы. Новые рассуждения... показали мне все же, что теоретические основания, на которых зиждется теория излучения г-на Планка, отличаются от тех, которые были бы выведены из теории Максвелла и электронной теории именно потому, что теория Планка неявно использует вышеупомянутую гипотезу световых квантов».

Используя методы статистической механики, разработанные им в 1903 году, Эйнштейн напрямую вывел выражение для энтропии системы резонаторов Планка без требования использовать метод Больцмана, как делал Планк. Вместо этого все, что нужно было Эйнштейну для завершения связи с вариантом Планка, – это дальнейшее постулирование того, что энергия резонатора могла иметь значения, только равные целому кратному ϵ .

Получается, что если Планк пришел к этому заключению через сравнение своего вывода выражения для энтропии с полученным методом Больцмана, Эйнштейну просто нужен был свой собственный вывод и гипотеза световых квантов. Более того, Эйнштейн настаивал на том, что энергия резонатора может только меняться «скачками» посредством излучения или поглощения фотона с энергией $\epsilon = h\nu$; если энергия резонатора уменьшается или увеличивается, что происходит при излучении или поглощении света резонатором соответственно, то

изменяться она должна на величину ϵ – ни на большую, ни на меньшую.

То есть Эйнштейн предложил физический механизм взаимодействия между веществом (резонатором) и светом, а также установил взаимосвязь со своей гипотезой световых квантов. Эта более сложная картина равновесия между веществом и светом, отсутствовавшая в исходном варианте теории Планка, наделила ее реальными физическими чертами.

Природа света была колоссальным источником забот для Эйнштейна. В 1908 году он писал другу: «Я все время думаю над вопросом состава излучения... Этот квантовый вопрос настолько чрезвычайно важен и сложен, что каждому стоит заняться им».

Действительно, Эйнштейн пытался понять общие свойства света. Для этого, если в 1905 году он уделял внимание в основном свету с низкой плотностью энергии, или высокими частотами, то в 1909 году он искал понимание света в его полном диапазоне частот в соответствии с распределением Планка. То, что он обнаружил, навсегда изменило наше представление о свете.

Двойственная природа света

В 1909 году Эйнштейн снова обратился к своим методам статистической механики. В частности, он имел дело со статистической механикой *флуктуаций*, которым подвергается система, что он впервые рассмотрел в 1904 году. Флуктуации – это естественные отклонения, испытываемые системой, от среднего значения величины, описывающей некоторое свойство этой системы. Физически флуктуации возникают из-за того, что значение величины в данный момент времени берется из определенного распределения, или диапазона значений; значение не является навсегда зафиксированным. Вы уже знакомы с тем, что система атомов идеального газа в состоянии равновесия подчиняется распределению Максвелла.

Более того, в общем случае такая система будет подчиняться распределению Больцмана по полной энергии. Это два известных примера: такие физические распределения описывают диапазон возможных значений, которые способна принимать величина, являющаяся свойством системы, и из этого диапазона получают

среднее значение вместе с соответствующей флуктуацией (или отклонением) от этого среднего. В 1904 году Эйнштейн показал, что такое статистическое объяснение также применимо к свету. Это было началом нескольких успехов, достигнутых Эйнштейном в применении статистической механики к свету.

В 1904 году вариант метода флуктуаций Эйнштейна увенчался уравнением, которое уже получил Гиббс, но, по-видимому, Эйнштейн его не знал. В 1909 году Эйнштейн заново вывел уравнение, в этот раз используя подход, который был полностью его. Непосредственно применив уравнение, он вычислил флуктуации энергии для излучения абсолютно черного тела (в малом интервале частот). То, что он обнаружил, было поразительным: в окончательном выражении для флуктуаций энергий был виден и «волновой элемент», и «корпускулярный элемент».

Другими словами, в отношении его флуктуаций в энергии свет одновременно ведет себя как волна и как частица (фотон). Затем Эйнштейн перешел к рассмотрению флуктуаций импульса (давления излучения). Но в этом случае он не смог применить свое флуктуационное уравнение. Вместо этого он пришел к своему желаемому результату, рассмотрев «маленькое» зеркало, находящееся в ящике при определенной температуре. Он представил, что зеркало движется только вдоль одного направления (вообразите, что оно движется по рельсам). При движении оно будет испытывать «столкновения» со светом, отражающимся от него. Эти столкновения приведут к двум эффектам. Во-первых, постоянная бомбардировка зеркала светом приведет к сопротивлению, то есть силе трения, действующей на силу, которая замедлит его, заставляя тем самым его потерять импульс. Однако столкновения между зеркалом и светом будут нерегулярными. Нерегулярный характер этих столкновений означает, что, вместо того чтобы испытывать действие постоянной силы со стороны излучения, зеркало подвергается действию флуктуирующей силы, которая все-таки приводит его в движение (если предположить, что она достаточно мала). Потеря импульса зеркалом из-за трения будет в среднем в точности скомпенсирована прибавлением от флуктуирующей силы.

Только что описанная ситуация аналогична рассмотренной в одном из наших предыдущих обсуждений броуновской частицы (в части 3),

движение которой Эйнштейн подробно изучил в 1905 году. Здесь зеркало играет роль «большой» броуновской частицы, подвергающейся бомбардировке «маленькими» частицами света (фотонами). Проанализировав влияние света на импульс зеркала, Эйнштейн смог получить выражение для флуктуаций импульса и обнаружил, как и для флуктуаций энергии, что в нем был и волновой элемент, и корпускулярный.

Примечательно, что во второй статье 1909 года Эйнштейн снова рассмотрел флуктуации импульса, возникающие вследствие давления света. Однако в этот раз он не только рассмотрел зеркало и свет, но и добавил в ящик идеальный газ. Результат был точно таким же. Возможно, ему нужно было убедиться в этом замечательном результате. Он заключил:

«Поэтому, на мой взгляд, следующая стадия развития теоретической физики даст нам теорию света, которую можно понимать как что-то вроде синтеза волновой и [корпускулярной] теорий света».

В своем чрезвычайно смелом намерении Эйнштейн был абсолютно одинок. Планк по-прежнему был не в ладах со следствиями своей собственной теории, и следующая большая волна на область квантового накатилась лишь в 1913 году. Соединение волн и частиц в рамках того, что станут называть *квантовой механикой*, окончательно произошло в 1925 году. Но, как мы увидим, этот вариант «слияния» привел Эйнштейна к разрыву всех отношений с областью физики, к которой он однажды проложил путь.

Тонкий намек на сомнения Эйнштейна в правильности квантовых представлений уже дал о себе знать в 1917 году, когда он завершил три наиболее впечатляющие публикации по квантовой теории света. Мы обсудим это подробнее, но сперва нам нужно посмотреть на следующую большую волну в квантовой теории и то, как она навсегда изменила наши представления об атоме.

Глава 15

Квантовый атом

Возвращаясь к атому

Установление реальности атомов было длинным и сложным процессом. Тем не менее теоретическая работа Эйнштейна 1905 года и последовавшие за ней в 1909 году эксперименты Перрена (см. часть 3) утвердили существование атома раз и навсегда. Казалось, что путешествие подошло к концу, но на самом деле это было только начало.

Всемогущий атом считался фундаментальной частицей вещества, самым основным строительным блоком. Поэтому предполагали, что атом неделим (ведь слово «атом» это и означает). Однако начали появляться свидетельства, что атом сам состоит из фундаментальных элементов, наделяющих его внутренней структурой, которая при определенных условиях все-таки «делима».

В 30-е годы XIX века внутрь атома бегло заглянул в своей работе Майкл Фарадей (1791–1867), чьи эксперименты в области электрохимии привели его к размышлениям о составе атома:

«...Если мы примем атомную теорию или формулировки, тогда атомы тел, одинаковые друг по отношению к другу в обычных химических реакциях, имеют равные количества электричества, связанные с каждым из них по природе».

Но в 30-х годах XIX века было достаточно трудно выступать за атомы, не говоря уже о рассмотрении самих атомов как имеющих внутреннюю структуру, которая порождает «электричество», как рассуждал Фарадей:

«Но я вынужден признать, что завидую понятию *атома*, и хотя очень легко говорить об атомах, довольно трудно сформировать ясное представление об их природе, особенно когда рассматриваются сложные тела».

То есть он обратился к «более приемлемой» концепции электричества как *невесомой жидкости*, отказавшись от возможности существования электрически заряженных частиц, связанных с

атомами. В следующий раз внутрь атома заглянули спустя десятилетия.

В 1895 году Вильгельм Рентген (1845–1923) открыл новый тип излучения, который он назвал «X-лучами» (X указывает на неизвестную природу излучения). Хотя он и не смог определить физический механизм, лежащий за их порождением, но обнаружил, что эти лучи обладают замечательной способностью проникать практически во все, что попадает на пути, включая части тела, что – как мы сейчас знаем – допускает возможность сделать снимок чьих-либо костей.

Это открытие многих удивило. В 1896 году, следуя предчувствию, что определенные соединения урана могут тоже излучать X-лучи, Анри Беккерель (1852–1908) обнаружил, что соль урана, уранилсульфат калия, на самом деле испускает X-лучи. Своевременное открытие для Марии Кюри (1867–1934), искавшей тему для докторской диссертации. Ее работа с солями урана выявила, что уровень радиоактивности прямо пропорционален количеству чистого урана в образце.

Более того, она выдвинула гипотезу, что X-лучи идут прямо из атома урана, тем самым указывая на внутреннюю структуру атома. Это было по-прежнему догадками, но великое открытие внутренних частей атома ждало всего лишь за углом.

Попадая в субатомный мир

Джозеф Джон (Дж. Дж.) Томсон (1856–1940) проводил опыты с катодной лучевой трубкой, которая в то время была довольно популярным прибором. Это стеклянная трубка, из которой выкачан почти весь воздух, или другой газ, с двумя металлическими электродами на концах. При подключении источника высокого напряжения к каждому электроду трубки создается поток электричества, выходящий из одного электрода (катода) к другому (аноду). Если давление газа внутри трубки будет достаточно низким, он будет светиться; катодная лучевая трубка – предшественник современных неоновых вывесок и ламп дневного света. Если понизить давление газа еще больше, то свечение исчезнет, но поток электричества останется. Хотя само течение невидимо, оно

проявляется свечением, возникающим в результате столкновения потока со стеклом. Более того, предмет, размещенный внутри трубки перед катодом, будет «отбрасывать тень» на светящееся стекло. Природа этого потока электричества какое-то время интересовала многих.

В 1897 году Томсон показал, что этот поток состоит из отрицательно заряженных частиц, которые были намного мельче, чем самый маленький атом (атом водорода), позднее их стали называть электронами. Электроны освобождаются из атомов металла, из которого сделан катод. Кстати, в современных вариантах лучевых трубок катод нагревается до таких высоких температур, что электроны становятся свободными, фактически «испаряясь» (это явление называется термоэлектронной эмиссией). Газ внутри трубки служит для прохода этих электронов почти так же, как электропровод в повседневных бытовых приборах, например кофеварках, телевизорах или электроплитках. Проводимость возникает за счет того, что электрон передается от одного атома к другому.

В работе Томсона основной находкой было то, что, независимо от металла, используемого для катода, или газа в трубке, отношение заряда электрона к массе было одинаковым для всех атомов. Это открытие убедило его, что электроны одинаковы для всех атомов. Они одинаковы не только для всех атомов данного типа, или элемента, но и независимо от элемента. Томсон обнаружил первую субатомную частицу. Рассуждая об этом, он сказал:

«Во-первых, немногие верили в существование этих тел, меньших, чем атомы [то есть электронов]. Много позже уважаемый физик, присутствовавший на моей лекции в Королевском институте, даже сказал мне, что думал обо мне, что я “разыгрываю слушателей”. Я не был удивлен, поскольку приходил к этому объяснению моих опытов с большим нежеланием, и только после того, как я убедился, что такого объяснения не избежать, я опубликовал свою веру в существование тел, меньших, чем атомы».

Томсон не остановился на достигнутом, хотя он с полным правом мог. Убежденный в том, что по крайней мере часть внутренней структуры всех атомов состоит из электронов, он принялся за построение модели атома, как и многие другие до него (включая Дальтона). Однако, в отличие от других, Томсон первым включил

электроны в свою модель. Как ему было известно, хорошая модель должна, по крайней мере, объяснять электрическую нейтральность атома и массу.

Электрическую нейтральность относительно просто объяснить: электроны заряжены отрицательно, поэтому их должен окружать положительный заряд, который будет компенсировать суммарный отрицательный заряд всех электронов. Двумерный вариант модели Томсона напоминал бы печенье с шоколадной крошкой, где электроны – это шоколадная крошка, а положительный заряд – все остальное. Почти всю массу атома он отнес к электронам (довольно тяжелые шоколадные крошки).

Модель Томсона дебютировала в 1903 году. Несмотря на хорошее начало, она столкнулась с проблемами. Тем не менее она не уходила в течение некоторого времени, пока в 1909 году новые результаты экспериментов не начали ее разрушать.

В 1895 году Эрнест Резерфорд (1871–1937) приехал в Кембридж на стипендию, чтобы работать с Томсоном. Для Резерфорда это было воодушевляющей и благоприятной возможностью стать молодым физиком-экспериментатором. Прошло всего лишь три месяца с его приезда, когда Рентген объявил в прессе о своем открытии X-лучей; затем, три месяца спустя, появилась начальная статья Беккереля по радиоактивности; и через год – сообщение Томсона об открытии электрона. В 1897 году Резерфорд провел собственное исследование радиоактивности, а в 1898 году сообщил о своем открытии двух новых форм радиации: α -частиц и β -частиц.

Все эти открытия были тем более захватывающими, что были достигнуты с помощью крайне примитивных (по современным стандартам) инструментов, бывших в распоряжении Резерфорда. В 1898 году он занял должность профессора физики университета Макгилла в Монреале. Резерфорд реально был суперзвездой: в 1903 году его приняли в члены Королевского общества; в 1905 году – наградили медалью Румфорда; а в 1908 году, когда ему было всего лишь тридцать семь лет, он был удостоен Нобелевской премии по химии «за проведенные им исследования в области распада элементов в химии радиоактивных веществ». Однако его величайший успех был еще впереди.

В 1907 году он стал профессором в Манчестерском университете. Под руководством Резерфорда Ханс Гейгер (1882–1945) и 22-летний студент Эрнест Марсден (1889–1970) в 1909 году изучили рассеяние α -частиц тонкой металлической фольгой. Они заметили, что изредка α -частицы рассеиваются на углы, превышающие 90° . Результат был поразительным, сам Резерфорд сказал: «Это было самым невероятным событием, которое когда-либо случилось в моей жизни. Оно было почти таким же невероятным, как если бы вы выстрелили 15-дюймовым снарядом по куску папиросной бумаги, а он бы вернулся и попал по вам». Он продолжал: «Я не верил, что [α -частицы] будут [рассеиваться], поскольку мы знали, что α -частица очень быстрая и массивная, с большой энергией».

Итак, при прохождении α -частицы через металлическую фольгу, атом в ней каким-то образом вызывает значительное рассеяние. На самом деле угол рассеяния, превышающий 90° , возможен только тогда, когда предмет, вызывающий рассеяние (атом металла), тяжелее, чем рассеиваемый объект (α -частица).

В модели атома Томсона (печенье с шоколадной крошкой) электроны находятся в большой рассредоточенной толще положительного заряда. Однако α -частица в 8000 раз тяжелее электрона, так что электрон никак не может вызвать рассеяние. Поэтому остается положительный заряд, который должен быть более сконцентрирован, чем представлял Томсон. Через полтора года, в 1910 году, Резерфорд раскрыл тайну. Вместо того чтобы быть рассредоточенным вокруг атома, положительный заряд оказался очень компактным центральным телом, вокруг которого обращаются электроны. Более того, именно в этой центральной части заключена бо2льшая доля массы атома – в противовес утверждению Томсона, что она приходилась на электроны.

Резерфорд пошел дальше и вывел математическую формулу для процесса рассеяния, которую подтвердила серия экспериментов, проведенных, опять же, Гейгером и Марсденом. Формула Резерфорда еще больше впечатляет, если учесть, что он был экспериментатором, особо не заботившемся о теоретической физике и не обладавшем экспертными знаниями в ней; но ни один из физиков-теоретиков не ответил на вызов. Вспомним, что Гейгер и Марсден *случайно* заметили обратное рассеяние α -частиц. Другими словами, большинство α -

частиц проходило вперед, едва отклоняясь от начальных траекторий. Это означало, что между центральным положительным зарядом, или ядром, и электронами, роящимися вокруг него, довольно много пространства.

Модель Резерфорда не сразу завоевала популярность. Оказалось, что даже сам Резерфорд не воспринимал ее серьезно. На первом Сольвеевском конгрессе – грандиозной международной научной конференции, прошедшей в 1911 году – он ничего не сказал о своей новой атомной модели. Год спустя он закончил книгу «Радиоактивные вещества и их излучение» в 670 страниц, посвятив результатам исследований α -частиц всего лишь 3 страницы. Возможно, Резерфорд не считал эти открытия революционными, но был один человек, который понял их важность и перевел атомную модель Резерфорда на новый уровень.

В марте 1912 года Нильс Бор (1885–1962) приехал в Манчестер, чтобы начать работать с Резерфордом. До этого он работал с Томсоном в Кембридже. К сожалению, их отношения были напряженными с самого начала, и их сотрудничество никогда не процветало так, как надеялся Бор. В письме своему брату Харальду Бор сказал: «Пока что иметь дело с Томсоном не так легко, как я думал в первый день».

Возможно, в этом было виновно первое столкновение Бора с Томсоном, когда, войдя в рабочую комнату Томсона, Бор провозгласил: «Это неверно».

Он ссылался на что-то в книге, написанной Томсоном. Конечно, Бор никогда не хотел никого обидеть; вместо это он просто пытался вступить в научную дискуссию с его ограниченным (на тот момент) знанием английского языка. Ситуацию несомненно усугубила неспособность Томсона терпимо относиться к критике. Став старше, Бор размышлял о том времени так: «Все в Кембридже было интересно, но абсолютно бесполезно». Но его положение значительно улучшилось благодаря Резерфорду:

«Резерфорд – человек, на которого можно положиться; он регулярно появляется, спрашивает, как идут дела, и обсуждает мельчайшие подробности работы – такой выдающийся человек, Резерфорд действительно заинтересован в работе всех людей, его окружающих».

Бор с Резерфордом недолго работали вместе, всего около четырех месяцев. В течение этого времени Резерфорд осторожно поощрял

усилия Бора, хоть и был довольно серьезно занят своими собственными попытками написать книгу и новыми исследовательскими интересами. На самом деле основное влияние на научную деятельность Бора оказал не Резерфорд. Вместо этого Бор освоил новую физику благодаря двум другим исследователям, работавшим под руководством Резерфорда: Георгу Хевеши (1885–1966) и Чарльзу Галтону Дарвину (1887–1962). Несмотря на это, модель атома Резерфорда вдохновила Бора и дала ему огромный плацдарм для его собственной работы по атомам, с которой в итоге его всегда ассоциировали. Из Манчестера Бор писал Харальду: «Возможно, я немного узнал о структуре атомов». Каким же преуменьшением оказалась эта строчка.

Атом Бора

Модель Резерфорда была большим шагом навстречу пониманию атома. Согласно экспериментальным данным, собранным Резерфордом и его исследователями, наиболее правдоподобной картиной атома была та, где очень компактное ядро находится в центре, окруженное обращающимися вокруг него электронами. Точнее, можно представить электроны, обращающиеся вокруг ядра-центра подобно тому, как планеты обращаются вокруг Солнца. К сожалению, этот вариант атома неустойчив.

Согласно известным на тот момент законам физики (классической физики) электрон, движущийся таким образом, излучал бы свет, что для электрона является потерей энергии. Эта потеря проявляется в виде уменьшающейся потенциальной энергии электрона, означающей, что он сдвигается к ядру.

Чтобы понять, как потенциальная энергия отрицательно заряженного электрона «ощущает» положительно заряженное ядро, представим резиновую ленту, прикрепленную одним концом к стене, когда мы начали растягивать ее за другой конец. Растягивая ее, мы достигнем момента, когда почувствуем напряжение в резинке, сопротивляющейся дальнейшему растяжению и стремящейся сжаться обратно. В этот момент потенциальная энергия очень велика, но, если мы перестанем растягивать резинку и позволим ей сжаться, сопротивляющееся напряжение уменьшится, как и потенциальная энергия.

Можно представить, что потенциальная энергия между электроном и ядром является результатом растяжения невидимой «резинки», связанной одним из концов с электроном, а другим – с ядром, зафиксированным в центре атома. Полностью упасть на ядро электрону не дает равенство натяжения «резинки» в сторону ядра и выталкивание центробежной силы наружу.

Реальная проблема состоит в том, что электрон продолжает излучать свет, тем самым теряя энергию, и становится все ближе и ближе к ядру, пока окончательно не столкнется с ядром, и атом не разрушится. Такова была судьба (классического) варианта атома, предложенного Резерфордом. А Бор вообще не беспокоился.

Благодаря своей диссертационной работе Бор был уже хорошо знаком с неудачами классической физики. Так он совсем не удивился, когда увидел, как она терпела поражение в области атомов: «Кажется, этого и стоило ожидать, поскольку, по-видимому, строго доказано, что [классическая физика] не может объяснить факты, появляющиеся в рамках проблем, касающихся отдельных атомов».

Каким образом Бор примирил на первый взгляд не вызывающий сомнения атом Резерфорда с неустойчивостью, предсказанной классической механикой? Введением новой гипотезы: «Механические основания [классической физики] не получают никаких шансов...»

Бор предположил, что *энергия связи* электрона – энергия, требуемая для того, чтобы вывести электрон из самого атома, его удерживающего – может принимать одно из значений дискретного набора, а не любое. Другими словами, так же как и в случае резонаторов Планка, энергии связи электронов принимают квантованные значения:

$$E_c = Cnh\omega,$$

где E_c – энергия связи, C – постоянная величина, ω – частота обращения электрона по орбите, которая просто равна скорости, деленной на полную длину орбиты (предполагалось, что орбита круговая, так что ее длина – просто длина окружности), а $n = 1, 2, 3$ и т. д. Поразительным в этой формуле является ее сходство с выражением Планка для энергии резонатора:

$$E_{\text{резонатора}} = m h \nu.$$

Вспомним, что ν в последнем выражении – это частота колебаний резонатора (опять же, ω в формуле Бора является частотой обращения электрона), а $m = 1, 2, 3$ и т. д. То есть Бор проводит формальную аналогию с квантом энергии Планка и тем самым дает ей реальный физический смысл. В последующие годы Бор замечал: «В воздухе витала идея попробовать применить в этом случае предположения Планка».

Помимо квантования энергии связи, Бор также получил результаты, показывающие, что расстояние электрона от ядра, или размер его

орбиты, также квантованы (как и его угловой, то есть орбитальный момент).

В физической картине, воплощенной в атоме Бора, электроны, окружающие ядро, находятся на дискретных орбитах с дискретными энергиями. Как и прежде, под «дискретным» мы понимаем квантованное, и для атома Бора это применимо как к орбитам, так и к энергиям, тогда как в случае резонаторов Планка квантованной была всего лишь энергия. Квантование непосредственно связано с квантовым числом n , и большее значение n соответствует орбите, расположенной дальше от ядра с большей по абсолютному значению энергией связи.

Хотя квантовое число Бора n соответствует m из выражения Планка, его роль более значительна. Квантовое число описывает реальное *квантовое состояние* электрона, и, согласно гипотезе Бора, орбита электрона устойчива только в этих квантовых состояниях, поэтому он не станет неизбежно снижаться, приближаясь по спирали к ядру. Заметим, что, в отличие от выражения Планка, где m может равняться нулю, в формуле Бора n не может быть нулевым, иначе это соответствовало бы квантовому состоянию, в котором электрон уже упал на ядро, и опять-таки мы бы пришли к гибели атома.

Ко времени выдвигания теории Бора прошло больше пятидесяти лет после того, как работы Кирхгофа и Бунзена показали, что атомы излучают уникальные «отпечатки пальцев», состоящие из дискретного набора спектральных линий с теми же частотами, на которых атомы будут поглощать. Если в экспериментальной стороне спектроскопии в течение тех лет отмечался значительный прогресс, с теорией дело обстояло иначе.

Открыв электрон, Томсон спровоцировал обсуждение их роли в спектре атома, но никакого продвижения в этой области не было. Стало казаться, что теорию никогда не обнаружат. В 1882 году физик Артур Шустер (1851–1934) очень хорошо выразил эти переживания, сказав:

«Перспективный объект спектроскопии – изучить колебания атомов и молекул, чтобы получить всю возможную информацию о природе сил, связывающих их воедино... Но нам не следует так скоро ожидать открытие какого-то грандиозного и очень общего закона: состав того, что мы называем молекулой, очень сложен, а трудность проблемы

настолько велика, что если бы не первостепенная важность результатов, которые, как мы можем надеяться, будут окончательно получены, то всему в этой проблеме, за исключением ее наиболее оптимистичных сторон, возможно, было бы отказано во включении в исследование, которое даже после многих лет работы может оказаться безуспешным».

Бор подготовил для Резерфорда проект со своими исходными идеями, касающимися атомов (в нашем предыдущем обсуждении кратко изложены его наиболее значительные части), в июле 1912 года, но ни слова не сказал об атомных спектрах. На то, чтобы Бор стал серьезно рассматривать атомные спектры в рамках своей теории, уйдет еще год. Его интерес вызвала занимательная беседа с Гансом Мариусом Хансеном (1886–1956).

Хансен занимался спектроскопией в Геттингене. Он поинтересовался, не пытался ли Бор использовать для предсказания спектров его теорию. Бор заметил, что он не уделял ей особого внимания, поскольку успех этой теории казался маловероятным. Хансен настаивал, что Бору следует пересмотреть свою точку зрения, и указал ему на интригующую спектральную формулу, известную как *формула Бальмера*.

Перескакивающие электроны – спектры

В 1849 году Иоганн Бальмер (1825–1898) защитил докторскую диссертацию в Базельском университете, Швейцария. Он прожил в Базеле всю свою жизнь, работая учителем в женской школе и читая лекции в университете. Бальмер, любитель нумерологии, считал, что практически все (и число овец в стаде, и число ступенек на египетской пирамиде, и т. д.) в этой жизни имеет что-то вроде особенной связи с числами и формулами. Хотя Бальмер был по образованию математик, он не внес значительного вклада в свою область, но оказал содействие дальнейшему развитию физики своей спектральной формулой для атома водорода.

Его достижение было по-настоящему выдающимся. В то время Бальмер знал только о четырех частотах в спектре атома водорода, которые экспериментально определил Андерс Ангстрем (1814–1874). Используя только эти четыре значения, Бальмер в шестьдесят лет составил формулу, предсказавшую полный спектр частот атома водорода (а также верно предсказавшую нижнюю и верхнюю границы диапазона частот). Вскоре после этого Бальмер узнал, что эта формула не только объяснила те четыре изначальных значения, но и правильно предсказала двенадцать других частот.

В 1885 году он опубликовал свои труды в двух статьях, которые сделали его имя бессмертным. За годы было определено еще больше спектральных частот, но формула Бальмера остается неизменной. В 1890 году Йоханнес Ридберг (1854–1919) обнаружил, что формула Бальмера на самом деле является частным случаем более общей формулы (которую сейчас мы называем *формулой Ридберга*):

$$\nu = cR \left(\frac{1}{b^2} - \frac{1}{a^2} \right),$$

где ν – частота, c – скорость света, а R – постоянная Ридберга. Частоты Бальмера для атома водорода можно получить, если установить $b = 2$ и $a = 3, 4, 5, 6$ и т. д. Хотя эта формула правильно предсказала линии, наблюдаемые в спектре атома водорода, никто не

знал, почему она работала – она просто работала. В течение еще тридцати лет атом держал это в тайне.

Следуя предложению Хансена, Бор взглянул на формулу Бальмера. Возможно, он увидел ее в общем варианте Ридберга (см. выше). Формула была хорошо известна, и, скорее всего, Бор увидел ее еще студентом, только чтобы потом забыть. Мы уже обсуждали то, как Бор предположил, что энергия связи электрона в атоме квантована подобно тому, как Планк проквантовал энергию резонаторов. Используя эту гипотезу с некоторой очень простой классической физикой, Бор смог получить общее выражение для разности энергий связи ΔE двух квантовых состояний с квантовыми числами n_1 и n_2 :

$$\Delta E = K \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right).$$

Снова увидев формулу Бальмера, Бор, должно быть, немедленно понял, как вытащить физику, все эти годы глубоко скрывавшуюся в этой формуле. А затем Бор выдвинул следующую гипотезу: что разность энергий квантовых состояний электрона равна энергии светового кванта Эйнштейна, $h\nu$:

$$h\nu = K \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right),$$

таким образом получив формулу Бальмера, где $R = K / hc$. На самом деле Бор смог посчитать постоянную Ридберга и обнаружить, что она отлично согласуется с экспериментальным значением. Более того, числа a и b из формулы Бальмера тождественны квантовым числам n_1 и n_2 , нумерующим квантовые состояния, а не являются просто какими-то целыми числами без физического смысла. Таким образом, новый вариант теории Бора получил неопределимую поддержку. Давайте посмотрим поближе на физическое понимание, лежащее за выводом Бора.

К тому времени, когда Бор познакомился с теорией Бальмера, у него уже было то, что нужно, чтобы вывести выражения для энергии связи ΔE . Однако, вероятнее всего, именно взгляд на формулу Бальмера заставил Бора завершить это преобразование. Теперь оставался только один шаг, чтобы его закончить. Бору нужно было приравнять разность энергий связи к энергии одного фотона, рассчитываемой в соответствии с формулой Эйнштейна для световых квантов, приходя к выражению:

$$\Delta E = h\nu,$$

известному как *правило частот Бора*.

Математика этого шага очевидна (просто приравнять ΔE к $h\nu$), но физическая интерпретация Бора поразительна. Согласно Бору, электрон может менять квантовое состояние «перескакиванием» из одного в другое. Если электрон переходит из квантового состояния с большей энергией в состояние с меньшей, он испустит один фотон, который появится в спектре частот атома. Другими словами, частотный спектр атома возникает вследствие «перескоков» всех возбужденных электронов из состояний с большими энергиями в состояния с меньшими, при которых они излучают фотоны. Поглощение одного фотона приводит к тому, что электрон переходит из состояния с меньшей энергией в состояние с большей. Нужно осознать, что для двух заданных квантовых состояний энергия, или частота фотона, излученного при «перескоке» электрона «вниз», равна энергии, или частоте, поглощенного фотона при «перескоке» электрона «вверх». Получается, что более чем через пятьдесят лет после Кирхгофа модель Бора окончательно объяснила выводы, которые он сделал из опытов с веществом: как и атом, оно будет излучать и поглощать на той же самой частоте.

Другим успехом теории Бора было правильное предсказание *серии Пикеринга*. В 1896 году Эдуард Чарльз Пикеринг (1846–1919) обнаружил в свете звезд серию спектральных линий, которую он приписал водороду. Проблема была в том, что формула Бальмера не предсказывала эти линии. Примерно в то же время, когда Бор

составлял свою теорию, интерес к серии Пикеринга вновь появился в работе Альфреда Фаулера (1868–1940), обнаружившего спектральные линии в лабораторном эксперименте. Используя свою теорию, Бор смог правильно объяснить эту серию линий, приписав их к частотному спектру однократно ионизованного гелия.

В однократно ионизованном состоянии атом гелия очень «водородоподобный» в том смысле, что у него, как у водорода, имеется только один электрон. От атома водорода он отличается ядром, содержащим два протона (а в ядре атома водорода – только один) и два нейтрона (тогда как в атоме водорода их нет). Это был другой крупный успех теории Бора. Сначала Эйнштейн отвечал на нее слабой похвалой, но, когда он узнал, что она смогла правильно предсказать серию Пикеринга, он сменил тон: «Это громадное достижение. Тогда теория Бора, несомненно, верна».

Были и другие успехи. Используя свою теорию, Бор сделал правильный вывод, что рентгеновское излучение возникает при переходе внутреннего электрона на орбиталь, или квантовое состояние, с меньшей энергией, оставшейся вакантной из-за того, что находившейся там другой электрон был прежде выбит из атома. Более того, Бор предпринял первый шаг навстречу квантовой химии, выяснив, что химические свойства атомов обуславливаются их внешними, или *валентными*, электронами.

В 1913 году статью Бора об атоме водорода опубликовали, и за ней тут же последовали две другие. Отношение к его теории было неоднозначным. Возможно, один из самых беспокоящих вопросов к теории задал Резерфорд, удивлявшийся тому, каким образом электрон, находящийся в каком-то квантовом состоянии, «решает», в какое состояние перейти дальше. Проблема состояла в том, что, казалось, в теории отсутствовала типичная идея причины и следствия (причинности). В самом деле, эта проблема, присущая квантовой механике, возникла снова позже, когда Эйнштейн вернулся к взаимодействию света и вещества.

Атомы и свет

К 1911 году Эйнштейн уже выдвинул гипотезу, что свет состоит из частиц, которые он назвал световыми квантами (впоследствии названными фотонами). Более того, он показал, что свет обладает неотъемлемой особенностью демонстрировать свойства и частицы, и волны. Хотя в понимании таинственной природы света он зашел дальше, чем кто-либо, она продолжала его озадачивать: «Я больше не спрашиваю, существуют ли на самом деле эти [световые] кванты. Как и больше не пытаюсь построить их, поскольку сейчас знаю, что мой разум не способен продвигаться в этом направлении».

Однако Эйнштейн примирился со странным поведением света, сосредоточившись на общей теории относительности до ноября 1915 года, и снова вернулся к свету в июле 1916 года. Конечным результатом было более глубокое понимание взаимодействия света с веществом, которое привело к публикации трех статей: двух в 1916 году и третьей, наиболее выдающейся, – в 1917 году.

Как мы уже видели, Планк положил начало квантовой теории света и вещества. В его модели вещество приобрело намеренно неоднозначную форму^[191] «резонаторов» – не более чем колеблющихся зарядов малой массы. Взаимодействие резонатора со светом было «по большей части» классическим, в том смысле, что это явное взаимодействие происходило между ним и классическим электрическим полем света. Квантовая порция в данной теории относилась к энергии резонаторов, и ее появление было довольно удивительным и не имело механического объяснения. Бор пустил квантовую теорию внутрь атома квантованием электронных орбит. Он также обеспечил квантовой теорией свет и вещество (в атомных масштабах), где скачок электрона между орбитами приводит либо к излучению, либо к поглощению света. Квантовая теория света и вещества Эйнштейна пошла дальше этих двух теорий, объединяя их лучшие аспекты.

Эйнштейна мотивировало несколько факторов. Несомненно, кванты и «корпускулярно-волновой дуализм» света продолжали сильно влиять на направление его мысли. Бор предоставил механизм взаимодействия света и вещества, работающий в атомных масштабах, который был

намного более детализированным, чем в модели резонаторов и света Планка, и Эйнштейн хотел глубже исследовать его последствия. Наконец – и на это стоит обратить внимание – прошло 16 лет с тех пор, как Планк получил свой закон излучения, а полного квантовомеханического вывода у этого закона все еще не было. Эйнштейн говорил:

«Вывод [Планка] был беспрецедентной смелостью, но он получил блестящее подтверждение. ...Однако оставалась неудовлетворенность тем, что анализ [в рамках классической механики], который привел к [закону излучения Планка], несовместим с квантовой теорией, и неудивительно, что сам Планк и все теоретики, постоянно работающие над этой темой, попытались модифицировать теорию так, чтобы она опиралась на непротиворечивые основания».

Действительно, несмотря на невероятный успех в борьбе с постоянно растущими экспериментальными данными, теория Планка оставалась опороченной ее «преимущественно классическими» выводами. На самом деле, честно говоря, строго полученные элементы теории все были классическими по природе; квантовая составляющая (основанная на энергии осцилляторов) вовсе не вытекала из чего-то другого, а целиком была догадкой.

В 1905 году Эйнштейн пришел к идее световых квантов, сравнивая идеальный газ со светом. Тогда он рассматривал их как отдельные системы, находящиеся в тепловом равновесии, каждая в своем ящике. В 1917 году он вернулся к ним, но как к «смеси», находящейся в тепловом равновесии в общем ящике. В этот раз он выяснял, какое распределение света по частотам (частотный спектр, или закон излучения) требовалось, чтобы поддерживать эту систему из вещества и света в тепловом равновесии.

Атом Бора породил представление об атомных уровнях энергии, между которыми могут перескакивать электроны, поглощая или излучая фотоны. То есть, если представить простейший атом – атом водорода с его единственным электроном – то квантовое состояние всего атома описывается уровнем энергии, занятым одним электроном.

Эйнштейн рассмотрел набор подобных атомов, у каждого из которых было только два энергетических уровня. К тому моменту Эйнштейн был мастером в использовании статистической механики для решения физических проблем, и этот случай не был исключением.

Он утверждал, что вероятность нахождения атомов в системе в одном из этих двух состояний описывалась распределением Больцмана. Более того, Эйнштейн предположил, что переходами между двумя уровнями энергии управляли всего три динамических процесса, каждый из которых происходил с определенной вероятностью. Эти три процесса он назвал спонтанным излучением, вынужденным излучением и поглощением.

Спонтанное излучение возникает, когда электрон перескакивает с верхнего на нижний уровень энергии атома, излучая при этом фотон. Вообще-то электрон делает это не под влиянием света, а сам. Как и другие спонтанные процессы (вспомним из части 2), спонтанное излучение – необратимый процесс, происходящий самопроизвольно (без совершения малейшей работы над системой) и приводящий к увеличению энтропии. А вынужденное излучение является результатом взаимодействия со светом. А именно, фотон «ударяет» по электрону, находящемуся у него на пути, приводя к тому, что он перескакивает на нижний уровень, опять-таки излучая фотон (добавляющийся к тому, который проходил вначале). Наконец, поглощение электроном фотона и перескок на верхний уровень энергии – это третий процесс.

Используя эти три процесса как лежащие в основе взаимодействия света с веществом в тепловом равновесии, Эйнштейн получил желаемое распределение по частотам и обнаружил, что оно является не чем иным, как формулой Планка, описывающей спектр излучения света, находящегося в равновесии с веществом. Из этих трех процессов до работы Эйнштейна 1916 года не было описано вынужденное излучение; остальные два уже были в модели Бора.

Оказывается, вынужденное излучение крайне важно для правильного вида закона излучения; без него получится закон излучения Вина. Тогда становится ясно, что вынужденное излучение важно для получения низкочастотной части закона излучения. Другим сокровищем теории Эйнштейна было правило частот Бора как естественное следствие теории. Однако Эйнштейн еще не закончил.

Как обсуждалось ранее (см. часть 2), система атомов идеального газа, находящаяся в тепловом равновесии, будет подчиняться распределению Максвелла по скоростям. В 1917 году Эйнштейн заявил, что то же самое было верно для теплового равновесия его

смеси из атомов и света, и принялся за поиски распределения по частотам, которое делало такую ситуацию возможной. Он использовал тот же самый подход, что и в 1909 году при изучении флуктуаций импульса света.

Вспомним, что он рассматривал «маленькое» зеркало, двигавшееся только в одном направлении, и свет, находившийся в тепловом равновесии. В его исследовании 1917 года атом из смеси играл роль маленького зеркала, и в результате получилось то же самое уравнение для флуктуаций. Отталкиваясь от этого, Эйнштейн смог показать, что закон излучения Планка является правильной формой распределения по частотам, нужной для поддержания распределения Максвелла для смеси, находящейся в тепловом равновесии. Этот результат особенно интересен тем, что Эйнштейн пришел к нему, рассматривая только взаимодействия между атомами и светом.

Другими словами, в его вычислениях столкновения между атомами сами не играли никакой роли. То есть если набор атомов идеального газа, находящегося в тепловом равновесии, достигает распределения Максвелла для скоростей сам по себе, то атомы газа из смеси Эйнштейна, находящейся в тепловом равновесии, делают это благодаря взаимодействию со светом (посредством трех процессов Эйнштейна).

Однако одно из важнейших следствий теории Эйнштейна фокусировалось на импульсе фотона. В работе Эйнштейна 1905 года, посвященной световым квантам, основное внимание уделялось энергии фотона, тогда как его импульс не имел никакого значения. В 1909 году ситуация изменилась, и Эйнштейн показал, что флуктуации импульса, связанные со светом, содержали как корпускулярную, так и волновую составляющие. Это был потрясающий результат, позволивший Эйнштейну записать выражения и для энергии, и для импульса фотона. Но в тот раз он не сделал этого, а почему, мы никогда не узнаем.

Только в работах 1916–1917 годов он завершил картину фотона, наделив его и энергией, и импульсом. Импульс играл основную роль в вышеупомянутом результате, привлекающем распределение Максвелла. Эйнштейн отмечал: «Мне кажется, все же, что самый важный результат связан с импульсом, переданным молекуле в процессе спонтанного или вынужденного излучения».

Согласно Эйнштейну, независимо от того, поглощает ли атом фотон или излучает, переданный импульс равен $h\nu / c$, то есть энергии фотона, разделенной на скорость света^[192]. При поглощении можно представить приближающийся фотон, перемещающийся в определенном направлении и «ударяющий» по атому. Именно в этом направлении импульс и передается атому.

В случае вынужденного излучения приближающийся фотон опять же «ударяет» атом, но теперь в результате атом сам излучает фотон. Как и в случае поглощения, направление переданного импульса определяется направлением движения приближающегося фотона, но в этом случае оно противоположно ему. Но при спонтанном излучении нет никакого приближающегося фотона – атом просто произвольно излучает фотон.

Так в каком же направлении передается импульс? Согласно Эйнштейну, направление определено только «случайностью». Знать его точно, как в случае двух других процессов, просто невозможно. Действительно, Эйнштейн натолкнулся на неопределенность, которая внутренне присуща тому, что впоследствии станут называть квантовой механикой. Эта работа послужила поворотным пунктом в двух отношениях. Во-первых, она раз и навсегда установила физическую реальность световых квантов. В письме к другу вскоре после публикации этой работы Эйнштейн отмечал: «Я больше не сомневаюсь в реальности излучения [световых] квантов, хотя никто не разделяет мои убеждения».

В этих убеждениях Эйнштейн был одинок до 1923 года, когда экспериментальная работа Артура Комптона (1892–1962) «очень убедительно» показала, «что квант [светового] излучения несет с собой и импульс определенного направления, и энергию».

Наконец, работа Эйнштейна 1917 года станет началом его отступления от того, что позднее станет (после введения квантов энергии) квантовой механикой. Эйнштейн высказал мнение, что случайная, или вероятностная, природа спонтанного излучения была недостатком теории, хотя он сохранял доверие к подходу, которым пользовался. Снова написав своему другу, Эйнштейн отмечал: «Я чувствую, что эту настоящую шутку, которую рассказал нам вечный творец загадок, все еще никто не понял».

Если в 1917 году Эйнштейн расценивал вероятностную природу как дефект своей теории, то позднее он был еще менее снисходительным. Он внес последний вклад в квантовую теорию (рассматриваемый многими как вообще его последний значительный вклад в науку) в 1925 году и впоследствии отвернулся от нее навсегда, аргументируя это тем, что ее вероятностная природа была ее существенным недостатком.

Глава 16

Квантовая механика

Лотерея природы

Квантовая механика официально началась с работы Планка в 1900 году. В этой революционной работе он показал, что у энергии атома или молекулы («резонатор», как он говорил) могут быть лишь дискретные значения. Другими словами, энергия поступает «порциями», называемыми квантами, подобно тому как вещество состоит из «порций», называемых атомами. Это поведение энергии заметно только на очень маленьких объектах, таких как атомы, молекулы и фотоны.

Действительно, за предметами в нашей обыденной жизни такого мы не замечаем. К примеру, двигатели наших машин не работают так, чтобы они перемещались «квантовыми скачками», как электроны в атоме. В этом отношении подобными свойствами не обладают ни объекты, с которыми мы взаимодействуем каждый день, ни люди. Тем не менее атомы, из которых состоят эти объекты, двигаются согласно очень странным законам квантовой механики.

Работа Эйнштейна 1917 года по взаимодействию света с атомами затрагивала это странное поведение, показывая, что невозможно с какой-либо долей уверенности знать направление импульса, переданного атому после спонтанного излучения фотона. Оно оставлено «на волю случая» или, точнее, закона вероятности (тогда неизвестного), описываемого квантовой механикой; квантовой механике внутренне присуща случайность.

Мы уже сталкивались с применением вероятностей для решения физических проблем. Например, мы знаем, что система атомов идеального газа, находящаяся в тепловом равновесии, подчиняется распределению Максвелла по скоростям (тогда как полная энергия – распределению Больцмана). То есть мы используем вероятности для упрощения вычислений, которые иначе были бы очень сложными или невозможными. Но нужно отметить: это не значит, что скорости атомов идеального газа по своей природе неизвестны, из-за чего приходится довольствоваться неопределенным описанием

распределения вероятности (например, распределением Максвелла). Наоборот, вероятность просто используют как инструмент, она не является фундаментальной физической природой.

Но в 1917 году Эйнштейн выявил удивительную реальность, согласно которой природа оставляет некоторые вещи неизвестными в принципе, а вероятность, связанная с этими вещами, – оказывается больше, чем просто удобным инструментом вычислений. Это физическая реальность.

Фотоны и закон излучения Планка: наконец-то вместе

Как уже было упомянуто выше, вывод закона излучения Планка был сделан преимущественно с использованием классической механики и закончился гипотезой о квантах энергии. Однако истинная квантовая теория должна была быть совершенно свободной от всех артефактов классической механики. В частности, это стало мотивацией для работ Эйнштейна 1916–1917 годов по взаимодействию света и вещества. На самом деле Эйнштейн имел возможность прийти к «намного более квантовому» варианту вывода закона излучения Планка. В конечном итоге он оказался очень близок к нему, но вынужден был сделать предположения (связанные, например, с правилом частот Бора, законом смещения Вина), которые лишили его вывод возможности стать полностью квантовым. Хотя еще в 1905 году Эйнштейн был готов дать полностью квантовый вывод закона излучения Планка.

В то время Эйнштейн представил свет в ящике в состоянии теплового равновесия, вычислил энтропию и получил окончательное выражение того же самого вида, что и для набора частиц идеального газа (также находящегося в ящике в состоянии теплового равновесия). Это интригующее сходство привело Эйнштейна к заключению, что при низких плотностях энергии свет ведет себя как частицы (фотоны), а не как волны.

Это новое описание света дало средство глубже исследовать его физические свойства, и почти двадцать лет Эйнштейн занимался ими в одиночестве. Вспомним, что Планк вывел аналогичным способом выражение для энтропии одного из резонаторов. После это он провел очень важное вычисление – посчитал число микросостояний W для набора резонаторов, обратившись к методу Больцмана. Поскольку этот

метод требует сперва представить, что энергия частиц (в случае Планка – резонаторов) появляется «порциями», вычисление приобретает большое значение с точки зрения формирования физической концепции световых квантов Планка.

Для Планка этот дополнительный шаг изменил все, поскольку привел его к новой физической интерпретации, которой прежде не было. В то время как метод Больцмана привел Планка к идее квантов энергии, световые кванты Эйнштейна (эти «порции» уже с самого начала были в его распоряжении)^[193] не привели его к методу Больцмана. Он вообще не определял число микросостояний системы фотонов в рамках этого подхода^[194]. Сделав это, он бы нашел ни более ни менее как недостающие кусочки «пазла света», которые искал еще почти двадцать лет.

Он был вообще не знаком с методом Больцмана? Вовсе нет. Планк очень хорошо знал метод и открыто критиковал его применение и у Больцмана, и у Планка. Возможно, в 1905 году он не мог решиться использовать метод Больцмана. Тем не менее проведенный в 1916–1917 годах вывод Эйнштейна был настолько близко к полностью квантовому выводу закона излучения Планка, насколько это возможно, – до того, как проблему вновь рассмотрел в 1924 году неизвестный физик из Калькутты, Индия.

Сатъендра Нат Бозе (1894–1974) был старшим и единственным сыном в семье из семи детей. Будучи учеником, он делал исключительные успехи в математике. В старшей школе он получил за экзамен по математике 110 баллов из возможных 100, потому что, помимо правильного решения всех задач, некоторые он решил несколькими способами. В 1913 и 1915 годах он получил степень бакалавра и магистра смешанной математики соответственно (этот раздел близок к тому, что сейчас называют прикладной математикой, или математической физикой), оба раза заняв первое место в группе. На самом деле его экзаменационный балл для получения степени магистра был настолько высоким, что поставил новый рекорд, который до сих пор не побит.

В возрасте двадцати лет (в 1914 году) он женился на Уше Деве. У них было девять детей. В 1916 году стал читать лекции по физике в университете в Калькутте. В 1919 году Бозе вместе с бывшим одноклассником Мегнадом Сахой подготовил первый перевод теории

относительности Эйнштейна на английский язык, основанный на немецком варианте и французском переводе оригинальных публикаций Эйнштейна. В течение следующих нескольких лет они вместе писали работы по теоретической физике и фундаментальной математике. В 1921 году Бозе приняли преподавателем на кафедру физики университета в Дакке, недавно созданного имперским британским правительством. Именно там Бозе занялся тем, что изменит квантовую теорию (и его жизнь) навсегда.

К 1924 году Бозе нашел способ сделать закон излучения Планка полностью квантовым, свободным от предположений, сделанных Планком и Эйнштейном. К сожалению, он не смог опубликовать его самостоятельно, поэтому решил обратиться к Эйнштейну:

«Многоуважаемый господин, я решился направить сопроводительную статью для ознакомления и с целью узнать Ваше мнение. Очень хотел бы узнать, что Вы о ней думаете. Вы увидите, что я попытался вывести [закон излучения Планка] независимо от [классической механики]... Я не достаточно хорошо знаю немецкий язык, чтобы перевести статью. Если, по Вашему мнению, статья достойна публикации, я буду признателен, если Вы договоритесь о ее публикации в *Zeitschrift für Physik*. Хотя для Вас я совершенно незнакомый человек, но не испытываю никаких сомнений в обращении с такой просьбой. Потому что все мы являемся Вашими учениками, но учимся у Вас только через Ваши работы. Я не знаю, помните ли Вы, что некто из Калькутты попросил Вашего разрешения перевести Ваши статьи по теории относительности на английский язык. Вы разрешили, и поэтому книга была опубликована. И я был тем, кто перевел Вашу статью по общей теории относительности».

Эйнштейн, должно быть, сразу же понял, чего достиг Бозе, ведь он сам много раз возвращаясь к этой проблеме – и в 1917 году приблизился к ее решению – опять же, чтобы потерпеть неудачу. Эйнштейн перевел статью Бозе, добавив свое собственное примечание редактору: «На мой взгляд, вывод формулы Планка, предложенный Бозе, – это важный шаг вперед. Используемый метод также приводит к квантовой теории идеального газа, над всеми сторонами которой я буду подробно работать». Статью Бозе быстро приняли.

Статья Бозе оказала далеко идущее влияние на физику, возможно, даже в большей степени, чем Бозе осознавал. В течение почти двух

десятилетий Эйнштейн был фактически одиночкой в продвижении концепции фотонов (то есть световых квантов, света как частиц). Но в 1924 году Бозе серьезно отнесся к этой работе и смог сотворить нечто волшебное, что как раз не давалось Эйнштейну.

Бозе прямо использовал концепцию фотонов для построения картины микросостояний так, как это еще прежде не делали^[195]. Он представил, что данное микросостояние состоит из набора маленьких «ячеек» с определенным числом фотонов, находящихся в каждой ячейке. То есть можно представить, что в некоторых ячейках вообще нет фотонов, другие содержат 1 фотон, а в других – 2, 3 и т. д. Получается, что определенное микросостояние описывается тем, сколько фотонов находится в каждой ячейке, и, как прежде, набор всех микросостояний задает макросостояние, или термодинамическое состояние. Важно отметить, что Бозе не налагал ограничений ни на число фотонов, которые могут находиться в конкретной ячейке, ни на полное число фотонов в системе – любое число было возможным. Другими словами, полное число фотонов не сохранялось^[196].

Мы обсуждали то, как в природе сохраняются определенные физические величины; возможно, наиболее знакомой из них является энергия. В самом деле, энергия всегда сохраняется, не создаваясь из ниоткуда и не исчезая в никуда, а просто переходя из одной формы в другую. Сделав число фотонов не сохраняющимся, Бозе сделал смелое физическое утверждение (на которое, что странно, в своей статье он вообще не обращал внимания). Он заявлял, что фотон, в отличие от энергии, может быть создан и уничтожен. Действительно, мы уже такое видели в модели атома Бора.

Вспомним, что в атоме Бора, когда электрон «перескакивает» из квантового состояния с большей энергией в состояние с меньшей, он излучает фотон, а поглощение фотона приводит к «перескоку» электрона в квантовое состояние с большей энергией. Фактически излучение фотона – это его создание, а поглощение – его уничтожение. Еще один вариант представления состоит в том, что фотон – это просто сгусток энергии, и поэтому в процессах излучения и поглощения он просто переходит из одной формы в другую; энергия сохраняется, а фотон – нет.

Как и Планк до него, Бозе использовал метод Больцмана для определения полного числа микросостояний для своей системы

фотонов и получил окончательное выражение для энтропии^[197]. Мы узнали, что при использовании оригинального подхода Больцмана Планк считал, что каждый атом газа – «атом 1», «атом 2» и т. д. – обладает определенным количеством энергии – $0, \epsilon, 2\epsilon, 3\epsilon$ и т. д. У него задание конкретного микросостояния сводилось к нумерации всех атомов и присвоению каждому из них одного из возможных значений энергии. Таким образом, нумерация Больцмана сделала как атомы, так и значения энергии *различимыми* (мы уже кратко упоминали об этом выше, но сейчас мы рассмотрим это подробнее). Бозе считал, что его описание во многом аналогично исходному подходу Больцмана, но на самом деле между ними есть большая разница.

В отличие от Больцмана, сосредоточенного на атомах газа с их соответствующими энергиями, в центре внимания Бозе были его ячейки и соответствующие количества фотонов, располагающихся в них. Тогда как у Бозе ячейки были занумерованы («ячейка 1», «ячейка 2» и т. д.) подобно тому, как Больцман нумеровал свои частицы (атомы газа), частицы (фотоны) – нет. Вместо этого он предусматривал только определенное число фотонов, занимающих некоторую ячейку. Так что, если частицы Больцмана можно было отличить друг от друга, то частицы Бозе были *неразличимыми* (это другая особенность, которую Бозе явно не упомянул)^[198]. Физически это означает, что все фотоны выглядели бы совершенно одинаково, если бы можно было увидеть их «вблизи». Они тождественны.

Более того, опять же, если частицы Больцмана сохранялись (невозможно на досуге просто создать или уничтожить атомы газа), то частицы Бозе – нет. Наконец, Бозе отметил, что для получения формулы Планка необходимо было допустить, что фотон находится в одном из двух состояний поляризации, которые в современной квантовой теории известны как спиновые состояния. Эту замечательную находку Бозе упомянул лишь мимоходом^[199].

Кризис тождественности

Чтобы лучше понять противопоставление различимого и неразличимого, рассмотрим две монеты. Если мы подбросим каждую из них и будем считать различимыми, то возможные микросостояния системы из этих монет после их падения будут следующими: (O_1, O_2) , (O_1, P_2) , (P_1, O_2) и (P_1, P_2) , где O = орел, P = решка, а номера обозначают монету 1 и монету 2. Есть четыре различных микросостояния. Однако, если мы не будем нумеровать монеты – то есть сделаем их неразличимыми, – то возможными микросостояниями будут (O, O) , (O, P) и (P, P) , поскольку теперь (O_1, P_2) , (P_1, O_2) – это одно и то же микросостояние.

На самом деле монеты любого достоинства не являются настолько уж неотличимыми; хотя две монеты могут выглядеть очень похоже, всегда будет некоторая отличительная характеристика, придающая правильному методу «подсчета микросостояний» прежний вид. С другой стороны, микроскопические частицы, такие как атомы, фотоны, электроны и т. д., на самом деле неотличимы друг от друга, и поэтому требуют последний, только что описанный вариант метода подсчета микросостояний, пусть и намного более изощренный.

Именно Бозе ввел такой подход для фотонов, тем самым дав начало тому, что со временем станут называть *квантовой статистикой*. В 1905 году Эйнштейн защищал определенную эквивалентность света и атомов, в основном заключающуюся в том, что свет – это некая частица (фотон), и атом – это тоже некая частица^[200]. Примерно двадцать лет спустя Эйнштейн был готов распространить эту эквивалентность дальше, применив метод Бозе, использованный для света, к атомам идеального газа, и этим он показал, что кажущийся безобидным метод Бозе привел к серьезным физическим последствиям и для атомов^[201]. Он явно выразил свои чувства по этому поводу:

«Если сделанный Бозе вывод формулы излучения Планка воспринимать всерьез, то тогда нельзя оставить без внимания [мою] теорию идеального газа; поскольку ее оправдывает рассмотрение излучения [света] как квантового газа, и тогда аналогия между

квантовым газом [светом] и газом из молекул, должно быть, является полной».

Эйнштейн написал три статьи, касающиеся квантовой теории идеального одноатомного газа. В первой из этих статей (представленной Прусской академии наук всего лишь через восемь дней после того, как Бозе прислал статью для публикации, и опубликованной позднее, в 1924 году) Эйнштейн с успехом применил новый метод Бозе к идеальному газу^[202], получив выражения для важных термодинамических величин, и проиллюстрировал различие между своей новой теорией и основанной на классической механике. Главным результатом этой статьи является эквивалентность между светом и атомами, которую она начала устанавливать. Вторая статья, которую опубликовали в 1925 году, из всех трех имеет наибольшее значение. Здесь Эйнштейн прямо обращается к *неразличимости*, присущей методу Бозе, которую сам Бозе никогда не упоминал. Мы видим, что концепция неразличимости, или «потери статистической независимости», как ее тогда называли, вызвала большие волнения в физическом сообществе. Эйнштейн говорил:

«Сторона теории излучения Бозе и моего аналога для идеальных газов, которые критиковались господином Эренфестом и другими коллегами, состоит в том, что в этих теориях кванты, или молекулы, не считаются [различимыми] сущностями; этот вопрос явно не поднимался в наших работах. И это абсолютно верно».

Эйнштейн не делал каких-либо оговорок по поводу неотъемлемой неразличимости. Он просто продолжил в подробностях перечислять отличия между новой теорией и подходом, использующим классическую механику, и привел модифицированную формулу для числа микросостояний неразличимых частиц, которую используют и по сей день. Далее он признал, что есть реальные физические следствия, вытекающие из этой неразличимости: «То есть формула [для числа микросостояний] косвенно выражает определенную гипотезу, касающуюся взаимного, таинственного на данный момент типа влияния молекул друг на друга». Сейчас мы знаем, что это таинственное поведение – всего-навсего одно из многих у микрочастиц.

Другой впечатляющий момент второй статьи Эйнштейна – предсказание очень необычного фазового перехода, происходящего с

идеальным квантовым газом. Эйнштейн описал это явление в письме к Паулю Эренфесту (1880–1933): «При определенной температуре молекулы конденсируются без помощи каких-либо сил притяжения, то есть они скапливаются у нулевой скорости».

Другими словами, при понижении температуры атомы в газе начинают «сгущаться», или конденсироваться, в одночастичное состояние с наименьшей энергией, в котором кинетическая энергия равна нулю; есть критическая температура, при которой происходит фазовый переход^[203]. Это эффект становится наиболее выраженным, когда температура понижается до абсолютного нуля, при котором все атомы газа конденсируются в состояние с наименьшей энергией. Разумеется, конденсация газа в жидкое состояние не является ничем особенным.

Многие из нас знакомы с явлением, когда наше «дыхание» (точнее, водяной пар выдыхаемого нами воздуха) конденсируется, когда мы находимся на улице холодным зимним днем, и благодаря этому становится хорошо видимым. Новация, которую предложил Эйнштейн, состояла в том, что конденсация того особого типа может происходить без воздействия притяжения любого типа. То есть атомы могут «притягиваться друг к другу таинственным образом», что приводит к конденсации даже, опять же, при полном отсутствии любого притяжения (в идеальном газе нет ни притяжения, ни отталкивания между частицами).

В то время конденсацию Бозе – Эйнштейна (БЭК) не воспринимали слишком серьезно, и ее даже критиковали, в частности Эренфест (который в том числе подтолкнул Эйнштейна к написанию третьей и наименее важной статьи из серии). Однако в 1938 году Фриц Лондон (1900–1954) предположил, что БЭК представляет собой механизм, возникающий при фазовом переходе гелия-4 в сверхтекучее состояние. Наконец, в 1995 году предсказание Эйнштейна воплотили в жизнь: используя комбинацию новых технологий, физики-экспериментаторы смогли охладить систему рубидия-87 почти до абсолютного нуля.

Как будто разъяснений Эйнштейна в отношении неразличимости и установления фазового перехода нового типа было недостаточно, он сделал еще одно поразительное предсказание. Эйнштейн снова обратился к своему флуктуационному подходу, введенному в 1904 году. Этот подход уже оказал Эйнштейну хорошую услугу,

сначала в изучении света в 1909 году и затем снова в изучении взаимодействия света с атомами в 1917 году. В 1925 году он опять подарил невероятное открытие.

Вспомним, что в 1909 году Эйнштейн успешно применил этот подход и обнаружил, что свет ведет себя и как волна, и как частица. А конкретнее, выводя выражения для флуктуаций энергии и импульса света, он отметил в них наличие и корпускулярной, и волновой составляющей. Подобный анализ флуктуаций частиц идеального квантового газа также выявил наличие двух членов.

В 1909 году, когда Эйнштейн провел эти вычисления для света, волновой член был ожидаемым, тогда как корпускулярный вызвал удивление. Но в 1925 году ситуация была обратной: подобное вычисление для идеального квантового газа привело к знакомому корпускулярному члену вместе с неожиданным волновым.

Примерно двадцатью годами ранее Эйнштейн уподобил свет идеальному газу, что привело его к заключению, что свет может быть и частицей, и волной. Интересно отметить, что в то время это сравнение не привело его к вопросу, мог ли атом идеального газа вести себя и как волна, и как частица. По-видимому, он был просто не готов распространить этот дуализм на идеальный газ и применил его только к свету. Однако в 1925 году, применяя метод Бозе к идеальному газу, Эйнштейн показал, что теперь был готов это сделать. Как оказалось, он был не один.

Волны материи

Луи Виктор Пьер Раймон де Бройль (1892–1987) родился в Дьепе, который находится в департаменте Приморская Сена во Франции. Он принадлежал к французской дворянской семье, в конечном итоге став седьмым герцогом Брoльи. Первоначально заинтересовавшись гуманитарными науками, де Бройль получил степень бакалавра истории. Позднее он обратил свои интересы к математике и физике и в 1913 году получил ученую степень. Однако его карьеру прервала Первая мировая война. С 1914 по 1918 год де Бройль базировался на Эйфелевой башне в составе беспроводного телеграфного подразделения, посвящая свое свободное время решению технических проблем. После войны он заинтересовался теоретической физикой, особенно квантовой теорией:

«Когда в 1920 году я продолжил свои исследования... что привлекло меня... к теоретической физике, так это... тайна, которая все более окутывала структуру вещества и излучения, по мере того как странная концепция кванта, введенная Планком в 1900 году в его исследовании излучения абсолютно черного тела, каждый день проникала все дальше и дальше вглубь физики».

Старший брат Луи де Бройля, Морис де Бройль (1875–1960), разделял страсть своего младшего брата к физике. Несмотря на то что он закончил школу морских офицеров и провел девять лет во французском флоте Морис – пренебрегая желаниями семьи – в 1904 году бросил все, чтобы сконцентрироваться на физике, и в 1908 году защитил докторскую диссертацию. Приступив в 1913 году к изучению рентгеновских лучей, к 1920 году Морис накопил большой опыт – примерно тогда же де Бройль начал работать над докторской диссертацией.

Хотя в глубине души Луи де Бройль был чистым теоретиком, он проявлял большой интерес к экспериментам брата с рентгеновскими лучами. Эта работа вместе с «долгими обсуждениями с моим братом по интерпретации его красивых экспериментов» действительно произвела на де Бройля большое впечатление. Прежде всего, де Бройль полностью уверовал, что двойственное поведение света, описанное Эйнштейном в 1905 году, распространяется и на

рентгеновские лучи^[204]. Однако его основное заключение распространяло корпускулярно-волновое поведение на вообще все квантовые частицы, особенно на электрон. В интервью от 1963 года де Бройль размышлял о своем озарении:

«Поскольку в разговорах с моим братом мы всегда приходили к заключению, что в случае рентгеновских лучей были и волны, и [частицы], то внезапно – ...это точно было летом 1923 года – я пришел к тому, что нужно распространить этот дуализм на материальные частицы, прежде всего на электроны».

В 1923 году де Бройль (тогда ему был 31 год) опубликовал три статьи, посвященные этой удивительной концепции, увенчанной докторской диссертацией «Исследования по теории квантов», которую он защитил 25 ноября 1924 года. В первой статье, используя уравнение Эйнштейна, связывающее массу и энергию:

$$E = mc^2,$$

выражение для энергии кванта Планка – Эйнштейна

$$E = h\nu,$$

немного простой математики, а также свою новую интерпретацию корпускулярно-волнового дуализма, де Бройль вывел формулу для длины волны λ , связанной с частицей:

$$\lambda = h / p,$$

где (как и прежде) h – постоянная Планка, а p – импульс частицы. Де Бройль представил, что λ – длина волны, сопровождающей частицу, управляющей ей – или «пилотирующей» ее движение (что обсуждалось в его второй статье), а также (в третьей статье) он показал, что к идее квантования атома, которое Бор просто допускал, можно прийти естественным путем с его концепцией пилотной волны. Эйнштейн обратил внимание на работу де Бройля в 1924 году^[205], когда Поль Ланжевен (1872–1946), один из членов экзаменационной комиссии, посчитав его идеи немного надуманными (или, возможно, попросту запутанными), отправил диссертацию де Бройля Эйнштейну

на рассмотрение. Эйнштейн отозвался о работе довольно одобрительно:

«...де Бройль предпринял очень интересную попытку... Я считаю, что эта попытка – первый слабый луч света, упавший на эту сложнейшую из головоломок физики, предстающих перед нами. Я также обнаружил кое-что, говорящее за это построение».

Каким бы оптимистичным ни был ответ Эйнштейна, де Бройль не защитил свою диссертацию. Эйнштейн удачно использовал концепцию де Бройля в 1925 году, когда его анализ идеального квантового газа привел к установлению (как было упомянуто выше) волнового члена; Эйнштейн процитировал именно работу де Бройля (а точнее, его диссертацию) как источник физического понимания.

Ранее мы упоминали, что дифракция становится наиболее заметной, когда волна проходит через отверстие с размерами, меньшими или равными ее длине. И на самом деле это явление происходит с волнами всех типов. Так, если электрон (или любая другая квантовая частица) реально обладает волновыми свойствами, то тогда мы сможем наблюдать дифракцию при его прохождении через «отверстие» с размерами, меньшими или равными *длине волны де Бройля* этого электрона. Возникает следующий вопрос – в чем есть отверстие с размерами, приблизительно равными длине волны де Бройля электрона?

Оказывается, что для этого идеально подходят маленькие расстояния (шаг кристаллической решетки) между атомами. То есть кристаллическое твердое тело с правильной решеткой должно действовать как дифракционная решетка для электронов. На самом деле в работе Макса фон Лауэ (1879–1960) уже был прецедент такой дифракции: в 1912 году он показал, что рентгеновские лучи дифрагируют на кристалле сульфата меди, тем самым подтверждая свою волновую природу (в то время по-прежнему шли ожесточенные споры по поводу природы рентгеновских лучей).

В 1927 году подтверждение получили теория де Бройля и корпускулярно-волновой дуализм: Клинтон Дэвиссон (1881–1958) и Лестер Джермер (1896–1971) успешно показали, что пучок электронов, направленный на никелевый кристалл, не только отражался от него, но и вызывал дифракцию электронов. Этот

эксперимент стал кульминацией десятилетней упорной работы, начатой Дэвиссоном.

Во избежание нежелательных воздействий со стороны воздуха опыты были проведены в вакуумной камере. Однако случилась авария, в результате которой воздух проник в камеру, и никель прореагировал с кислородом воздуха, что привело к образованию оксида никеля. Чтобы *восстановить* никель, его нагрели в присутствии водорода. Однако, повторив эксперименты с восстановленным никелем, ученые получили некоторые новые интересные результаты. Доля отраженных электронов от никеля в некоторых направлениях была больше, чем в других. Иными словами, была зависимость интенсивности электронного пучка от направления, которой не было заметно в предыдущих экспериментах.

Дэвиссон и Джермер сделали предположение, что вновь восстановленный никель на самом деле перешел из своего исходного твердого состояния в новую кристаллическую форму. Далее они пришли к выводу, что кристаллическая структура имела необходимое межатомное расстояние для дифракции – а не простого отражения – электронов, тем самым выявляя их волновую «природу де Бройля». Наконец, они обнаружили, что *закон Брэгга* правильно описывал зависимость интенсивности пучка от направления, которую они видели в их опытах.

Я не буду вдаваться в подробности закона Брэгга, а только сообщу основную идею: он правильно описывает зависимость интенсивности пучка от направления, делая предположение, что отражается волна – а не частица. То есть он верно описывает дифракцию волн на кристаллах (закон Брэгга правильно описывает эксперименты Лауэ по дифракции рентгеновских лучей). Ясно, что Дэвиссон и Джермер не планировали проверять теорию де Бройля, а просто пытались исследовать свойства поверхности никеля.

Они не были знакомы с теорией де Бройля вплоть до 1926 года, а именно – до того, как Дэвиссон посетил научный съезд, на котором ее представили его вниманию. Он и Джермер уже обнаруживали, что их экспериментальные данные походили на результаты дифракции рентгеновских лучей на кристаллах. С представлением, данным теорией де Бройля, Дэвиссон понял, что они были обусловлены волновой природой электрона.

Опыты Дэвиссона и Джермера были большим шагом навстречу корпускулярно-волновому дуализму вещества, в частности электрона. В классической физике частицы и волны всегда рассматривались как отдельные сущности, но для квантовых объектов (фотонов, электронов и т. д.) это разграничение исчезает, и они переплетаются.

В 1929 году за свою теорию корпускулярно-волнового дуализма де Бройль был удостоен Нобелевской премии. Когда (в 1923 году) он написал свою серию статей, открывающую новые горизонты, ему был всего лишь тридцать один год. Концепция волны де Бройля стала его великим вкладом в физику. Однако она будет лишь инструментом вдохновения для Эрвина Шрёдингера – тридцативосьмилетнего физика, который построит (проводя рождественские каникулы со своей любовницей) уравнение – саму основу того, что называют квантовой механикой.

Путь Шрёдингера в квантовый мир

Эрвин Шрёдингер (1887–1961) родился в Вене, Австрия, и был единственным ребенком Рудольфа и Георгины Шрёдингер. Его отец унаследовал семейный бизнес, был владельцем прибыльной фабрики по производству линолеума и клеенки, а его мать была из рода мелких дворян. Шрёдингеры были на самом деле обеспечены и наслаждались образом жизни, типичным для людей выше среднего класса того времени. Шрёдингер рос, окруженный женщинами (две тети, двоюродная сестра, няни и прислуги), исполняющими все его прихоти, что, скорее всего, в дальнейшем повлияло на его отношения с женщинами. И в течение некоторого времени эту комфортную обстановку не нарушала даже школа, поскольку Шрёдингер до десяти лет находился на домашнем обучении.

Однако именно отец, несомненно, придал юному Шрёдингеру интеллектуальный стимул. Хотя он и вел семейный бизнес, в глубине души он был ученым с истинной страстью к ботанике (тематике, по которой он публиковался в профессиональных журналах). Он также был очень сведущ в итальянской живописи и химии. Чтобы удовлетворить свои интересы, он держал большую библиотеку, к которой сын имел беспрепятственный доступ – образованию сына уделяли первостепенное внимание. Позднее именно отец отговорил Шрёдингера от продолжения семейного бизнеса и вместо этого посоветовал заняться научной деятельностью (сожалея о том, что сам ею не занимался).

В 1898 году после длинных весенних каникул Шрёдингер впервые испытал на себе прелести официального образования в школе св. Николая, куда обеспокоенные родители отдали его всего лишь на несколько недель – для подготовки к вступительному экзамену в Академическую гимназию (подобную средней школе в Англии). Осенью 1898 года Шрёдингер блестяще сдал экзамен и поступил в Гимназию, она была удобно расположена в десяти минутах ходьбы от его дома. Латынь, греческий язык и литература были там основными предметами, а математика и физика – второстепенными. Шрёдингер очень хорошо справлялся с учебной работой и был первым в классе по всем предметам.

В 1906 году, вскоре после смерти Больцмана, Шрёдингер поступил в Венский университет. Смерть Больцмана оставила отделение физики в беспорядке, а чтение лекций по теоретической физике прервали на восемнадцать месяцев, когда Больцмана заменил Фридрих (Фриц) Хазенерль (1874–1915). Тем не менее ожидание стоило того, потому что Хазенерль тут же мастерски прочитал свою первую лекцию по статистической механике Больцмана (он сам учился и у Больцмана, и у Йозефа Стефана (1835–1898) в том же Венском университете). Курс Хазенерля по теоретической физике был рассчитан на восемь семестров и читался пять дней в неделю – Шрёдингер был на седьмом небе от счастья: «Ни один человек, возможно, кроме моего отца, так сильно не повлиял на меня, как Фритц Хазенерль».

Теоретической физике суждено было стать его призванием, и в 1910 году Шрёдингер получил свою степень доктора философии (не совсем эквивалентную одноименной степени в Америке, а скорее степени магистра) за свою диссертацию «Об электрической проводимости на поверхности изоляторов в сыром воздухе», мотивированную значением электрической изоляции, используемой в инструментах, измеряющих ионизацию и радиоактивность.

Вскоре Шрёдингера призвали в армию. В 1908 году он поступил на службу в войска крепостной артиллерии. Хотя для всех здоровых мужчин обязательная военная служба длилась три года, поскольку нужно было больше офицеров, чем могли выпустить академии и кадетские школы, людям с достаточным уровнем образования и социальным положением – таким как Шрёдингер – система позволяла быть «одногодичными волонтерами», которые проходили офицерскую подготовку, самостоятельно покрывая расходы на проживание. Пройдя военную подготовку, он сдал экзамены на должность прапорщика в запасе (звание непосредственно ниже лейтенанта для младших офицеров) и накануне нового 1911 года вернулся к полноценной гражданской жизни.

Вернувшись в университет, Шрёдингер занял более подходящую (и на нее он, несомненно, был бы избран) должность ассистента физика-экспериментатора Франца Экснера (1849–1926), должность, которую Хазенерль передал ему за военную службу. Теперь Шрёдингер был вовлечен в процесс хабилитации, который привел его на первую ступень академической лестницы, в должность *приват-доцента*. Это

процесс включал несколько уровней, первым из которых были завершение и публикация оригинального научного исследования^[206]. Следующим было официальное представление комиссии, называемое *коллоквиумом*.

Как и требовалось, Шрёдингер выбрал три возможных темы для представления: аномальная дисперсия в спектре электрической дуги; значение кванта действия в теории теплового излучения; и магнитный момент электрона – его комиссия и выбрала для обсуждения. Наконец, был устный экзамен и обсуждение темы *коллоквиума* перед комиссией. Удовлетворив всем требованиям, 9 января 1914 года Шрёдингер стал приват-доцентом. 31 июня 1914 года отец Шрёдингера приехал к нему на работу, чтобы лично передать ему вклад в мобилизацию.

Теперь Шрёдингер официально стал вносить вклад в военные действия и делал это до конца 1918 года. Шрёдингер в основном выполнял свои военные обязанности как командир батареи в течение третьей битвы при реке Изонцо (18 октября – 3 ноября 1915 года)^[207]. Его безупречную службу там отметили следующими строками, находившимися в его личном деле в военном архиве:

«...заменяя командира батареи, [Шрёдингер] весьма успешно исполнял свои обязанности. При подготовках, как и во многих сражениях, он командовал как первый офицер на огневой позиции. Своим бесстрашием и хладнокровием в условиях повторяющихся массированных артиллерийских обстрелов со стороны врага он подал людям яркий пример мужества и доблести. Благодаря его личному присутствию на огневых позициях боевые задания перед массированным вражеским огнем всегда выполнялись точно и успешно...»

1 мая 1916 года Шрёдингера повысили до *старшего лейтенанта*. В 1917 году ему дали отсрочку, и Шрёдингер был отправлен назад в Вену – вести лабораторные практикумы по физике в университете, а также занятия по метеорологии в военном училище, где подготавливали артиллерийских офицеров противовоздушной обороны. Однако дела недолго шли хорошо.

В 1918 году мать Шрёдингера восстанавливалась от операции по удалению рака груди, проведенной почти год назад, а сам Шрёдингер боролся с туберкулезом. В довершение всего семейный бизнес, неспособный получить необходимое сырье, в конечном итоге потерпел

крах. Отец Шрёдингера тоже болел, у него отмечались признаки гипертонии и атеросклероза, и 24 декабря 1924 года – отдыхая в кресле – он скончался.

К счастью, к 1920 году перспективы работы Шрёдингера стали лучше – как раз вовремя, поскольку семейные сбережения полностью закончились. Ему первому предложили повышение – должность профессора Венского университета. Эти перспективы были довольно мрачными, поскольку зарплата не позволила бы ему содержать себя и будущую жену Аннемари (Анни) Бертель. К счастью, тогда же ему предложили должность ассистента (которая также включала обязанности по чтению лекций по современной теоретической физике) в Йенском университете. Зарплата была лучше, чем в предыдущем предложении, и он согласился. Перед отъездом Шрёдингер и Аннемари поженились (фактически дважды) и в апреле того года приехали в Йену.

Шрёдингер произвел прекрасное впечатление, и всего лишь несколько недель спустя факультет рекомендовал его на должность профессора. Хотя зарплата была значительно больше, чем в Венском университете, послевоенная инфляция увеличивалась, и там он не задержался. Так, когда ему предложили должность профессора в университете Штутгарта, он с радостью принял предложение, оставив должность в Йене 1 октября. Но в Штутгарте он тоже пробыл ненадолго.

В начале лета он и Анни переехали в Бреслау (теперь Вроцлав), где Шрёдингер занял еще одну должность, на этот раз штатного профессора. Перед отъездом Шрёдингер поделился со своим другом мнением о послевоенном напряжении, которое преобладало там: «У меня такое чувство, что мне все время хочется сказать: “Дайте мне выбраться из этой пороховой бочки”». Менее чем через 6 месяцев Шрёдингеры снова переехали.

В течение всей войны место заведующего кафедры теоретической физики университета в Цюрихе оставалось свободным, хотя на кафедре работали исключительные преподаватели, в частности Пауль Эпштейн (1883–1966). Правительство Швейцарии было, так сказать, жадноватым и, не производя назначения, сберегало деньги. К ноябрю 1919 года факультет устал и потребовал, чтобы на должность, наконец, кого-то назначили. Этот процесс затягивался, но 3 марта 1921 года –

более года спустя – декан написал Комиссии по вопросам образования, что в первую очередь нужно выбирать Лауэ.

Лауэ заинтересовался возвращением – он занимал эту должность раньше – но четко дал понять, что ему хотелось бы получать за это исключительно хорошую зарплату, учитывая финансовый кризис (из-за послевоенной инфляции его семья потеряла все деньги). Видимо, директорат не смог предложить достаточно денег, чтобы удовлетворить требования Лауэ.

Годом ранее комиссия опасалась, что не сможет привлечь самых талантливых, и рассмотрела своих (трех) преподавателей. Seriously думали об Эпштейне, но были опасения, что его польский акцент сделает чтение длинных базовых лекций проблемой. По-видимому, это не было проблемой для Лейденского университета, где ему вместе с Хендриком Лоренцем (1853–1928) предложили занять должность, которую он с радостью принял.

Теперь, упустив и Лауэ, и Эпштейна, комиссия подождала немного и 20 июля 1921 года официально одобрила назначение Шрёдингера штатным профессором кафедры теоретической физики. Зарплата Шрёдингера, примерно 2,5 тысячи долларов в год, была по тем временам превосходной. Более того, как последователь Эйнштейна, Петера Дебая (1884–1966) и Лауэ, занимавших эту должность до него, он продолжал выдающееся дело. Наконец, после всех переходов с одного места работы на другое и постоянного беспокойства о деньгах, 34-летний Шрёдингер, должно быть, почувствовал облегчение и вдохновение. Он останется в университете Цюриха на шесть лет. И здесь он проделает свою величайшую работу, составив то самое уравнение, которое сыграет главную роль в преобразовании квантовой теории в квантовую механику.

Возможно, Шрёдингер в самом деле получил вдохновение, но начало работы на новом месте было тяжелым. И как только начался осенний семестр в 1921 году, все остановилось: в ноябре Шрёдингер – измотанный как физически, так и морально от череды событий, начавшейся с 1918 года (потеря обоих родителей и бабушки, а также финансовые трудности), – страдал от туберкулеза, осложненного тяжелым случаем бронхита. В отсутствие каких бы то ни было доступных антибиотиков (первый настоящий антибиотик, пенициллин, открыли в 1928 году) единственным лечением от туберкулеза был

отдых высоко в горах. Шрёдингер поехал в альпийский курортный городок Арозу. Он оставался там до ноября 1922 года, слегка опоздав к следующему учебному году. Это был не последний его визит туда, поскольку он и позже регулярно возвращался поправить здоровье или просто отдохнуть. Замечательно, что, несмотря на свое ослабленное состояние, во время лечения в Арозе Шрёдингер смог опубликовать две статьи. В первой не было ничего особенного, а вот во второй был намек на то, что четыре года спустя привело к наиболее значительному из всех его трудов^[208].

Шрёдингер вернулся к напряженному графику – одиннадцать часов лекций в неделю; от него как от старшего профессора ожидали, что он возьмет большую нагрузку, чем младший преподаватель – ситуация, прямо противоположная тому, что происходит в большинстве современных университетов. Его напряженная лекционная программа на 1922–1923 учебный год вместе со все еще ослабленным здоровьем привели к неудаче в публикациях – он так ничего и не опубликовал. Это довольно странно, учитывая то, как он публиковался в течение прошедшего перерыва и во время Первой мировой войны.

В 1924 году Шрёдингер принял участие в 88-й Встрече немецких ученых и врачей, проводившейся с 21 по 27 сентября. Ее посетило много людей, и там прозвучали важные доклады выдающихся ученых, например Арнольда Зоммерфельда (1868–1951), Макса Борна (1882–1970), Макса Планка, Пауля Эвальда (1888–1985), Макса фон Лауэ и некоторых других. Хотя Эйнштейн не делал доклада, его концепция световых квантов – к тому моменту прошло почти двадцать лет с момента ее создания – была горячей темой для обсуждения среди более узкой группы участвовавших во встрече экспертов. Благодаря труду Комптона 1923 года многие физики стали верить в световые кванты, но у этой концепции по-прежнему оставалось несколько противников. Наиболее заметными из них были Нильс Бор (1894–1952) и Джон Слэтер (1900–1976).

В 1924 году трио этих противников написали статью, откровенно отвергавшую световые кванты. На самом деле они не столько выступали против квантов, сколько желали отбросить сохранение энергии (первый закон) и сохранение импульса в своей попытке устранить световые кванты:

«Что касается появления [скачков электрона между квантовыми состояниями], что является важнейшим элементом квантовой теории, мы отказываемся от... непосредственного применения принципов сохранения энергии и импульса...»

То есть вместо строгого сохранения для каждого отдельного скачка они предположили, что сохранение энергии и импульса должно рассматриваться как выполняющееся только в среднем для многих электронных скачков; сохранение появляется только в статистическом, а не абсолютном смысле. Статья со всеми выводами стала известна как «статья БКС» (по первым буквам фамилий авторов). Интересно отметить, что сам Шрёдингер подробно рассматривал ту же самую идею (возможно, под влиянием работы с Экснером) в 1922 году в своем вступительном обращении в Университете Цюриха:

«Вполне возможно, что все без исключения законы природы имеют статистический характер. Для постулирования абсолютного закона природы, стоящего за статистическим, как это сейчас делается естественным образом, осуществляют выход за пределы опыта. ... Бремя доказательства возлагается на защитников абсолютной причинности, а не на тех, кто в ней сомневается. Сомневаться в ней сегодня, несомненно, более естественно».

Так что не удивительно, что Шрёдингер в основном выступал в пользу БКС-предложения. С ним резко контрастировала недавняя статья Бозе, в которой тот успешно использовал световые кванты, чтобы провести первый полностью квантовый вывод закона излучения Планка. В свою очередь, Эйнштейн как раз применил квантовую статистику Бозе в выводе, касающемся идеального квантового газа. А еще был Планк со своей собственной теорией идеального квантового газа, впервые построенной в 1916 году, и зимой 1924–1925 учебного года он читал по ней курс лекций в Мюнхенском университете. Он дал представление о своем подходе к квантовой статистике в применении к газу из атомов водорода на своем докладе на встрече. И новая область квантовой статистики на самом деле была подходящей темой для обсуждения на встрече, так что можно предположить, что ее важность произвела на Шрёдингера впечатление.

К сожалению, какие бы мысли ни сверкнули в сознании Шрёдингера, им пришлось ждать, поскольку в течение зимнего семестра 1924–1925 учебного года его преподавательские обязанности

оставляли мало времени для его собственного научного исследования. К концу семестра ситуация изменилась, и теперь Шрёдингер интенсивно изучал литературу по квантовой статистике. В дополнение к теории цветов, основной областью исследовательских интересов в течение его первых лет работы в Цюрихе был статистический подход Больцмана к теории газов, который, как мы видели, был предвестником квантовой статистики.

С учетом этого опыта и его статистического взгляда на природу в атомных масштабах (о чем свидетельствует его входная лекция 1922 года) Шрёдингер, должно быть, возлагал на квантовую статистику большие надежды. 5 февраля 1925 года он написал в Берлин Эйнштейну: «Как раз только что я прочитал Вашу интересную [первую статью по идеальному квантовому газу], и я столкнулся с серьезной [проблемой]». Он продолжал: «Поэтому я очень сильно сомневаюсь, что можно приписать какой-то реальный смысл отклонениям, на которые Вы обратили внимание [в вычислениях] от [классического] поведения идеального газа».

Кажется, что при чтении статей Эйнштейна Шрёдингер упустил один из важных моментов: квантовые частицы неразличимы, это означает, что они (в принципе) следуют не статистике Больцмана, а новой квантовой статистике Бозе и Эйнштейна.

Эйнштейн вежливо ответил: «В моих статьях не были допущены ошибки. В статистике Бозе, которую я использую, [световые] кванты или молекулы не рассматриваются как *не зависящие друг от друга* объекты». Эйнштейн даже продолжил, схематически иллюстрируя то, как метод подсчета микросостояний Бозе отличался от такового у Больцмана.

К началу летнего семестра 1925 года Шрёдингер уже читал лекции по квантовой статистике. Этот курс, как и предшествующая переписка с Эйнштейном, возможно, мотивировали его дальше изучать литературу по данной теме, чтобы лучше ее понять. 3 ноября 1925 года он ответил Эйнштейну:

«Только благодаря Вашему письму [от 28 февраля] я осознал уникальность и оригинальность Вашего статистического метода; я так и не понял их раньше, несмотря на то, что статьи Бозе были уже выпущены. ...Только Ваша теория [идеального квантового газа] на

самом деле является чем-то абсолютно новым, и сперва я тоже не мог ее осознать».

Как это ни странно, хотя теперь Шрёдингер оценил значения метода подсчета Бозе, использованного Эйнштейном, казалось, что он считал исходное применение этого метода к световым квантам у самого Бозе в чем-то непоследовательным. Также в этом письме Шрёдингер проявил энтузиазм к идее, которую Эйнштейн упомянул в другом, ответном письме в сентябре. Эйнштейн размышлял о фундаментальном подходе в теории Планка об идеальном квантовом газе, где рассматриваются энергетические уровни всего набора атомов, а не одночастичные, что (как мы видели) формировало основу теорий и Бозе, и Эйнштейна.

Всего лишь через два дня Шрёдингер довел дело до конца, следуя предложению Эйнштейна, и написал ему: «Основная идея Ваша, я только провел вычисления... Мне не нужно обращать внимание на то, что это было бы для меня большой честью иметь возможность опубликовать совместную работу с Вами». Эйнштейн любезно отказался от авторства, не желая «использовать» работу, сделанную Шрёдингером. Тем не менее, участие Эйнштейна было должным образом учтено во введении к статье Шрёдингера (скорее всего, законченной в декабре).

В итоге статья дала Шрёдингеру возможность улучшить свои знания в области квантовой статистики. Его окончательные формулы не имели никакой практической ценности, и, вместо того чтобы примирить теории идеального квантового газа Эйнштейна и Планка, Шрёдингер добавил в смесь кое-что третье, которое скорее имело сходство с идеями Планка, чем Эйнштейна.

Тем не менее, благодаря своим усилиям он стал хорошо разбираться в имеющейся литературе и приобрел знания в области квантовой статистики – до переписки с Эйнштейном в феврале он не обладал ни тем, ни другим. Он начинал соединять эти три элемента.

Волновое уравнение

3 ноября 1925 года Шрёдингер написал Эйнштейну:

«Несколько дней назад я с величайшим интересом прочитал гениальную диссертацию Луи де Бройля, которую я наконец достал; также с ней [обсуждение волновой природы идеального квантового газа, проведенное в Вашей второй статье] стало впервые для меня понятным».

Как упоминалось выше, в своей второй статье, посвященной идеальному квантовому газу, Эйнштейн провел анализ флуктуаций частиц и обнаружил в окончательном выражении и ожидаемый корпускулярный член, и неожиданный волновой. Эйнштейн заявил, что «он затрагивает нечто большее, чем просто аналогия», и отметил наличие корпускулярно-волнового дуализма, обрисованного де Бройлем в своей диссертации: «То, как [волна] может быть приписана материальной частице или системе материальных частиц, было подчеркнуто господином Е. де Бройлем довольно заметным образом». (Эйнштейн ошибочно указал первую букву имени де Бройля как «Е», а не «Л».) Шрёдингер всерьез заявлял Эйнштейну, что ему все стало ясно.

4 декабря 1925 года Шрёдингер сообщил Эйнштейну, что он отправил статью по квантовой статистике. Затем он стал обрисовывать цели его последующей статьи. Эта была его последняя статья, написанная до его самой знаменитой работы, которая изменила всю известную тогда физику. Короче говоря, Шрёдингер хотел разработать теорию идеального квантового газа, совершенно свободную от статистики Бозе, чтобы ее выводы предусматривали, что атомы находятся в маленьких «ячейках», как это было в работе Эйнштейна. Он просто не принял статистику как что-то фундаментальное. Вместо этого он утверждал, что подход Эйнштейна на самом деле скрывал более глубокий физический смысл, лежащий в его основе.

Для достижения своих целей он (опять же, хотя и с применением другого подхода) рассмотрел уровни энергии всего набора атомов, не сосредотачиваясь на уровне энергии одного атома, как сделал Эйнштейн. Шрёдингер отметил, что статистика Бозе привела и к теории идеального квантового газа Эйнштейна, и к теории световых

квантов Бозе, дающей закон излучения Планка. Далее он указал на то, что закон излучения Планка можно получить, если рассматривать свет согласно его волновой природе.

Ясно, что корпускулярно-волновой дуализм на квантовом уровне был неопровержимым. Таким образом, чтобы завершить картину корпускулярно-волнового дуализма, Шрёдингер предложил новую теорию, где система атомов идеального газа рассматривается как волны, используя вместо статистики Бозе «естественную статистику» (статистический подход с экспериментальным обоснованием, и, по мнению Шрёдингера, имеющий более твердую логическую основу):

«Таким образом должна быть построена картина газа просто согласно *той* картине [излучения абсолютно черного тела], которая *пока еще не* соответствует крайней концепции световых квантов; тогда естественная статистика... даст теорию газа Эйнштейна».

Он добавил: «Это означает не что иное, как принятие всерьез [предложенных теорий де Бройля и Эйнштейна, где атомы рассматриваются согласно их волновой природе]».

В этот момент Шрёдингер был полностью привержен идее разработать полную теорию, в которой атомы идеального газа рассматривались с позиций их поведения как волн, как это изначально описывал де Бройль и далее исследовал Эйнштейн. Интересно отметить, что ни Эйнштейн, ни де Бройль в достижении такой теории не преуспели. Разумно допустить, что де Бройлю просто не хватало математического мастерства, если учесть его реальный уровень. Еще удивительнее, что не смог Эйнштейн. По сути дела, он со своей статьей 1905 года, посвященной световым квантам, был отцом корпускулярно-волнового дуализма. Хотя именно Бозе успешно использовал световые кванты, чтобы получить правильную квантовую статистику, и наконец поставил закон излучения Планка на твердую квантовую основу, Эйнштейн был тем, кто включил «принцип дуализма», чтобы успешно применить статистику Бозе к идеальному газу.

Затем, (как уже было упомянуто) Эйнштейн знал, как использовать метод де Бройля, чтобы представить систему частиц газа как волн, и рассмотрел такое использование (в своей второй статье, посвященной идеальному квантовому газу) для решения известной проблемы. И наконец, именно Шрёдингер показал, что набор атомов идеального

газа можно описать волновым подходом и получить верные результаты, подобно тому, как это проделал Эйнштейн с «неестественным» статистическим методом Бозе. И хотя эта часть работы заслуживала уважения, Шрёдингер по большей части свел все концы, оставленные Эйнштейном и де Бройлем, но в то же время упустил в своей волновой теории несколько важных компонентов.

В начале ноября 1925 года Дебай предложил Шрёдингеру провести беседу на тему работы де Бройля на объединенном коллоквиуме университета Цюриха и Швейцарской высшей технической школы. По-видимому, как утверждал Феликс Блох (1905–1983), прислали приглашение вроде этого:

«Господин Шрёдингер, в любом случае, прямо сейчас Вы не работаете над очень важными проблемами. Почему бы Вам не рассказать нам как-нибудь о той диссертации де Бройля, которая, кажется, привлекла некоторое внимание?»

Коллоквиум представлял собой серию неформальных лекций (читавшихся раз в две недели, по два часа каждая) перед аудиторией, возможно, в пару дюжин слушателей максимум. Хотя точно неизвестно, наиболее вероятно, что Шрёдингер выступал между второй половиной ноября и первой половиной декабря, и, возможно, в то время, когда он работал над первой статьей по своей «волновой теории» (второй квантовой статистике). Шрёдингер дал прекрасный обзор работы де Бройля. Тем не менее Дебай не был удовлетворен и чувствовал, что в подходе де Бройля что-то было по-прежнему упущено. Опять же, как отмечал Блох: «Дебай случайно отметил, что он думал, что такой вариант обсуждения был довольно несерьезным. Будучи студентом Зоммерфельда, он узнал, что для правильной работы с волнами нужно волновое уравнение».

Дебай был прав. В классической физике все волны имеют связанное с ними волновое уравнение. Если упрощать, волновое уравнение описывает физический процесс движения волны в пространстве и во времени; оно выполняет для волн ту же роль, что и уравнение движения (второй закон Ньютона) – для частиц. Непонятно, насколько значительную роль сыграл комментарий Дебая в продвижении Шрёдингера вперед к получению волнового уравнения. Наиболее вероятно, что он заставил Шрёдингера более серьезно задуматься над этим, даже если он уже шел к уравнению. Можно реально легко

утверждать, что в исходном варианте его волновой теории было неявно представлено волновое уравнение, хоть до его полного получения было далеко.

Несомненно, для Шрёдингера волновое описание квантового мира было намного более привлекательным, чем представление о «прыгающих электронах» из модели атома Бора. Четко исходя из работы де Бройля, Шрёдингер попытался построить волновое уравнение электрона, движущегося в атоме водорода, простейшем из всех атомов. Естественно, он включил в свое уравнение эффекты специальной теории относительности. Однако на его пути возникло препятствие, и он обнаружил, что его новое релятивистское уравнение не смогло описать известные наблюдаемые эффекты. Шрёдингер никогда не публиковал эти результаты, возможно, разочаровавшись из-за неточностей теории. Тем не менее он не долго оставался в тупике.

Перед рождественскими каникулами Шрёдингер написал в Вену «старой подружке» с просьбой составить ему компанию в его любимом месте отдыха, Арозе. Предыдущие два Рождества он провел со своей женой, Анни, но теперь, по-видимому, он решил сменить обстановку. Личность этой женщины остается тайной, но, кем бы она ни была, кажется, что она послужила для него прекрасным источником вдохновения.

Шрёдингер, которому было уже тридцать восемь лет, начал то, что стало двенадцатимесячным периодом непрерывающегося творчества в 1926 году, результатом которого стали шесть больших статей по новой квантовой теории, известной как *волновая механика*. Вскоре после возвращения из Арозы Шрёдингер сделал доклад на другом коллоквиуме, начав его следующими словами (как передавал Блох): «Мой коллега Дебай указал на то, что нужно найти волновое уравнение [для электрона в атоме водорода]; что ж, я его нашел!»

Да, Шрёдингер нашел волновое уравнение. К сожалению, он так и не смог самостоятельно его решить и обратился к некоторым своим коллегам за помощью. То, насколько ему помогли, и кто вообще ему помог, неясно. Шрёдингер был очень способным и самостоятельным в математической физике, он получил прекрасную подготовку. Тем не менее, похоже, некоторую помощь оказал Герман Вейль (1885–1955), близкий друг Шрёдингера и математик – который также оказался

любовником жены Шрёдингера; и эту помощь Шрёдингер четко признал.

Уже 27 января 1926 года – прошло меньше трех недель с возвращения Шрёдингера из Арозы – журнал получил его первую статью под названием «Квантование как задача на собственные значения». Здесь он обрисовывает процесс^[209], который привел его к волновому уравнению, явно независящему от времени, используя в качестве примера (нерелятивистский) атом водорода. Теперь, когда волновое уравнение нашлось, целью становится поиск его решения, выражаемого *волновой функцией*.

Он с успехом нашел волновую функцию вместе с уровнями энергии электрона для атома водорода, для которого он, как следствие, верно получил формулу Бальмера. Вспомним, что в своей атомной теории Бор на самом деле не предоставил вывод этой формулы. Вместо этого он предположил, что она верна для спектра атома водорода и затем использовал ее, чтобы получить уровни энергии электрона. Более того, сам Бальмер никогда не проводил формальный вывод; это было что-то, до чего он «додумался». Ближе к завершению статьи Шрёдингер признал свой долг перед де Бройлем: «Прежде всего, я хотел бы упомянуть, что пришел к этим размышлениям в первую очередь благодаря убедительным статьям господина Луи де Бройля...»

Затем Шрёдингер продолжил, упомянув свою вторую статью по квантовой статистике, в которой он изложил «волновую теорию» идеального квантового газа Эйнштейна, и то, как его настоящий труд может рассматриваться в качестве обобщения той работы. Это многозначительное утверждение показало, что его предыдущая работа по квантовой статистике была полноправным предшественником волновой механики. Следующая статья пришла всего лишь через четыре недели после первой, 23 февраля, и остальные четыре последовали очень быстро, последняя была отправлена 21 июня.

Вскоре после этого последовала реакция на волновую механику Шрёдингера. Планк отметил, что прочитал первую статью, «словно нетерпеливый ребенок, узнавший разгадку головоломки, которая давно досаждала его». В отношении второй статьи Планк снова отзывался с энтузиазмом: «Вы можете представить себе, с каким интересом и энтузиазмом я погрузился в чтение этой эпохальной работы...» Планк на самом деле был впечатлен и рассчитывал привлечь Шрёдингера в

качестве своего преемника, как он, Планк, уйдет в отставку в 1927 году.

Эйнштейн вступил в обсуждение, сказав: «Идея Вашей работы исходит от настоящего гения!» Через десять дней он добавил: «Я убежден, что Вы решительно продвинулись вперед с Вашей формулировкой квантовых условий...»

Эренфест написал:

«Я просто в восторге от [Вашей теории] и от чудесной новой системы взглядов, которую она ведет за собой. В течение двух прошедших недель каждый день все члены нашей небольшой научной группы часами стояли по очереди у доски, чтобы испробовать все прекрасные следствия».

В основном, все были увлечены волновой механикой Шрёдингера. Однако это был не единственный вариант квантовой механики.

Две квантовых механики: Шрёдингера и Гейзенберга

С момента, когда Бор представил свою атомную квантовую теорию электронов, перескакивающих на нижний энергетический уровень, или орбиту, и излучающих при этом фотон определенной частоты, прошло более десяти лет. Атомная модель Бора дала очень хорошую, интуитивно понятную картину. Но реальность состоит в том, что мы не можем измерить движение электрона по орбите или даже по-настоящему узнать, существует ли это движение. С другой стороны, частотный спектр (спектральные линии), получающийся в результате электронных переходов на более низкие уровни энергии, – это то, что мы можем увидеть, и после всего этого времени он по-прежнему давал единственный ключ к разгадке внутренних механизмов атома.

Именно Вернер Гейзенберг (1901–1976) сказал, что правильная квантовая теория должна включать только те физические величины, которые на самом деле наблюдаемы. Когда ему было всего лишь двадцать три года, он принялся за построение такой теории. К концу мая 1925 года, после некоторого начального прогресса, Гейзенберга поразил тяжелый случай сенной лихорадки, что заставило его прервать обычный распорядок:

«От сенной лихорадки мне было настолько плохо, что пришлось попросить у моего профессора [Борна] отпуск. Я тут же отправился в Гельголанд, где я надеялся быстро выздороветь на бодрящем морском воздухе, вдали от цветения и лугов».

По-видимому, уединение на этом маленьком острове в Северном море не только освободило его от сенной лихорадки, но и освежило ум. Он говорил:

«Кроме повседневных прогулок и длинных заплывов, ничто не отвлекало меня от работы, и поэтому я быстрее добился прогресса, чем если бы работал [дома в университете] в Геттингене».

Не будем здесь вдаваться во все детали теории Гейзенберга, а вместо этого обратим внимание только на значимые аспекты. У теории Гейзенберга есть два важных элемента. Первый – это полный набор частот, на которых излучает атом вследствие перехода электронов на более низкие энергетические уровни. Вторая компонента, включенная им, – это вероятности, связанные с этими переходами.

Главным беспокойством, которое вызывала атомная модель Бора у Резерфорда, было отсутствие детерминированного поведения:

«Для меня представляется серьезной трудностью то, что Вы, без сомнений, прекрасно понимаете, а именно – как электрон [который вот-вот совершит переход] решает, на какой [энергетический уровень] он собирается [совершить переход, когда он] будет переходить с одного [энергетического уровня] на другой? Мне кажется, Вам придется предположить, что электрон заранее знает, куда ему перейти».

Гейзенберг эффективно решил эту проблему, включив набор вероятностей переходов, он утверждал, что в квантовой реальности нет привычного детерминизма классической физики, столь желанного для Резерфорда. Вместо этого различные переходы случаются просто в соответствии с их вероятностями. Такой прецедент уже был в работе Эйнштейна 1916–1917 годов, где он использовал концепцию вероятностей перехода для атомов, взаимодействующих со светом^[210].

К тому моменту, как Гейзенберг вернулся из Гельгоlanda, у него в руках был свой вариант квантовой механики, и он тут же начал записывать результаты, хотя и не без сомнений, доверяя их своему отцу в письме: «В данный момент моя собственная работа идет не особенно хорошо. У меня получается не очень много, и я не знаю, появится ли вообще из всего этого другая [статья] в этом семестре».

В начале июля 1925 года неуверенный Гейзенберг поехал к Борну со своей статьей и попросил его просмотреть ее и решить, стоит ли ее публиковать. При чтении статьи Борн был поражен математическими сущностями, возникающими из теории Гейзенберга, и был уверен, что видел их где-то раньше. Наконец в письме к Эйнштейну он вспомнил, что «[математический формализм] Гейзенберга не давал мне покоя, и после дней сосредоточенных размышлений и проверки я вспомнил об алгебраической теории, о которой я узнал от моего учителя...»

Теория, которую назвал Борн, была матричной алгеброй, а конкретнее, он вспомнил о правиле перемножения двух матриц. Поскольку в то время матрицы не были общеизвестными, Борн был одним из немногих физиков, кто реально мог их распознать. В конце месяца Борн направил статью Гейзенберга в журнал на публикацию.

Новая квантовая механика Гейзенберга была представлена в статье под названием «О квантовом теоретическом истолковании

кинематических и механических соотношений». В сентябре 1925 года Борн и его молодой помощник Паскуаль Йордан (1902–1980) сразу же расширили и уточнили исследование Гейзенберга. Все трое объединились для написания третьей статьи («Работы трех»), принятой в ноябре 1925 года. С этим окончательными усилиями они провозгласили, что обнаружили долгожданную квантовомеханическую теорию^[211]. И все это было сделано перед тем, как в журнал приняли первую статью Шрёдингера (27 января 1926 года). Конечно, Шрёдингер, когда формулировал волновую механику, знал о первых двух статьях, но не о третьей. Так или иначе, они никак не повлияли на его работу.

Это связано с тем, что с математической точки зрения два подхода сильно отличаются друг от друга. Центральным элементом в подходе Шрёдингера является волновое уравнение, дифференциальное уравнение в частных производных, решение которого дается столь важной волновой функцией. Формализм Гейзенберга никак не связан с волновым уравнением или какими-то другими уравнениями в частных производных; вместо этого там используются матрицы, вот почему он часто называется *матричной механикой*. Также его формализм по своему замыслу предполагает дискретные уровни энергии и соответствующие вероятности перехода, тогда как в волновой механике Шрёдингера эти уровни энергии не заложены – они просто получаются естественным путем при решении волнового уравнения и наложении правильных граничных условий на непрерывное решение – волновую функцию.

Что касается вероятностной природы, присутствующей в теории Гейзенберга, – да, ясно, что она отсутствует в формализме Шрёдингера. Это может показаться вам довольно странным, поскольку мы неоднократно замечали, что вероятность кажется внутренне присущей квантовой механике. Чуть позже мы увидим, что вероятность внутренне присуща и теории Шрёдингера; она просто слегка прячется сначала. То есть внешне эти теории кажутся очень разными, не только математически, но и по их физическому описанию, тот факт, на который их сторонники обращали внимание.

Шрёдингер подчеркивал непрерывную (присущую классической механике) природу своей теории, представляя электронные переходы в атомах, с которыми связано излучение или поглощение света – не с

помощью перескакивающих электронов, как изначально описывал Бор, а с помощью плавных переходов, при которых колеблющийся электрон (чем-то подобный одному из резонаторов Планка) просто «переходит» из одного колебательного состояния в другое:

«Вряд ли нужно обращать внимание на то, насколько более удобно представить, что при квантовом переходе энергия изменяется из одной формы колебаний в другую, чем думать о перескакивающем электроны».

Шрёдингер не скрывал свою неприязнь к теории Гейзенберга с ее матрицами, перескакивающими электронами и отсутствием интуитивно понятной физической картины:

«Я, разумеется, знал о теории [Гейзенберга], но чувствовал разочарование, если не отвращение, по отношению к тому, что явилось мне как очень сложные методы [матричной механики] и отсутствие ясности».

Кроме того, Шрёдингер считал, что его теория была с физической точки зрения более понятной, тем самым давая более твердое основание для решения и понимания физических проблем, тогда как вариант Гейзенберга был всего-навсего картиной из абстракций и сложной математики. В письме к другу он отмечал: «Все философствование по поводу “принципиальной наблюдаемости” только замалчивает нашу неспособность угадать правильное положение дел».

Шрёдингер на самом деле думал, что его практически визуализируемый волновой механики лучше всего послужил практическому и интеллектуальному развитию квантовой механики.

«Как мне кажется, чрезвычайно сложно бороться с проблемами [квантовой механики], когда мы считаем необходимым подавление интуиции эпистемологическими основаниями в области атомной динамики и оперирование такими абстрактными понятиями, как вероятности переходов, уровни энергии и т. д.».

Гейзенберг верил, что его теория запечатлела подлинную сущность квантовой механики, описывая ее как «истинную теорию дискретного», и выразил подобное негодование в адрес волновой механики Шрёдингера. Гейзенберг писал своему другу, Вольфгангу Паули (1900–1958):

«Чем больше я думаю о физическом компоненте теории Шрёдингера, тем более отталкивающим я его нахожу. ...То, что Шрёдингер пишет о визуализации своей теории, мягко говоря, “возможно, не совсем правильно”, а другими словами, ерунда».

И вот, когда показалось, что эти два варианта квантовой механики не могут отличаться еще больше, Шрёдингер написал статью «Об отношении квантовой механики Гейзенберга – Борна – Йордана к моей», показывая, что – как минимум с математической точки зрения – они являются одним и тем же.

Для физиков это была прекрасная новость, поскольку она означала, что можно было использовать любой из подходов для решения физических проблем. Иначе говоря, многие из физиков вздохнули с облегчением, потому что могли использовать вариант Шрёдингера, поскольку математика была намного менее громоздкой, чем матрицы теории Гейзенберга, и уже знакомой им по физическим проблемам, которые они решили раньше. Тем не менее физическая интерпретация обеих теорий была по-прежнему доступной всякому желающему.

Физические следствия квантовой механики

Главным вопросом, по-прежнему преследовавшим волновое уравнение, была роль волновой функции. Определенно, с математической точки зрения она ясна: это решение волнового уравнения Шрёдингера, «всемогущая» функция-результат. Однако с физической точки зрения она по-прежнему оставалась большой тайной для всех, в том числе и для самого Шрёдингера.

Сперва он интерпретировал ее как связанную с «некоторым колебательным процессом в атоме». Позднее для системы электронов Шрёдингер более точно объяснял квадрат модуля волновой функции (модуль волновой функции, умноженный на самого себя) как что-то вроде «весовой функции», связанной с плотностью заряда (или «плотности электричества», как он ее называл) в определенной области пространства. То есть он представлял отдельный электрон размазанным по всему пространству. Другими словами, он в прямом смысле представлял электрон не как частицу, находящуюся в определенной точке пространства, а как волну, распределенную по нему.

Шрёдингер не один размышлял о физическом смысле волновой функции. Несколько ученых начинали приходить к заключению, что волновая функция была на самом деле связана со своего рода *квантовой вероятностью*, сильно отличающейся от вероятности классической механики. Среди них были Поль Дирак (1902–1984), Юджин Вигнер (1902–1995) и, в первую очередь, Макс Борн. Работа Борна четко определяла физический смысл волновой функции и природу квантовой вероятности. Он писал: «Движение частиц подчиняется законам вероятности...»

Иначе говоря, движение квантовых частиц, таких как электроны, не управляется детерминированными уравнениями, как в случае классических частиц (или макроскопических объектов). В результате, в отличие от классической частицы, квантовая не движется по четко определенной физической траектории с хорошо определенными значениями величин, описывающих основные ее характеристики, такие как положение, импульс, энергия и другие подобные в каждый момент времени. Вместо этого, согласно Борну, эти физические

величины (и многие другие) полностью определяются квантовой вероятностью, которая пропорциональна квадрату модуля волновой функции. Как и Шрёдингеру, Борну квадрат модуля волновой функции раскрыл секрет истинного физического смысла волновой функции. Однако он понимал эту величину совершенно по-другому.

Борн также отмечал, что «сама вероятность распространяется согласно закону случая». То есть, хотя движение квантовой частицы не является детерминированным, квантовая вероятность, определяющая окончательный исход, является, и она дается волновым уравнением Шрёдингера (поскольку оно задает волновую функцию, а значит, и ее квадрат модуля). Это чем-то напоминает то, как мы обсуждали больцмановскую вероятность (в части 2). Вспомним, что больцмановская вероятность дает вероятность того, что произойдет определенное микросостояние из многих возможных для системы частиц. Однако все же есть важное отличие.

Больцмановская вероятность была математически удобной для рассмотрения системы очень большого числа частиц. Для такой системы просто невозможно использовать уравнение Ньютона, определяя физические траектории всех без исключения частиц. Это не означает, что их траектории и соответствующие положения, импульсы, энергии и им подобные не существуют. Несомненно, что в классической механике они существуют. И это всего лишь означает, что решение данной математической проблемы громоздкое. Таким образом, мы обращаемся к использованию больцмановской вероятности, потому что оно очень упрощает исходную проблему, позволяя нам рассчитывать средние величины для всей системы частиц.

В случае вероятности, связанной с квантовой механикой, ситуация совершенно другая. Здесь квантовая вероятность – это не просто способ упрощения некоторой сложной математики до более податливой проблемы. В квантовом мире вероятностная природа является *физической реальностью*. Поэтому *единственное*, что мы можем знать о квантовой частице, – это вероятность, которую вы обнаружите в данном квантовом (микро) состоянии. Итак, если в классической механике речь идет об эволюции частицы согласно уравнению Ньютона вдоль заданной траектории, то в квантовой механике эволюционирует вероятность для частицы согласно

уравнению Шрёдингера, переводя ее из одного квантового состояния в другое.

Интерпретация Борна решила серьезные проблемы, связанные с волновым уравнением Шрёдингера. Теперь стало ясно, как непрерывная волновая функция могла привести к возникновению дискретных уровней энергии, доступных электрону: волновая функция движется в пространстве вероятностей – не физическом – «направляя» электрон из одного квантового состояния в другое. Так, вероятностная природа квантового мира, которую Гейзенберг явно включил свою теорию, также присутствует и в теории Шрёдингера. Интерпретация Борна также вновь подтвердила электронные скачки в атоме Бора; теперь эти электронные переходы были наделены математической вероятностью их возникновения. Однако электронные орбиты (чисто классическое понятие), которые в течение некоторого времени впадали в немилость, в конце концов исчезли раз и навсегда. Для Шрёдингера это было уже слишком.

Можно было бы подумать, что Шрёдингер был большим фанатом статистической интерпретации Борна. Ведь это он в своем вступительном обращении в университете Цюриха в 1922 году сказал: «Вполне возможно, что все без исключения законы природы имеют статистический характер». Очевидно, не о квантовой вероятности он думал, когда утверждал следующее:

«Но сегодня мне больше не хотелось бы предполагать вместе с Борном, что отдельный процесс такого рода носит “абсолютно случайный характер”, то есть что он полностью не определен. Сейчас я больше не считаю, что эта концепция (которую я так отстаивал четыре года назад) достигает многого».

Шрёдингер был не единственным, у кого были проблемы с квантовой вероятностью; у Эйнштейна они тоже были.

Эйнштейн занимал лидирующую позицию в квантовой теории в течение более чем двадцати лет и был первым, кто ввел в нее вероятности переходов (в 1916 году), однако решил, что с него хватит. В 1917 году он отметил, что, согласно квантовой теории, направление переданного импульса при спонтанном излучении фотона атомом, по-видимому, определяется «случаем», и это до сих пор вызывает у него трудности. К 1926 году он стал абсолютно безжалостен в отношении

квантовой вероятности, и в ответе на письмо, которое ему написал Борн, заявил:

«Квантовая механика действительно впечатляет. Но внутренний голос говорит мне, что это еще не идеал. Эта теория говорит о многом, но все же не приближает нас к разгадке тайны Всевышнего. По крайней мере, я уверен, что *Он* не бросает кости».

Отказ Эйнштейна был для Борна тяжелым ударом. Эйнштейн официально отвернулся от квантовой механики и сохранял это убеждение всю оставшуюся жизнь. В 1944 году он подтвердил свое первоначальное заявление Борну: «Большой начальный успех квантовой теории не может обратить меня в веру в эту фундаментальную игру в кости».

В то время как Борн и Эйнштейн не соглашались друг с другом по части квантовой вероятности, Бор и Шрёдингер не соглашались, ну, практически во всем.

В сентябре 1926 года Бор пригласил Шрёдингера в Копенгаген прочитать лекцию и обсудить волновую механику более подробно. Не успел Шрёдингер сойти с поезда, как Бор начал спорить на тему физических интерпретаций квантовой механики. За несколько дней Бор стал даже более неутомимым в дискуссиях, начиная их рано утром и продолжая их до поздней ночи. Также, чтобы исключить возможность всяких отвлечений, Бор договорился, чтобы Шрёдингер гостил у него дома. Наиболее подробный отчет об этом визите поступил от Гейзенберга – в то время он был ассистентом Бора в институте. Он вспоминал: «Хотя Бор, как правило, был исключительно добрым и внимательным в отношениях с людьми, теперь он мне представился подобным безжалостному фанатику...»

Шрёдингер понимал свое волновое уравнение буквально, видя в квантовом объекте, подобном электрону, волну, а не частицу. Для него волновая функция была на самом деле материальной волной, описывающей, куда в пространстве различные части электрона были в действительности рассеяны. Также он настаивал на возможности чего-то наподобие визуализируемого построения внутренней работы атома.

Бор был полностью против. Он был согласен с Борном, что волновая функция описывала квантовую вероятность, а не что-то наподобие реальной физической волны. В течение их обсуждения Бор выступал в пользу корпускулярной концепции квантовых объектов, но позднее для

полного описания он потребовал как *корпускулярную, так и волновую* концепцию – полную реализацию «синтетической концепции» Эйнштейна 1909 года. Однако важнейшим предметом спора были перескакивающие электроны из атомной модели Бора.

По мнению Шрёдингера, сама идея перескакивания электронов из одного стабильного, или *стационарного*, дискретного квантового состояния в другое была нелепой: «Вы, господин Бор, несомненно, должны понять, что вся эта идея квантовых скачков с необходимостью приводит к абсурду... Иначе говоря, вся эта идея квантовых скачков – чистая фантазия».

Кто мог его обвинить? Атомная модель Бора не предлагала никакого «действительного» объяснения тому, почему электроны не падают на ядро, как это было бы в классической физике. Там просто была введена концепция стационарных квантовых состояний, которые являлись «магическими орбитами», избавлявшими электрон от этой трагической судьбы. И если это не слишком мешало, дальше нужно было признать, что электрон мог перескакивать между этими стационарными квантовыми состояниями просто при поглощении или излучении фотона, невзирая на то, что именно на самом деле управляло этим процессом.

Бор признавал, что принять эти концепции было сложно, но считал, что главная проблема Шрёдингера, связанная со всем этим, уходила корнями в его потребность в наглядной работе:

«...она не доказывает, что квантовых скачков нет. Она лишь доказывает, что мы не можем их представить, что наглядные концепции, с которыми мы описываем явления в повседневной жизни и эксперименты в классической физике, непригодны, когда дело касается описания квантовых скачков. Нам также не следует удивляться, когда мы обнаруживаем такую непригодность, видя, что рассматриваемые процессы не являются объектами непосредственного опыта».

Шрёдингер продолжал настаивать на том, что устранение дискретных квантовых состояний принятием его волновой картины электрона разгадает «квантовую таинственность». Бор подчеркивал, что и закон излучения Планка, и работа Эйнштейна по взаимодействию света и вещества требовали дискретных квантовых состояний. Неужели Шрёдингер собирался разрушить самые

основания квантовой механики? Более того, Бор утверждал, что эксперименты уже подтвердили эту дискретную природу атома самыми различными способами. На это расстроенный Шрёдингер ответил: «Если все эти проклятые квантовые скачки реально никуда не денутся, я буду сожалеть, что вообще ввязался в квантовую теорию».

Через несколько дней Шрёдингер заболел и лежал в постели с жаром; возможно, Бор его в конце концов измотал. Госпожа Бор присматривала за ним, принося ему чай и пирог в кровать, а все это время сам Бор сидел на краю кровати, продолжая спорить: «Но, без сомнений, господин Шрёдингер, вы должны понимать...»

Но Шрёдингер не мог понять. Хотя обсуждение сильно повлияло на каждого из них, в конце они не смогли найти решение. Тем не менее, Бор и Шрёдингер остались друзьями.

Как только Шрёдингер уехал, дискуссии продолжились, но теперь между Бором и Гейзенбергом. Гейзенберг вспоминал: «В течение нескольких следующих месяцев [после визита Шрёдингера] физическая интерпретация квантовой механики была центральной темой всех разговоров между Бором и мной».

Как и у Бора со Шрёдингером, разговоры между Бором и Гейзенбергом были столь же напряженными, хотя теперь продолжались месяцами, а не несколькими днями. К февралю 1927 года они уже поднадоели друг другу, что побудило Бора удалиться на лыжную экскурсию в Норвегию и наконец оставить Гейзенберга наедине с его мыслями – к большому его облегчению. За несколько дней Гейзенберг уже обнаружил кое-что.

Вспомним, что, используя формализм Шрёдингера, Борн заключил: квантовая частица не следует по детерминированной траектории, как это было бы в классической механике. Вместо этого квантовым состоянием, в котором она была (и будет позже), полностью управляла внутренне присущая квантовая вероятность. Гейзенберг задался таким вопросом: а что если мы реально попытаемся измерить траекторию электрона, или, что проще, положение и импульс электрона? В оригинальном мысленном эксперименте Гейзенберг вообразил микроскоп, способный выполнить такое задание.

Итак, микроскоп работает, потому что фотон (идущий от источника света) отскочил (отразился) от объекта (вроде электрона) и в конце концов прошел через линзу, за которой чей-то глаз или некоторый

другой детектор его замечает. Из классической волновой оптики уже было известно, что неопределенность (разрешающая способность) положения объекта *непосредственно связана* с длиной волны используемого фотона. Так, если вы хотите добиться лучшего разрешения положения объекта, вам нужно использовать фотон меньшей длины волны. Иначе говоря, если вы хотите измерить нечто, вам нужно использовать «линейку» с более точными, или меньшими, делениями. Более того, было также известно, что неопределенность положения *обратно пропорциональна* диаметру линзы, используемой для того, чтобы собрать упомянутые нами фотоны. Опять же, все это следует из классической волновой оптики – пока еще ничего квантового не происходит, кроме того, что мы называем свет фотоном. Теперь, когда мы справились с определением положения электрона, давайте перейдем к импульсу.

Когда фотон отскакивает от электрона, то при столкновении они обмениваются импульсом. Импульс, потерянный фотоном, будет по модулю равен приобретенному электроном – суммарный импульс сохраняется. Ясно, что если мы можем определить, насколько изменился импульс фотона, тогда мы сможем определить импульс электрона до столкновения^[212], что даст нам и положение, и импульс электрона одновременно. Однако есть небольшая проблема. На самом деле мы не знаем направление полета падающего фотона после того, как он отскочит от электрона. Мы точно знаем только то, что он принадлежал «диапазону направлений», при движении в каждом из которых он в результате пройдет через линзу, тем самым позволяя нам определить положение электрона (в пределах неопределенности, отмеченной выше). А теперь этот диапазон направлений можно сузить, чтобы уменьшить неопределенность направления импульса фотона. Все, что нам нужно сделать, – это уменьшить диаметр линзы микроскопа.

Ой, ну подождите, ведь неопределенность в положении электрона *обратно пропорциональна* диаметру линзы, и уменьшение ее диаметра приведет к большей неопределенности в положении. Для решения этой проблемы мы могли бы использовать фотон с меньшей длиной волны. К сожалению, оказывается, что это увеличит неопределенность импульса, благодаря – вы угадали – квантовой природе импульса фотона. Гейзенберг смог использовать свой подход матричной

механики, чтобы показать, что определенную пару величин, характеризующих свойства (например, координата и составляющая импульса, направленная вдоль той же оси, от которой данная координата отсчитывается), нельзя определить с произвольной точностью. А именно он обнаружил, что произведение их неопределенностей не может быть меньше, чем постоянная Планка^[213]. Это означает, что если мы получаем более точные знания об одной из характеристик, то в результате наше знание о соответствующей дополняющей характеристике становится меньше. Итак, мы знаем одну характеристику почти абсолютно точно – и поэтому о другой не знаем совсем ничего; или, в качестве компромисса, знаем немного – об обоих.

Это не имеет никакого отношения к нашим возможностям (или их отсутствию) измерения этих величин. Наоборот (вернемся к нашему примеру с микроскопом), это означает, что квантовые частицы наподобие электрона просто не обладают точным положением и точным импульсом в один и тот же момент времени; для них эти характеристики существуют только *расплывчато*, неопределенно. Давайте осознаем, что если Борн использовал квантовую вероятность, чтобы устранить из квантовой механики детерминизм, то в *принципе неопределенности Гейзенберга* это происходит безо всякого обращения к понятиям, связанным с вероятностью. Поэтому они выступают как два независимых удара против причинности. Возможно самым лучшим примером, иллюстрирующим квантовую вероятность и корпускулярно-волновой дуализм, является *опыт с двумя щелями*.

Опыт с двумя щелями

Представим «электронную пушку», стреляющую электронами в направлении экрана с двумя отверстиями (или щелями), которые находятся от нее на одинаковом расстоянии D , а также на одинаковом расстоянии D' от центра экрана (см. рис. 16.1). Электронная пушка установлена на башне, которая движется вперед и назад, а также из стороны в сторону, что очень похоже на движение вращающегося вентилятора. С учетом такого движения ясно, что мы не ставим перед собой цель попасть электронами в щели; вместо этого мы просто стреляем очень много раз случайным образом. Сами щели имеют одинаковые размеры, достаточно большие, чтобы через них мог пройти электрон.

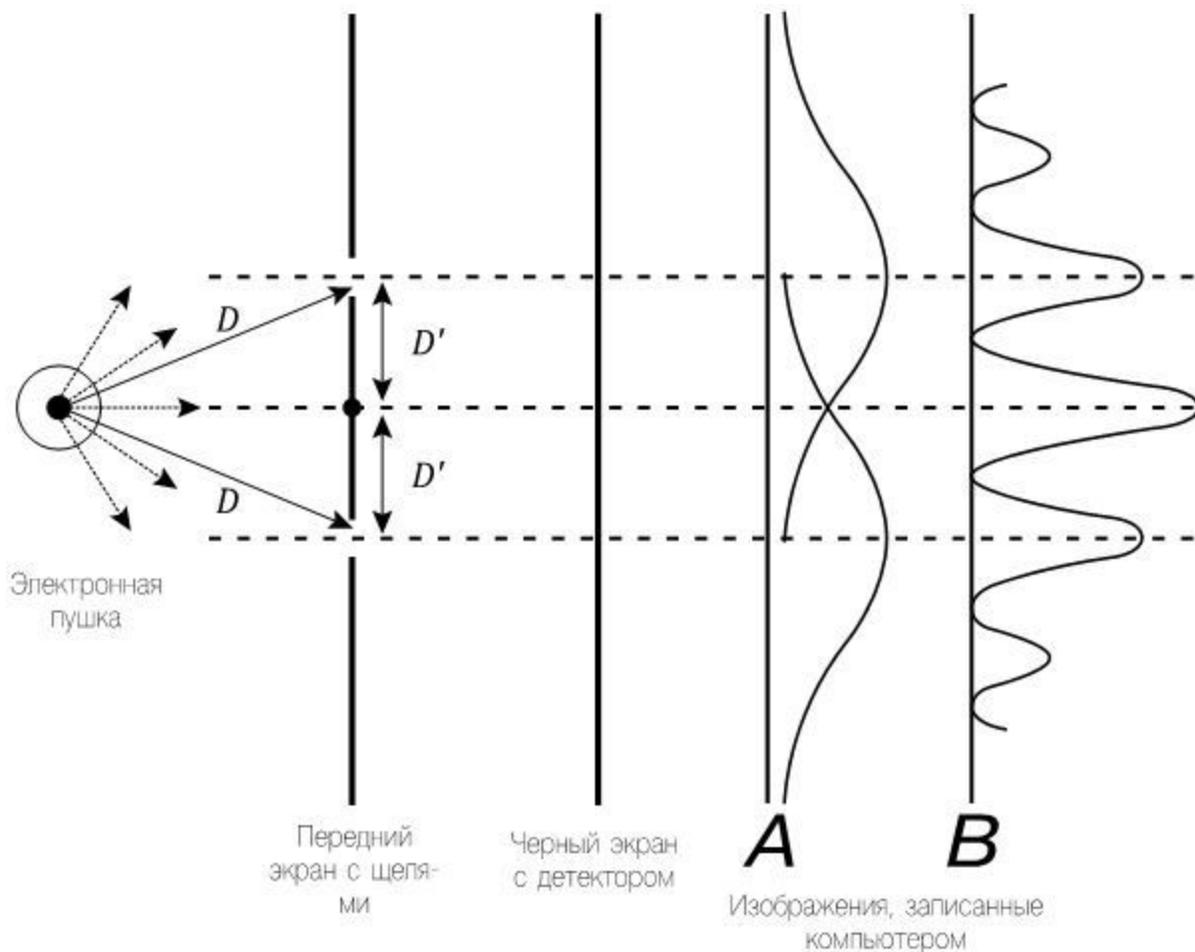


Рис. 16.1. «Электронная пушка» стреляет наобум по экрану с двумя щелями, находящимися на одинаковом расстоянии D от нее, а также на одинаковом расстоянии D' от центра экрана. У заднего экрана электроны тормозят, и детектор регистрирует их положение и отправляет информацию на компьютер. Изображение A показывает распределение, которое мы получаем, когда располагаем детектор у каждой из щелей, чтобы зафиксировать прохождение электрона. В этом случае мы не видим интерференционной картины и фактически получаем результат, который мы бы ожидали, если бы электрон вел себя исключительно как частица, – здесь он просто проходит либо через одну щель, либо через другую. Однако, когда детекторы отсутствуют, мы получаем изображение B . Здесь при прохождении электронов через щели мы реально видим интерференционную картину.

Подлетая к щели, некоторые электроны проходят через нее, а другие – нет. Прошедшие электроны продолжают свой путь, пока в конце концов не столкнутся с другим экраном, расположенным гораздо дальше^[214] и играющим роль заслонки. Детектор на этом заднем экране фиксирует окончательное положение каждого электрона, а потом отправляет информацию о нем на компьютер для дальнейшей обработки.

По мере того, как мы выстреливаем все больше и больше электронов (мы хотим собрать хорошую статистику), все больше и больше электронов проходят через щели и ударяют по заднему экрану. Накопив сведения о многочисленных положениях электронов, компьютер способен создать картину, или распределение. Если наша статистика достаточно хороша, то из этого распределения мы узнаем вероятность нахождения электрона в определенном положении на заднем экране, когда он случайным образом выстреливается по двум щелям. Итак, как выглядит это распределение?

Перед тем, как мы дойдем до этого, давайте воспользуемся моментом, чтобы попробовать предсказать результаты. Ясно, что если электрон ведет себя исключительно как частица, разумно ожидать, что он проходит либо через одну щель, либо через другую. Более того, электрон, проходящий через щель, либо «убьется» об боковую часть

или об край, либо пройдет вперед полностью невредимым. Если он проходит вперед, мы обнаружим его прямо за щелью – образно говоря, в «центральной позиции», – когда он ударяет по заднему экрану; тогда как если он врезается, то мы обнаружим, что он ударяет по экрану на некотором расстоянии от центрального положения, с одной из сторон от него. С учетом всего этого мы ожидаем, что распределение для данной щели будет таким, что максимальное число ударов происходит прямо в центральное положение, тогда как с удалением от него число ударов постоянно уменьшается. И последнее, распределение по обоим сторонам от центрального положения будет выглядеть одинаково. То есть оно будет *симметричным*.

Хорошо, у нас появилась довольно четкая картина того, что мы увидим. Но при проведении опыта мы обнаруживаем, что получающееся в результате распределение на экране компьютера совсем не похоже на то, что мы представляли. Вместо этого мы обнаруживаем, что максимум распределения приходится на пространство между двумя щелями – даже не на центральное положение для какой-либо из двух щелей! Распределение по-прежнему симметрично относительно максимума (как минимум, это есть), но при движении от центра мы не видим, чтобы число ударов постоянно уменьшалось, как мы представляли. Вместо этого на каждой стороне заметны пики с большим числом ударов, ну а вне этих пиков видно, что число ударов стабильно уменьшается до самого нуля, где не показывается ни одного электрона. Что же произошло?

Итак, при наших ожиданиях мы предположили, что электрон ведет себя как частица, но нам реально надо было сразу отгадать результат, поскольку все квантовые частицы демонстрируют корпускулярно-волновой дуализм. Короче говоря, распределение, полученное сбором большого количества положений электронов, показывает *интерференционную* картину. Ранее мы вкратце рассмотрели, как может происходить интерференция между волнами. Очевидно, должны быть волны, связанные с нашими электронами, которые вызывают эту интерференционную картину. Что это за волны? Вспомним, что положение каждого электрона на заднем экране будет определять квантовая вероятность, как мы обсуждали раньше. В свою очередь, квантовая вероятность дается (квадратом модуля) волновой

функции; похоже, что мы нашли «волну», вызывающую интерференцию.

Давайте попытаемся понять все это глубже. Вместо того, чтобы выстреливать по щелям большим количеством электронов сразу, давайте выпустим один электрон за раз. Вначале мы заметим, что сразу после выпуска электрона он долетит до заднего экрана, и мы обнаружим его положение. Пока все хорошо. Однако, когда мы будем продолжать стрелять по щелям отдельными электронами, мы заметим кое-что довольно странное. В конце концов мы получим ту же самую интерференционную картину, которую мы увидели раньше, когда запускали много электронов. То есть не имеет значения, будем ли мы выпускать по несколько электронов или же всего один за раз – появляется та же самая интерференционная картина! Это означает, что один электрон – когда он сближается с двумя щелями – в конечном итоге интерферирует сам с собой.

Это кажется настолько странным, что мы решили провести последний эксперимент, чтобы дойти до сути вещей. У каждой щели мы располагаем детектор, который будет фиксировать электрон, проходящий мимо него. Несомненно, это прольет свет на странные результаты, которые мы получаем. Опять же, мы выстреливаем одним электроном за раз по щелям, снова и снова до того, когда мы сможем четко увидеть распределение на мониторе компьютера. В этот раз мы обнаруживаем, что интерференционная картина полностью исчезла, и вместо этого остается распределение положений электронов, которое мы ожидали изначально! То есть когда мы не смотрим на щели (с помощью наших детекторов), один электрон претерпевает интерференцию, но когда мы смотрим, то обнаруживаем, что электрон проходит либо только через одну щель, либо только через другую, и интерференционная картина полностью исчезает.

Эти опыты иллюстрируют саму сущность квантовой механики. Мы видим, что электрон ведет себя как частица, когда он ударяет по заднему экрану и фиксируется детектором как локализованный объект, но где-то до фиксации возникает интерференция вследствие его волновой природы и его «взаимодействия» с двумя щелями одновременно. Эта волновая природа тесно связана с квантовой вероятностью нахождения электрона в определенном положении на заднем экране, что в конечном счете приводит к распределению

ударов, которое мы наблюдаем. Если мы попытаемся точно определить, где электрон приземлится на заднем экране, попробовав посмотреть, через какую из щелей он проходит, все пойдет не так, и интерференция исчезнет совсем.

Хотя мы выбрали для нашего опыта электроны, такое таинственное поведение демонстрируют все квантовые частицы. Если все это вам кажется больше научной фантастикой, чем настоящей наукой, вы не одиноки. Физические следствия квантовой механики, говоря по-простому, по сравнению с нашим повседневным опытом выглядят явно странно.

Игра случая

Квантовая теория и ее преемница квантовая механика встряхнули сами основы нашего понимания физического мира, в котором мы живем. Энергия, свет, атомы и вещество – все эти главные действующие лица стали предметом пристального внимания. До предела были доведены даже сами понятия, которые мы используем для описания некоторых из них, например «волна» или «частица», и это заставило нас принять существование корпускулярно-волнового дуализма для всех квантовых сущностей (электрона, света и им подобных). Как будто всего этого было недостаточно, от самого детерминизма, который всегда был частью классической физики, теперь пришлось отказаться в пользу неопределенности и всеобъемлющей квантовой вероятности. Эти последние понятия часто приводят к величайшей путанице.

Принцип неопределенности Гейзенберга определяет строгое физическое ограничение (налагаемое самой природой) на то, сколько мы можем знать об определенных парах величин, например о координате электрона и составляющей импульса, направленной вдоль той же оси, от которой отсчитывается данная координата. Другими словами, более совершенные измерительные приборы никогда не устранят эту неотъемлемую неопределенность и не углубят наши знания. Это также означает, что квантовая частица, подобная электрону, просто не обладает хорошо определенной траекторией, вдоль которой она двигалась бы. Вместо этого она «перемещается» между квантовыми состояниями согласно квантовой вероятности, с которой связана волновая функция Шрёдингера. Атом Бора с его «перескакивающими электронами» – хоть там всего этого и нет – иллюстрирует такое «движение» очень хорошо, к великому разочарованию Шрёдингера.

Хотя квантовая вероятность напоминает классические вероятности Максвелла и Больцмана, они далеки от истины. Их вводили намеренно, чтобы облегчить бремя сложной математики, и они по-прежнему сохраняют основополагающий детерминизм, столь дорогой для классической физики. В противоположность этому, квантовая вероятность является решительным вызовом природы против

детерминизма вообще. В самом деле, безрассудный отказ от хорошо отлаженной «мировой машины» в пользу «игры случая», несомненно, создает величайшую проблему для мировосприятия. Тем не менее, по общепризнанному мнению, квантовая механика, со всей ее «таинственностью» и вероятностным подтекстом, выдержала проверку временем.

Эпилог

Отсюда туда

Энергия, энтропия, атомы и квантовая механика образуют твердый фундамент, на котором сегодня стоит значительная часть науки. Вот почему я сделал их главными темами этой книги. Моей целью было рассказать вам о текущем положении дел в науке и о ее захватывающей предыстории. В этом рассказе мы познакомились с богатой историей и узнали больше о реальных ученых, борющихся и с профессиональными, и с личными проблемами, чтобы внести смысл и ясность во многие важные вопросы, касающиеся Вселенной, в которой мы живем. Делая это, каждый из них опирался на работу и энтузиазм остальных, чтобы узнать «нечто абсолютное» (как сказал Планк). Именно так наука развивалась как целое – и продолжит двигаться вперед. Мы обсудили главных исследователей, но были и многие другие, которые на протяжении многих лет что-то добавляли, и много и мало, к нашему пониманию в целом. Я сожалею только, что не смог рассказать о них подробно, но я благодарен им за их усилия и жертвы. Области науки, которыми я страстно увлечен, химия и физика, продолжают делать огромные шаги вперед. Позвольте мне показать вам лишь несколько достижений.

В 1917 году Эйнштейн уже выразил «беспокойство», связанное с квантовой механикой и внутренне присущей ей вероятностной природой. Тем не менее он продолжал делать существенный вклад в науку, и его последним значительным усилием стали три статьи, посвященные идеальному квантовому газу и написанные в 1924–1925 годах. В течение последних тридцати лет жизни Эйнштейна его научная деятельность была сосредоточена на поисках *единой теории поля*. Разумно предположить, что в тот переломный момент в 1917 году он уже думал об этих поисках и к 1920-м годам сконцентрировался на них.

Первой и наиболее важной для него была попытка объединить гравитацию (описываемую его же собственной общей теорией относительности) и электромагнетизм (описываемый уравнениями Максвелла).

Более того, он хотел, чтобы известные физике частицы были выведены как частные решения окончательных уравнений той теории. Наконец, что немаловажно, Эйнштейн требовал, чтобы такая теория была полностью причинной. Другими словами, новая теория должна была объяснять (вдобавок к другим вещам) всю ту квантовую механику, которую так успешно смогли объяснить до нее, но уже без необходимости в квантовой вероятности.

Эйнштейн умер в больнице в Принстоне 18 апреля 1955 года. По-видимому, он до последнего работал, но потерпел неудачу в поиске единой теории, которую он так желал найти. Однако попытки подобного объединения и сегодня остаются активной областью исследований, главным образом в виде *теории струн* ^[215].

Если квантовая механика с квантовой вероятностью для вас недостаточно странная, вот вам: буквальная физическая интерпретация математики уравнения Шрёдингера позволяет представить квантовую систему, находящуюся в двух или более квантовых состояниях – их суперпозиции – одновременно. Это в какой-то мере сотрясает наше мировосприятие, поскольку не похоже, чтобы знакомый нам по опыту мир демонстрировал такую безумную смесь реальности.

В квантовой механике принято считать, что определенный исход возникает из-за того, что при наблюдении волновая функция «коллапсирует» в четко определенное квантовое состояние. Вспомним, что, когда мы рассматривали опыт с двумя щелями, мы помещали детектор у каждой щели, надеясь разобраться в загадочной интерференции электронов при их прохождении через щели. Вместо этого мы увидели только четко определенное квантовое состояние, в котором один электрон проходил либо через одну щель, либо через другую, а интерференционная картина полностью пропала. Коллапс волновой функции входит в *копенгагенскую интерпретацию* квантовой механики и в течение некоторого времени оставался стандартным явлением.

Однако у Хью Эверетта III (1930–1982) на этот счет было совсем другое мнение. Вместо того чтобы искусственно вводить коллапс волновой функции в одно из квантовых состояний при наблюдениях, Эверетт предпочел допустить все возможные исходы. Хитрость состоит в том, что все они будут возникать в различных *параллельных*

вселенных. Так что пока мы наблюдаем данный исход в нашей Вселенной, за другими исходами в других Вселенных следят предполагаемые наблюдатели вроде нас или, возможно, даже наши копии. Концепция такой *Мультивселенной* встречается не только в квантовой механике. Она появляется и в теории относительности, космологии и других областях^[216].

В своей повседневной жизни мы пришли к убеждению, что определенные вещи никогда не случатся: разбитый стакан никогда не соберется обратно; воздух никогда не переместится полностью из одной половины комнаты в другую, оставив нас бездыханными (слава Богу!). Как мы узнали, подобные процессы (или переходы) не случаются потому, что это не позволяет их необратимость. Более того, необратимость тесно связана с естественной тенденцией Вселенной увеличивать свою энтропию, что вовсе не упоминается в первом начале термодинамики, но вместо этого ложится в основу второго. Размышляя, например, о разбитом стакане, можно наверняка прийти к заключению, что когда-то в *прошлом* он был цел. Иначе говоря, *стрела времени*^[217] направлена так, что возрастание энтропии указывает на настоящее или будущее, но не на прошлое.

Больцман учил, что предпочтительному для системы макросостоянию соответствует много микросостояний, и поэтому его энтропия максимальна (при данном наборе величин, характеризующих условия, в которых находится система, например температура, давление и т. д.). В самом деле, у разбитого стакана больше микросостояний (микроскопических расположений атомов, составляющих стекло), чем в одном-единственном варианте, когда он не разбит (если быть точным, склеивание его осколков вместе не делает его снова не разбитым). И хотя объяснение Больцмана приносит некоторое облегчение, не достает чего-то фундаментального, а именно – ответа на вопрос: каков глубинный механизм, который в реальности направляет Вселенную (или систему) в первую очередь в сторону возрастания энтропии? Честно говоря, мы до сих пор его не знаем.

Я бы мог продолжать дальше, но придется оставить вас наедине со всем этим множеством вещей, которые мы уже обсудили, и я надеюсь, что это поможет вам найти свою страсть к науке.

Список литературы

Aitchison, Ian J. R., David A. MacManus, and Thomas M. Snyder. "Understanding Heisenberg's 'Magical' Paper of July 1925: A New Look at the Computational Details." *American Journal of Physics* 72 (2004): 1370–1379.

Antognazza, Maria R. *Leibniz: An Intellectual Biography*. New York: Cambridge University Press, 2008.

Badino, Massimiliano. "Probability and Statistics in Boltzmann's Early Papers on Kinetic Theory." *PhilSci-Archive: An Archive for Preprints in Philosophy of Science*. <http://philsci-archive.pitt.edu/2276/> (accessed 2016).

–. "The Odd Couple: Boltzmann, Planck and the Application of Statistics to Physics (1900–1913)." *Annalen Der Physik* 18 (2009): 81–101.

Banach, David. "Plato's Theory of Forms." *David Banach Homepage (Philosophy 105)*. <http://www.anselm.edu/homepage/dbanach/platform.htm> (accessed 2016).

–. "Some Main Points of Aristotle's Thought." *David Banach Homepage (Philosophy 105)*. <http://www.anselm.edu/homepage/dbanach/arist.htm> (accessed 2016).

Boas, Marie. "The Establishment of the Mechanical Philosophy." *Osiris* 10 (1952): 412–541.

Bose, Satyendra N. "Planck's Law and the Light Quantum Hypothesis (Translated by O. Theimer and Budh Ram)." *American Journal of Physics* 44 (1976): 1056–1057.

Boyle, Robert. *The Sceptical Chymist*. Mineola: Dover Publications, 2003.

Brush, Stephen G. "How Ideas Became Knowledge: The Light-Quantum Hypothesis 1905–1935." *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences* 37 (2007): 205–246.

–. "The Development of the Kinetic Theory of Gases." *Archive for History of Exact Sciences* 12 (1974): 1–88.

–. *The Kinetic Theory of Gases: An Anthology of Classic Papers with Historical Commentary (History of Modern Physical Sciences, Vol. 1)*. London: Imperial College Press, 2003.

Burnham, Douglas. "Gottfried Leibniz: Metaphysics." *The Internet Encyclopedia of Philosophy*. <http://www.iep.utm.edu/leib-met/> (accessed 2016).

Campbell, Gordon. "Empedocles." *The Internet Encyclopedia of Philosophy*. <http://www.iep.utm.edu/empedocl/> (accessed 2016).

Cassidy, David C. *Uncertainty: The Life and Science of Werner Heisenberg*. New York: W. H. Freeman, 1992.

Cercignani, Carlo. *Ludwig Boltzmann: The Man Who Trusted Atoms*. New York: Oxford University Press, 1998.

Clausius, Rudolf. *The Mechanical Theory of Heat: With Its Applications to the Steam-Engine and to the Physical Properties of Bodies*. Edited by Thomas A. Hirst. J. Van Voorst, 1867.

Cohen, S. Marc. "Aristotle's Metaphysics." *The Stanford Encyclopedia of Philosophy (Summer 2014 Edition)*. Edited by Edward N. Zalta. <http://plato.stanford.edu/archives/sum2014/entries/aristotle-metaphysics/> (accessed 2016).

Cottingham, John, ed. *The Cambridge Companion to Descartes*. Cambridge University Press, 1992.

Cropper, William H. *Great Physicists: The Life and Times of Leading Physicists from Galileo to Hawking*. New York: Oxford University Press, 2004.

-. *The Quantum Physicists: And an Introduction to Their Physics*. New York: Oxford University Press, 1970.

Darrigol, Olivier. "Continuities and Discontinuities in Planck's Akt der Verzweiflung." *Annalen der Physik* 9 (2000): 951–960.

-. *From c-Numbers to q-Numbers: The Classical Analogy in the History of Quantum Theory*. Berkeley: University of California Press, 1992.

-. "The Historians' Disagreements over the Meaning of Planck's Quantum." *Centaurus* 43 (2001): 219–239.

-. "The Origins of the Entropy Concept." Edited by J. Dalibard, B. Duplantier, and V. Rivasseau. *Poincaré seminar 2003: Bose-Einstein condensation, Entropy*. Basel: Birkhäuser, 2004, 101–118.

De Camp, L. Sprague. *The Ancient Engineers: Technology and Invention from the Earliest Times to the Renaissance*. New York: Sterling Publishing, 1990.

Debus, Allen G. "Paracelsus, Five Hundred Years: Three American Exhibits." U. S. *National Library of Medicine*.

<http://www.nlm.nih.gov/exhibition/paracelsus/index.html> (accessed 2016).

Descartes, René. *Principles of Philosophy*. Translated by Valentine R. Miller and Reese P. Miller. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1991.

Dirac, Paul A. M. “The Physical Interpretation of the Quantum Dynamics.” *Proceedings of the Royal Society of London A* 113 (1927): 621–641.

Dobbs, Betty Jo T. *The Foundations of Newton’s Alchemy*. Cambridge: Cambridge University Press, 1983.

Drake, Stillman. *Essays on Galileo and the History and Philosophy of Science*. Edited by Trevor H. Levere and Noel M. Swerdlow. Vol. 1. Toronto: University of Toronto Press, 1999.

–. *Essays on Galileo and the History and Philosophy of Science*. Edited by Trevor H. Levere and Noel M. Swerdlow. Vol. 2. Toronto: University of Toronto Press, 1999.

–. *Essays on Galileo and the History and Philosophy of Science*. Edited by Trevor H. Levere and Noel M. Swerdlow. Vol. 3. Toronto: University of Toronto Press, 2000.

–. *Galileo at Work: His Scientific Biography*. Mineola: Dover Publications, 1995.

–. *Galileo: A Very Short Introduction*. New York: Oxford University Press, 2001.

Eckert, Michael. “Max von Laue and the Discovery of X-Ray Diffraction in 1912.” *Annalen der Physik* 524 (2012): A83–A85.

Einstein, Albert. *Letters on Wave Mechanics: Correspondence with H. A. Lorentz, Max Planck, and Erwin Schrödinger*. New York: Open Road, 2011.

–. *The Collected Papers of Albert Einstein, Volume 14: The Berlin Years: Writings & Correspondence, April 1923–May 1925 (English Translation Supplement)*. Edited by Diana K. Buchwald, József Illy, Ze’ev Rosenkranz, Tilman Sauer, and Osik Moses. Translated by Ann M. Hentschel and Jennifer N. James. Princeton: Princeton University Press, 2015.

–. *The Collected Papers of Albert Einstein, Volume 2: The Swiss Years: Writings, 1900–1909*. Translated by Anna Beck. Princeton: Princeton University Press, 1989.

–. *The Collected Papers of Albert Einstein, Volume 6: The Berlin Years: Writings, 1914–1917*. Translated by Alfred Engel. Princeton: Princeton

University Press, 1997.

Fara, Patricia. *Newton: The Making of Genius*. New York: Columbia University Press, 2004.

Faraday, Michael. "On the Absolute Quantity of Electricity Associated with the Particles or Atoms of Matter." *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 124 (1834): 77–122.

Feynman, Richard P., Robert B. Leighton, and Matthew Sands. *The Feynman Lectures on Physics: Commemorative Issue, Three Volume Set*. Redwood City: Addison Wesley, 1989.

–. *The Character of Physical Law*. New York: Modern Library, 1994.

Fitzpatrick, Richard. "Heisenberg's Uncertainty Principle." *Quantum Mechanics*.

<http://farside.ph.utexas.edu/teaching/qmech/Quantum/node27.html>
(accessed 2016).

Fowler, Michael. "Evolution of the Atomic Concept and the Beginnings of Modern Chemistry." *Modern Physics*.
<http://galileo.phys.virginia.edu/classes/252/atoms.html> (accessed 2016).

Galilei, Galileo. *Dialogue Concerning the Two Chief World Systems: Ptolemaic and Copernican*. Edited by Stillman Drake. New York: The Modern Library, 2001.

–. *Dialogues Concerning Two New Sciences*. Translated by Henry Crew and Alfonso de Salvio. New York: Prometheus Books, 1991.

–. *On Motion and Mechanics: Comprising De Motu (ca. 1590) and Le Meccaniche (ca. 1600)*. Translated by I. E. Drabkin and Stillman Drake. Madison: The University of Wisconsin Press, 1960.

–. *The Essential Galileo*. Translated by Maurice A. Finocchiaro. Indianapolis: Hackett Publishing Company, Inc, 2008.

Galilei, Galileo, and Stillman Drake. *Two New Sciences / A History of Free Fall: Aristotle to Galileo*. Translated by Stillman Drake. Toronto: Wall & Emerson, Inc., 2000.

Gamow, George. *The Great Physicists from Galileo to Einstein*. Mineola: Dover Publications, 1988.

Gavin, Sean, and Stephen P. Karrer. "The Living Force." *Sean Gavin's Homepage*.

http://rhig.physics.wayne.edu/~sean/Sean/Course_information_files/VisViva.pdf (accessed 2016).

Gearhart, Clayton A. "Planck, the Quantum, and the Historians." *Physics in Perspective* 4 (2002): 170–215.

Georgia State University. *HyperPhysics*. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hph.html> (accessed 2016).

Gindikin, Semyon G. *Tales of Physicists and Mathematicians*. Translated by Alan Shuchat. Boston: Birkhäuser, 1988.

Goldstein, Martin, and Inge F. Goldstein. *The Refrigerator and the Universe: Understanding the Laws of Energy*. Cambridge: Harvard University Press, 1995.

Graham, Daniel W. "Anaximenes." *The Internet Encyclopedia of Philosophy*. <http://www.iep.utm.edu/anaximen/> (accessed 2016).

Gribbin, John. *Erwin Schrödinger and the Quantum Revolution*. Hoboken: Wiley, 2013.

Hankins, Thomas L. "Eighteenth-Century Attempts to Resolve the Vis Viva Controversy." *Isis* 56 (1965): 281–297.

Harman, Peter M. *Energy, Force and Matter: The Conceptual Development of Nineteenth-Century Physics*. Cambridge University Press, 1982.

Heilbron, John L. *Galileo*. Oxford: Oxford University Press, 2012.

Heisenberg, Werner. *Encounters with Einstein: And Other Essays on People, Places and Particles*. Princeton: Princeton Science Press, 1989.

–. *The Physical Principles of the Quantum Theory*. Translated by Carl Eckart and F. C. Hoyt. Mineola: Dover Publications, 1949.

Holmyard, Eric J. *Alchemy*. Mineola: Dover Publications, 1990.

Holton, Gerald, and Stephen G. Brush. *Physics, the Human Adventure: From Copernicus to Einstein and Beyond*. Rutgers University Press, 2001.

Iltis, Carolyn. "Bernoulli's Springs and their Repercussions in the Vis Viva Controversy." *Actes du XIIIe Congre2s International d'Histoire des Sciences*. Moscow, 1974. 309–315.

–. "D'Alembert and the Vis Viva Controversy." *Studies in History and Philosophy of Science* 1 (1970): 135–144.

–. "Leibniz and the Vis Viva Controversy." *Isis* 62 (1971): 21–35.

–. "The Controversy Over Living Force: Leibniz to D'Alembert (Doctoral Dissertation)." <http://nature.berkeley.edu/departments/espm/env-hist/dissertation.html> (accessed 2016).

Isler, Martin. *Sticks, Stones, & Shadows: Building the Egyptian Pyramids*. Oklahoma: University of Oklahoma Press, 2001.

Janiak, Andrew. "Newton's Philosophy." *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Summer 2014 Edition). Edited by Edward N. Zalta. <http://plato.stanford.edu/archives/sum2014/entries/newton-philosophy> (accessed 2016).

Jones, Sheilla. *The Quantum Ten: A Story of Passion, Tragedy, Ambition, and Science*. New York: Oxford University Press, 2008.

Klein, Martin J. "Einstein's First Paper on Quanta." *The Natural Philosopher* 2 (1963): 59–86.

–. "Planck, Entropy, and Quanta, 1901–1906." *The Natural Philosopher* 1 (1963): 83–108.

–. "Thermodynamics in Einstein's Thought." *Science* 157 (1967): 509–516.

Kleppner, Daniel. "Rereading Einstein on Radiation." *Physics Today*, 2005: 30–33.

Kuhn, Thomas S. *Black-Body Theory and the Quantum Discontinuity, 1894–1912*. Chicago: University of Chicago Press, 1987.

–. *The Structure of Scientific Revolutions*. 4th ed. Chicago: University of Chicago Press, 2012.

Laidler, Keith J. *The World of Physical Chemistry*. Oxford: Oxford University Press, 1995.

Lau, Katherine I., and Kim Plofker. "The Cycloid Pendulum Clock of Christiaan Huygens." In *Hands on History: A Resource for Teaching Mathematics*, edited by Amy Shell-Gellasch, 145–152. Washington, DC: Mathematical Association of America, 2007.

Leibniz, Gottfried W. *Leibniz: Philosophical Essays (Hackett Classics)*. Translated by Roger Ariew and Daniel Garber. Indianapolis: Hackett Publishing Company, 1989.

Linden, Stanton J. *The Alchemy Reader: From Hermes Trismegistus to Isaac Newton*. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.

Lindsay, Robert B. "The Concept of Energy and Its Early Historical Development." *Foundations of Physics* 1 (1971): 383–393.

Loschmidt, Johann. "On the Size of the Air Molecules." Edited by William W. Porterfield and Walter Kruse. *Journal of Chemical Education*, 1995: 870–875.

Müller, Ingo. *A History of Thermodynamics: The Doctrine of Energy and Entropy*. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2007.

MacDougal, Douglas W. *Newton's Gravity: An Introductory Guide to the Mechanics of the Universe*. New York: Springer, 2012.

Mach, Ernst. *History and Root of the Principle of the Conservation of Energy*. Translated by Philip E. B. Jourdain. Chicago: Open Court Publishing Company, 1911.

Machamer, Peter. "Galileo Galilei." *The Stanford Encyclopedia of Philosophy (Winter 2014 Edition)*. Edited by Edward N. Zalta. <http://plato.stanford.edu/archives/win2014/entries/galileo> (accessed 2016).

Mahoney, Michael S. "Christiaan Huygens, The Measurement of Time and Longitude at Sea." In *Studies on Christiaan Huygens*, edited by H. J. M. Bos, J. S. Rudwick, H. A. M. Melders, and R. P. W. Visser, 234–270. Lisse: Swets & Zeitlinger, 1980.

Maxwell, James C. "Molecules." *Nature* VIII (1873): 437–441.

–. "The Theory of Molecules." *Popular Science Monthly* 4 (1874): 276–290.

McDonough, Jeffrey K. "Leibniz's Philosophy of Physics." *The Stanford Encyclopedia of Philosophy (Spring 2014 Edition)*. Edited by Edward N. Zalta. <http://plato.stanford.edu/archives/spr2014/entries/leibniz-physics> (accessed 2016).

Mehra, Jagdish, and Helmut Rechenberg. *The Historical Development of Quantum Theory, Vol. 4: Part 1: The Fundamental Equations of Quantum Mechanics 1925–1926; Part 2: The Reception of the New Quantum Mechanics 1925–1926*. New York: Springer-Verlag, 2001.

–. *The Historical Development of Quantum Theory, Vol. 5: Erwin Schrödinger and the Rise of Wave Mechanics. Part 2: The Creation of Wave Mechanics: Early Response and Applications 1925–1926*. New York: Springer-Verlag, 2001.

Meldrum, Andrew N. *Avogadro and Dalton: The Standing in Chemistry of Their Hypotheses*. University of Aberdeen, 1904.

Meyer, Joseph. "Roman Siege Machinery and the Siege of Masada." *2012 AHS Capstone Projects, Paper 14*, 2012.

Moore, Walter J. *Schrödinger: Life and Thought*. New York: Cambridge University Press, 1992.

Moran, Bruce T. *Distilling Knowledge: Alchemy, Chemistry, and the Scientific Revolution*. Cambridge: Harvard University Press, 2005.

Muir, Matthew Moncrieff Pattison. *A History of Chemical Theories and Laws*. New York: Wiley, 1907.

Myers, Richard L. *The Basics of Chemistry*. Westport: Greenwood Press, 2003.

Newburgh, Ronald, Joseph Peidle, and Wolfgang Rueckner. "Einstein, Perrin, and the Reality of Atoms: 1905 Revisited." *American Association of Physics Teachers* 74 (2006): 478–481.

Newman, William R. *Atoms and Alchemy: Chymistry and the Experimental Origins of the Scientific Revolution*. Chicago: University of Chicago Press, 2006.

Newman, William R., and Lawrence M. Principe. *Alchemy Tried in the Fire: Starkey, Boyle, and the Fate of Helmontian Chymistry*. Chicago: University of Chicago Press, 2002.

–. "Alchemy vs. Chemistry: The Etymological Origins of a Historiographic Mistake." *Early Science and Medicine* 3 (1998): 32–65.

Newton, Isaac. *The Principia*. Translated by Andrew Motte. New York: Prometheus Books, 1995.

O'Connor, John J., and Edmund F. Robertson. "Louis Victor Pierre Raymond duc de Broglie." *The MacTutor History of Mathematics Archive*. <http://www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/Biographies/Broglie.html> (accessed 2016).

O'Keefe, Tim. "Epicurus." *The Internet Encyclopedia of Philosophy*. <http://www.iep.utm.edu/epicur/> (accessed 2016).

O'Raifeartaigh, Lochlainn. *The Dawning of Gauge Theory*. Princeton: Princeton University Press, 1997.

Pais, Abraham. *The Genius of Science: A Portrait Gallery of Twentieth-Century Physicists*. New York: Oxford University Press, 2000.

–. *Inward Bound: Of Matter and Forces in the Physical World*. New York: Oxford University Press, 1988.

–. *Niels Bohr's Times: In Physics, Philosophy, and Polity*. New York: Oxford University Press, 1993.

–. *Subtle Is the Lord: The Science and the Life of Albert Einstein*. New York: Oxford University Press, 1982.

Patzia, Michael. "Anaxagoras." *The Internet Encyclopedia of Philosophy*. <http://www.iep.utm.edu/anaxagor/> (accessed 2016).

Principe, Lawrence M. "Reflections on Newton's Alchemy in Light of the New Historiography of Alchemy." In *Newton and Newtonianism: New Studies*, edited by James E. Force and Sarah Hutton, 205–19. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2004.

Purrington, Robert D. *Physics in the Nineteenth Century*. New Brunswick: Rutgers University Press, 1997.

Robinson, Andrew. *Einstein: A Hundred Years of Relativity*. New York: Harry N. Abrams, Inc, 2005.

Ross, Sydney. "John Dalton." *Encyclopædia Britannica Online*. <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/150287/John-Dalton/217770/Atomic-theory> (accessed 2016).

Rubenstein, Richard E. *Aristotle's Children: How Christians, Muslims, and Jews Rediscovered Ancient Wisdom and Illuminated the Middle Ages*. Orlando: Harcourt, 2004.

Russell, Bertrand. *The History of Western Philosophy*. New York: Simon and Schuster, 1945.

Ryckman, Thomas. *The Reign of Relativity: Philosophy in Physics 1915–1925*. New York: Oxford University Press, 2005.

Scerri, Eric R. *The Periodic Table: Its Story and Its Significance*. New York: Oxford University Press, 2007.

Schmaltz, Tad M. *Descartes on Causation*. New York: Oxford University Press, 2013.

Schrödinger, Erwin. *Collected Papers on Wave Mechanics*. Translated by J. F. Shearer and W. M. Deans. Providence: AMS Chelsea Publishing, 1982.

–. "On Einstein's Gas Theory (English Translation by T. C. Dorlas)." *Teunis (Tony) C. Dorlas Homepage*. http://homepages.dias.ie/dorlas/Papers/schrodinger_gas.pdf (accessed 2016).

Shapin, Steven. *The Scientific Revolution*. Chicago: University of Chicago Press, 1998.

Slowik, Edward. "Descartes' Physics." *The Stanford Encyclopedia of Philosophy (Summer 2014 Edition)*. Edited by Edward N. Zalta. <http://plato.stanford.edu/archives/sum2014/entries/descartes-physics/> (accessed 2016).

Smith, George E. "The Vis Viva Dispute: A Controversy at the Dawn of Dynamics." *Physics Today* 59 (2006): 31–36.

Sorell, Tom. *Descartes: A Very Short Introduction*. Oxford: Oxford University Press, 2000.

Stokes, Philip. *Philosophy: 100 Essential Thinkers*. New York: Enchanted Lion Books, 2005.

Straub, William O. "On the Failure of Weyl's 1918 Theory." *viXra.org e-print archive*. <http://vixra.org/abs/1401.0168> (accessed 2016).

Terrall, Mary. "Vis Viva Revisited." *History of Science* 42 (2004): 189–209.

Uffink, Jos. "Boltzmann's Work in Statistical Physics." *The Stanford Encyclopedia of Philosophy (Fall 2014 Edition)*. Edited by Edward N. Zalta. <http://plato.stanford.edu/archives/fall2014/entries/statphys-Boltzmann/> (accessed 2016).

van der Waerden, Bartel L. *Sources of Quantum Mechanics*. Mineola: Dover Publications, 2007.

van Melsen, Andrew G. *From Atomos to Atom: The History of the Concept Atom*. Mineola: Dover Publications, 2004.

Westfall, Richard S. *Never at Rest: A Biography of Isaac Newton*. New York: Cambridge University Press, 1983.

Weyl, Hermann. *Mind and Nature: Selected Writings on Philosophy, Mathematics, and Physics*. Edited by Peter Pesic. Princeton: Princeton University Press, 2009.

БЕСТСЕЛЛЕР AMAZON

Скотт Бембенек

МЕХАНИЗМ ВСЕЛЕННОЙ

Как законы науки управляют миром
и как мы об этом узнали

Примечания

1

С другой стороны, падение с той же высоты не требует с вашей стороны вообще никакой работы. Эту работу выполняет Земля. Поэтому спускаться вниз по лестнице гораздо легче, чем подниматься.

[Вернуться](#)

2

Скептицизм Галилео относительно учения Аристотеля в физике был предопределен. Так как Аристотель в основном изучал логику, психологию, политологию и различные проблемы биологии (особенно классификацию растений и животных), мало какие из его работ в области физики оказались непреходящими ценностями, за исключением самого слова «физика», которое происходит от греческого *phusika*, что означает «природа».

[Вернуться](#)

3

Евклид – древнегреческий математик, расцвет его научной деятельности пришелся примерно на 300 год до н. э.

[Вернуться](#)

4

Вероятнее всего, Галилео пользовался итальянским переводом «Начал» Евклида, сделанным Никколо Тартальей (1499/1500–1557). Отличительная черта этого текста – правильное и полное описание теории отношений Евдокса Книдского (греческий математик, астроном и философ, 390–340 до н. э.), в отличие от других двух латинских

текстов, существовавших во время Галилео. Теория пропорции Евдокса позволила Галилео развить новую науку о движении.

[Вернуться](#)

5

В данном случае размер каждого колебания становится меньше из-за трения о воздух и внутреннего трения, например между веревкой и точкой опоры. Идеальный маятник не потерял бы энергию из-за трения, и каждое колебание не отличалось бы от предыдущего.

[Вернуться](#)

6

Более вероятно, что Галилео заметил этот тип движения, помогая отцу в его экспериментах с использованием натяжения музыкальных струн в 1588–1589 годах. Позже он вспомнил, что раньше видел такие же движения – покачивания люстры собора, хотя и не задумывался о физических принципах качания. Именно это говорит его персонаж Сагрето в «Диалоге о двух системах мира»:

«Тысячу раз я обращал внимание на колебания, в особенности на колебания ламп в некоторых церквях, висящих на длинных шнурах, случайно приведенных кем-то в движение. Большая часть моих наблюдений приводила меня к мысли о неправдоподобии мнения многих, считающих, что движения этого типа поддерживает среда, то есть воздух. Мне казалось, что воздух должен отличаться совершенной рассудительностью, и ему должно быть нечем заняться, чтобы проводить часы, с определенной периодичностью толкая объект туда-сюда».

Рассматриваемые эксперименты включали бы следующее: груз подвешивают на струне, ее щиплют и отмечают издаваемые ей звуки. Очевидно, незначительные покачивания груза были бы следствием таких экспериментов.

[Вернуться](#)

7

Этот эксперимент достаточно просто провести дома. Если у вас не получится повторить результаты Галилео, наиболее вероятная ваша ошибка может быть в том, что вы перемещаете маятник слишком часто или слишком сильно, вы даете ему небольшой толчок, прежде чем снова позволите ему двигаться. Веревка не достаточно натянута во время колебания или слишком толстая, что вызывает внутреннее трение.

[Вернуться](#)

8

Не путайте массу и вес. Вес – просто мера силы тяжести, действующей на массу объекта. Таким образом, в то время как вес может измениться, масса объекта не изменится при обычных обстоятельствах. Например, ваш вес на Луне будет меньше, чем на Земле, так как сила тяготения на Земле, воздействующая на вашу массу, больше, чем на Луне. Однако ваша масса и на Луне, и на Земле одинакова.

[Вернуться](#)

9

Это следует из математики решения уравнения движения маятника. А именно связано с приближенным значением, которое можно получить, когда амплитуда – которую измеряют как угол отклонения по вертикали – мала. Приближение заключается в том, что синус угла считают как сам угол (когда измеряют его в радианах). Математически мы пишем: $\sin \theta \sim \theta$, где θ – угол. Это приближение значительно упрощает решение проблемы.

[Вернуться](#)

10

До середины 1609 года Галилео уделял науке о движении особое внимание. Затем Галилео узнал о подзорной трубе (предшественнике телескопа), созданной голландским изобретателем в 1608 году, и построил свою собственную, улучшенную версию. Проблема движения вновь привлекла его внимание в 1633 году, когда он начал работать над «Диалогами о двух системах мира». В них он излагает результаты своих исследований сопротивления материалов и движения объектов. Галилео рассматривал «Диалоги» как лучшую из всех своих работ, наследие почти тридцати лет его исследований.

[Вернуться](#)

11

Первую известную конкурирующую теорию сформулировал математик и астроном Гиппарх (ок. 190–120 до н. э.) спустя примерно два века после Аристотеля. В 1553 году Джамбаттиста Бенедетти (1530–1590) стал первым, кто предложил доказательство того, что объекты, сделанные из одинакового материала и отличающиеся весом, будут падать с одинаковой скоростью в одинаковой среде (например, в воздухе).

[Вернуться](#)

12

В 1586 году Симон Стевин (1548–1620) показал, что два тела различного веса падают с одинаковой скоростью.

[Вернуться](#)

13

Период маятника – время, которое требуется маятнику, чтобы совершить колебание и вернуться к исходному положению (например, слева направо и справа налево). Когда мы говорим о времени падения маятника, мы имеем в виду время, которое требуется для того, чтобы переместиться в самую низкую точку колебания. Это позволяет нам

проводить сравнения со временем свободно падающих объектов или объектов,двигающихся по наклонной плоскости.

[Вернуться](#)

14

Мы рассматриваем случай, когда амплитуда была мала, но это верно для всех амплитуд.

[Вернуться](#)

15

Поскольку объект катится по наклонной плоскости, его полное движение может быть разделено на вращательное движение центра масс и поступательное перемещение центра масс. Даже при том, что мы говорим об объекте, катящемся по наклонной плоскости, я скорее не рассматриваю вращательную часть движения, а сосредотачиваюсь только на изменении высоты объекта от начала движения и до конца, что является аспектом его поступательного перемещения.

[Вернуться](#)

16

Покойный Стиллмен Дрейк, канадский историк науки и эксперт по Галилео, предположил, что Галилео первоначально использовал другое средство для измерения времени движения объектов по наклонной плоскости. И отец, и брат Галилео были музыкантами, и Галилео также хорошо играл на лютне; возможно, Галилео использовал свои музыкальные способности. Он разместил тянущиеся ленты – или, в его случае, «струны» из кишок – вокруг наклонной плоскости, благодаря чему всякий раз, когда катящийся вниз объект касался их, возникал звук. Струны были расположены на одинаковом расстоянии друг от друга таким образом, что Галилео слушал, как катящийся объект касается их. Чтобы расположить струны таким образом, он использовал, вероятно, врожденное чувство ритма (может, топал

ногой, когда слышал звук струны, или напевал ритм) и корректировал их позиции так, чтобы каждый лад соответствовал фиксированному временному интервалу. Теперь оставалось измерить расстояние от исходного положения шара до каждой струны, что Галилео мог определить очень точно. Учитывая, что тогда часы не могли измерить период времени точнее, чем секунда, этот метод, скорее всего, был более точным.

[Вернуться](#)

17

В обоих случаях общая форма математического уравнения, связывающего время и высоту, одинакова: $h = 1/2 at^2$, где h – высота, на которую опустился (или скатился) объект от его изначальной точки, a – ускорение и t – время. Другими словами, высота здесь представлена как время, возведенное в квадрат. Это – закон падения Галилео, который он вывел, основываясь на своих экспериментах с наклонной плоскостью. В свободном падении ускорение происходит за счет силы тяжести, которая равна $9,8 \text{ м/с}^2$, $h = 4,9 \text{ м/с}^2 \times t^2$. Однако, если мы рассматриваем наклонную плоскость, ускорение происходит медленнее, чем при свободном падении. Кроме того, при движении по наклонной плоскости ускорение зависит от угла наклона плоскости по отношению к горизонтальной поверхности; для свободного падения угол наклона составляет 90° .

[Вернуться](#)

18

Поэтому нам нужны оба эти направления, чтобы полностью описать движение катящегося (падающего) объекта.

[Вернуться](#)

19

Интересно отметить, что в работе «В движении», которая отражает научную деятельность Галилео во время его профессорства в Пизе (1589–1592), Галилео думал, что скорость движения объекта на наклонной плоскости обратно пропорциональна длине наклона. Тот факт, что он не мог правильно рассчитать движение на наклонной плоскости (так как он не признал важности ускорения из-за силы тяжести), вероятно, был причиной, по которой Галилео никогда не издавал это труд. Однако к тому времени, когда он написал «Диалоги о двух главнейших системах мира», Галилео уже пришел к верным выводам: для постоянного ускорения скорость v падающего объекта пропорциональна времени t . Другими словами, $v \sim t$. Поэтому скорость падающего объекта увеличивается, когда высота уменьшается.

[Вернуться](#)

20

Подтолкнув его, мы изменим описанные результаты, так как добавим энергии в систему.

[Вернуться](#)

21

Трение – сопротивление, которое возникает между двумя объектами, находящимися в контакте друг с другом, и мешает их относительному движению. Например, когда вы быстро едете на своем автомобиле и резко поворачиваете за угол, вы не улетаете с дороги благодаря трению между дорогой и шинами вашего автомобиля. Однако если это все же произошло, то из-за недостаточной силы трения, которая не удержала автомобиль на дороге; в следующий раз поезжайте помедленнее.

[Вернуться](#)

22

Безусловно, под «философом» Галилео имел в виду физика.

[Вернуться](#)

23

Книгу Коперника издали непосредственно перед его смертью.

[Вернуться](#)

24

Другой пример – пружина, обладающая потенциальной энергией, когда она сжата и пытается «разжать» саму себя.

[Вернуться](#)

25

Сохранение энергии – фундаментальный и часто необходимый инструмент в решении многих физических проблем.

[Вернуться](#)

26

Интересно отметить, что вывод Ньютоном сохранения импульса из его третьего закона приводит к сильному принципу сохранения (согласно которому закон сохранения импульса никогда не нарушается), который выводится и из слабого (согласно которому, оказывается, силы не всегда «равны по модулю и противоположны по направлению»).

[Вернуться](#)

27

Сюда входили разрозненные наблюдения за маятником, приливами, а также формула для скорости звука в воздухе.

[Вернуться](#)

28

Иногда это называют «абсолютной упругостью».

[Вернуться](#)

29

Сегодня это может показаться странным – описывать тепло как тип частицы, но свет – другую невесомую текучую среду – также рассматривали как частицу, в особенности сам Ньютон.

[Вернуться](#)

30

Как генерал-майор и командующий полицией при дворе Герцога Баварии Румфорд был ответственен за защиту Мюнхена.

[Вернуться](#)

31

Основываясь на этом исследовании, Джоуль смог установить, что произведенное количество тепла было пропорционально количеству тока, умноженному на квадрат сопротивления. Это называют джоулевым нагревом.

[Вернуться](#)

32

Давайте проясним. Ранее мы узнали, что работу совершают, применяя силу, чтобы, например, сдвинуть объект на некоторое расстояние. В таком случае гравитация – сила,двигающая объект таким образом, чтобы он упал на землю.

[Вернуться](#)

33

Работу рассчитывают как расстояние, на которое падает тело под воздействием силы тяжести, тогда как тепло связано с изменением температуры определенного объема воды.

[Вернуться](#)

34

Во время своего медового месяца Джоуль предположительно попытался измерить увеличение температуры воды внизу водопада. Действительно, поскольку вода в основании из-за падения потеряла (гравитационную) потенциальную энергию, за счет сохранения энергии вода оказывается теплее.

[Вернуться](#)

35

Будьте благодарны, что природа установила такую высокую цену за механический эквивалент тепла. Если бы она была «слишком низкой», мы бы производили гигантское количество тепла во время таких повседневных действий, как ходьба, где тепло выделялось бы, например, во время трения между вами и поверхностью земли.

[Вернуться](#)

36

В дополнение к этому пункту Эйнштейн научил нас, что $E = mc^2$, то есть объект обладает энергией просто потому, что у него есть масса, m . Это уравнение часто понимают неправильно. Целиком мы пишем $E = mc^2 = m_0c^2 + E_k$, где m_0 – «масса покоя», c – скорость света, а E_k – кинетическая энергия.

[Вернуться](#)

37

Даже сегодня все формы тепловых двигателей теряют значительную часть тепла.

[Вернуться](#)

38

У проверяющих из патентной комиссии есть научные степени в области техники, а у некоторых – даже степень кандидата наук.

[Вернуться](#)

39

Конечно, не все тепловые двигатели работают таким образом. Очень простой пример теплового двигателя – «пьющая птичка». Когда птица опускает свой клюв в стакан воды перед ней, она захватывает воду клювом и возвращается в вертикальное положение. С этого момента вода начинает испаряться с кончика ее клюва, охлаждая его – этот процесс известен как *испаряющее охлаждение*. В результате возникает разница температур: верхняя половина птицы становится более холодной (холодильник), чем нижняя (нагреватель). Из-за разницы температур жидкость внутри птицы поднимается вверх, пока птица снова не наклонится к стакану воды, чтобы вновь сделать «глоток», и процесс начинается заново. Кроме того, перепад температур также приводит к перепаду давления (пусть и незначительному) внутри птицы.

Жидкость (рабочее тело) в данном процессе играет важную роль. Она очень летучая, то есть при комнатной температуре значительная часть ее молекул находится в агрегатном состоянии пара, а некоторая часть – в жидком. В целом это относится ко всем жидкостям: некоторые их молекулы находятся в жидком состоянии, а другие – в газообразном, что приводит к росту *давления пара* жидкости. Однако у летучих жидкостей, в отличие от менее летучих, при равных температурах больше молекул находится в агрегатном состоянии пара.

Это отражение притяжения молекул жидкости; чем оно сильнее, тем больше молекул остается в жидком состоянии и меньше – в состоянии пара, и наоборот. Это ключевой момент, потому что более летучая жидкость будет реагировать на разницу давлений гораздо сильнее, чем менее летучая, как и летучая жидкость внутри пьющей птицы, где больше молекул переходит из жидкого состояния в парообразное. Именно эти испарения, наряду с небольшим *капиллярным эффектом*, заставляют жидкость подниматься.

[Вернуться](#)

40

За исключением систем и процессов, находящихся в равновесии, большинство систем и процессов, которые встречаются в природе, являются необратимыми. Такие системы равновесия включают в себя те, что подвергаются фазовому переходу. Например, когда вода приближается к точке заморозки/таяния или когда она кипит/конденсируется, система находится в равновесии и поэтому является обратимой. Другие примеры – химические реакции, находящиеся в состоянии равновесия. Это означает, что протекающие прямо и обратные реакции происходят одновременно. Однако это не означает, что они происходят на одинаковом уровне; на самом деле, обычно нет. Это последнее соображение относится к химической *кинетики* реакции, а не ее *термодинамике*.

[Вернуться](#)

41

Попробуйте представить себе стакан, который упал с лавки и разбился на множество осколков. Весьма наивно полагать, что, тщательно склеив все части, мы сможем вернуть стакан в прежнее состояние. Конечно же, у нас ничего не получится; в лучшем случае мы просто немного приблизимся к тому, что было раньше.

[Вернуться](#)

42

Энергия для выполнения работы возникает из потенциальной энергии за счет разности высот.

[Вернуться](#)

43

Некоторая потеря потенциальной энергии с эффективностью работы происходит из-за нагревания, возникающего, когда вода ударяется о водяное колесо.

[Вернуться](#)

44

Другой пример – кондиционер.

[Вернуться](#)

45

Возможно, эту задачу можно было бы разрешить так. Двигатель 1 может выполнять только работу, необходимую для работы двигателя 2 в качестве теплового насоса, и ничего более. В итоге тепло поступает из нагревателя и затем возвращается в него. На самом деле мы можем просто исключить из схемы холодильник. Что может пойти не так? Ну, теперь у нас есть схема, где на одной и той же температуре T_n тепло перемещается между тепловым двигателем и тепловым насосом. Другими словами, мы создали механизм, в котором система, находясь в *тепловом равновесии*, все еще может передавать тепловой поток. Однако, как мы знаем, тепло не может перемещаться без перепада температур, и если система пребывает в тепловом равновесии, то тепло и вовсе не может перемещаться. Кроме того, такое устройство нарушило бы *второе начало* (позже мы разберем это подробнее); это

был бы вечный двигатель второго рода. Таким образом, мы вынуждены отказаться от данного варианта.

[Вернуться](#)

46

Эту формулу легко выводят на примере такой системы: идеальный газ выступает в качестве рабочего тела и затем проходит процесс с четырьмя циклами: 1) изотермическое расширение (при постоянной температуре) при температуре нагревателя; 2) адиабатное (без потери или поглощения тепла) расширение, приводящее к охлаждению до температуры холодильника; 3) изотермическое сжатие при температуре холодильника; и 4) адиабатное сжатие, которое приводит к нагреванию газа обратно до температуры нагревателя, таким образом возвращая газ к его исходному состоянию, когда он готов снова начать цикл. Помните, что конструкция обратимого теплового двигателя Карно может быть разной, поэтому использование идеального газа в качестве рабочего тела необходимо для математического удобства и не влияет на итоговую формулу.

[Вернуться](#)

47

Эффективность определяется как величина работы, разделенная на количество вводимой теплоты от горячего нагревателя (источника).

[Вернуться](#)

48

Тот факт, что первое начало требует сохранения энергии, и невозможность работы ни одного теплового двигателя со 100 %-ной эффективностью связаны с тем, что при работе теплового двигателя требуется передача тепла из холодного резервуара в горячий.

[Вернуться](#)

49

Обратите внимание, что если $T_x = T_H$, то производительность равна нулю. Это означает, что тепловой двигатель не работает без разницы температур, о чем и говорит *второе начало*, сформулированное Томсоном.

[Вернуться](#)

50

Подумайте об этом, когда в следующий раз будете сидеть за рулем автомобиля: он работает гораздо лучше, если снаружи холодно.

[Вернуться](#)

51

Хотя не до конца ясно, почему мемуары Карно не оказали большего влияния на свою целевую аудиторию – физиков и инженеров; вероятно, так случилось из-за стиля, в котором они были написаны. Карно написал свои мемуары в популяризированном стиле, редко используя математические уравнения, скромно вставляя их в сноски. Однако для инженеров работа была все еще слишком теоретической; с другой стороны, ученые, которые были привычны к теоретическому подходу, не восприняли работу всерьез, поскольку ей не хватало математических данных. В результате Карно потерял аудиторию в лице и тех, и других. Карно не сделал ничего, чтобы помочь продажам «Размышлений». Он посвятил все свое время научным исследованиям и никогда не издавался вновь.

[Вернуться](#)

52

Очевидно, Томсон безуспешно искал в парижских книжных магазинах копию оригинальной работы Карно.

[Вернуться](#)

53

Объединение по каким-либо признакам тех или иных природных явлений всегда было важнейшей темой в науке. Физика долгое время пыталась объединить четыре фундаментальных вида взаимодействия силы: электромагнетизм, сильное ядерное взаимодействие, слабое ядерное взаимодействие, а также силу гравитации. Объединение электрических и магнитных сил привело к появлению понятия электромагнетизма, а последующее объединение электромагнетизма со слабым взаимодействием – к электрослабому воздействию.

[Вернуться](#)

54

Теория, подобная теории Фурье, в которой учитывается поведение рассматриваемого объекта (тепла), но при этом остаются вопросы о причинах этого поведения, известна как феноменологическая теория.

[Вернуться](#)

55

Мы уже знакомы с этим подходом – мы встречали его, когда исследовали обратимый тепловой двигатель Карно. Помните, что Карно устранил основные детали из своей модели теплового двигателя, такие как рабочее тело, механическую конструкцию и материалы, используемые в строительстве. Подход такого типа часто используется в физике.

[Вернуться](#)

56

Использование Томсоном слова «энергия» было первым шагом к пониманию его значения в сегодняшнем смысле. Это было важным

событием, потому что у понятия энергии была долгая история, в которой ее часто использовали крайне двусмысленно (и неправильно), часто наравне со словом «сила».

[Вернуться](#)

57

Большую часть работы Клазиус написал до 1870 года, в котором произошли два, вероятно, главных события в его жизни. В 1870 году, во время Франко-прусской войны, когда он служил в корпусе медиков, его сильно ранили в колено, и всю жизнь он страдал от боли из-за этой травмы. Кроме того, его жена трагически умерла при родах, и он принял на себя ответственность за воспитание шести маленьких детей. Позже, когда ему уже было около шестидесяти, он женился снова.

[Вернуться](#)

58

Как мы узнали из первой части, природа материи затрудняла понимание энергии, в частности тепла. Когда Томсон написал «Динамическую теорию тепла» в 1850 году, многие исследователи, такие как Джоуль, Майер, Гельмгольц и Клаузиус, начинали принимать тот факт, что материя состоит из меньших частиц (которые мы сегодня называем атомами), но никто из них не был готов свести это воедино, подкрепив теоретическими формулировками.

[Вернуться](#)

59

Для полноты картины предположите, что воздух не может покинуть здание или войти в него; как видите, я хорошо все продумал.

[Вернуться](#)

60

Здесь мы говорили о работе с точки зрения теплового двигателя, который преобразовывает тепло в работу. Обратите внимание, что здесь мы все еще применяем наше оригинальное определение работы. В тепловом двигателе рабочее тело поглощает тепло, которое заставляет его расширяться. В результате этого рабочее тело воздействует на объект, таким образом заставляя его отодвинуться на определенное расстояние; рабочее тело действует на объект с силой, чтобы переместить его.

[Вернуться](#)

61

Важно понять, что мы не должны знать точный принцип, по которому происходит нагревание или работа, чтобы определить энергетическое изменение системы. Мы просто должны определить количество тепла или работы, которые приобретает или теряет система. Детали того, что продолжает происходить в границах системы не важны, пока мы не определим это количество.

[Вернуться](#)

62

Если бы вы, например, должны были размешать воду, для этого вы бы производили работу. Процесс помешивания изменит энергию, добавляя в воду кинетическую энергию.

[Вернуться](#)

63

Внутренняя энергия (как считается сегодня) относится к кинетической и потенциальной энергии молекул, составляющих интересующую нас систему. Среднее значение их количеств и есть то, что мы называем внутренней энергией системы. Чтобы лучше понять, почему мы берем именно среднее значение, давайте еще раз рассмотрим наш стакан воды как систему. Стакан воды состоит из

множества отдельных молекул воды, которые движутся при комнатной температуре. Мы не увидим этого невооруженным глазом, но можем проверить при помощи эксперимента. Поскольку молекулы перемещаются в стакане воды, их потенциальная энергия и кинетическая энергия изменятся, а общая энергия – нет, если система, как упоминалось, является закрытой. Но так как потенциальная и кинетическая энергии молекул со временем постоянно изменяются за счет их движения, то для определения внутренней энергии важно именно среднее значение (за некоторое время).

[Вернуться](#)

64

Во вступлении к работе Томсон делит энергию на два вида, один из которых он называет «статическим», а другой – «динамическим». Согласно Томсону, статическая энергия лучше подходит для производства работы, в то время как динамическая энергия подходит для этого хуже, что, впрочем, не мешает производить работу и с ее помощью.

[Вернуться](#)

65

Можно произвести работу благодаря океану, например, катаясь на доске для серфинга.

[Вернуться](#)

66

Другой пример – энергия, заключенная в молекулах, из которых состоит воздух. Существует множество других подобных видов энергии, но случайное движение молекул веществ исключает возможность использовать эту энергию для производства работы.

[Вернуться](#)

67

Только лишь добавление энергии в форме работы не сможет повернуть вспять необратимые процессы; в этом случае они действительно необратимы.

[Вернуться](#)

68

Другими словами, объекты скорее будут охлаждаться, чем нагреваться. Тепло будет покидать вашу чашку кофе, растворяясь в окружающей среде. Обратные процессы не являются естественными (тепло не будет переходить из окружающей среды в ваш кофе, тем самым нагревая его).

[Вернуться](#)

69

Вспомните объяснение из части 1, что физические свойства системы описывают ее уникальные особенности.

[Вернуться](#)

70

В 1851 году Томсон, скорее всего, знал о подобных свойствах тепла. Он сосредоточился на исследовании процесса проводимости, что послужило основой для работы, описывающей рассеивающуюся природу тепла (1852 год).

[Вернуться](#)

71

Клаузиус утверждал, что любой процесс в двигателе Карно будет взаимозаменяемым, как только мы сделаем его «обратимым».

Например, процесс, при котором тепло поступает из горячего резервуара в холодный (предпочтительное направление), можно заменить процессом преобразования тепла в работу (неблагоприятное направление), как только двигатель начинает превращать работу в тепло (предпочтительное направление). Может казаться странным, но Клаузиус пытался установить общую связь между «предпочтительным» и «неблагоприятным» течениями процессов. Это позволило ему вывести математическую теорию и даже обосновать, что у этих двух как будто бы разных процессов общее физическое происхождение.

[Вернуться](#)

72

Теперь мы понимаем, что механический (рабочий) эквивалент тепла – это количество тепла, которое получается при выполнении данного объема работы. Действительно, это легко вычислить, просто используя уравнение преобразования объема работы в соответствующее количество тепла. По Клаузиусу, значение эквивалентности для количества работы, которую некто получает из определенного количества тепла, можно представить как «тепловой эквивалент работы».

[Вернуться](#)

73

Не забывайте, что тепловой двигатель Карно – математическая модель, и что под «пробегом» я подразумеваю только лишь расчеты.

[Вернуться](#)

74

Установление физической величины, связанной с состоянием (или функции состояния), как имеющей результирующее изменение, равное нулю, за полный «проход» по циклу, является превосходным примером

использования математики для ясного определения важных физических величин.

[Вернуться](#)

75

Некоторые другие функции состояния – плотность, давление и температура.

[Вернуться](#)

76

В самом деле, было бы странно, если бы мы могли заполнять стакан наполовину, только наливая в него одинаковое количество воды, но не имея возможности вылить лишнюю. Тем не менее не все функции системы – функции состояния, что означает, что они действительно зависят от способа, которым система достигает своего состояния.

[Вернуться](#)

77

Уильям Томсон (позже лорд Кельвин) ввел абсолютную температурную шкалу, где добавляется 273,15 к значению температуры в градусах Цельсия. В этой шкале ноль определяется как абсолютно самая низкая достижимая температура.

[Вернуться](#)

78

Это важно, поэтому я надеюсь, что вы читаете эту сноску. Вы получите положительное значение, если будете рассматривать поглощенное окружающей средой тепло (как из горячего резервуара или источника) как отрицательную величину и тепло, которое выделяется, как положительную. В научной литературе по этому поводу нет никаких договоренностей. На самом деле сам Клаузиус

менял свой подход к рассмотрению этой проблемы: представил тот, что я использую, в 1854 году и применял его, чтобы написать свое знаменитое *неравенство Клаузиуса* в 1862 году, только чтобы переключиться на противоположный подход в трудах 1865 года – по крайней мере, он отметил это переключение в более поздних мемуарах.

[Вернуться](#)

79

Кроме того, будет действительно холодно. Температура – мера средней проводимости кинетической энергии, которой обладает единственная молекула в данной системе. Первое начало говорит нам, что сумма энергии во Вселенной постоянна, и поэтому если я распределю эту сумму по всем атомам и молекулам во Вселенной (по моей системе в этом случае), у отдельного атома или молекулы не будет большого количества кинетической энергии, так как существует великое множество атомов и молекул, которые составляют нашу Вселенную, так что среднее число будет довольно низким (почти нулем), как и температура.

[Вернуться](#)

80

В 1860-е годы наука о молекулах только зарождалась, и Клаузиус не хотел показаться спекулянтom и подвергнуть опасности свою теорию энтропии. Таким образом, Клаузиус оставил этот подход и отказался от молекулярной интерпретации энтропии.

[Вернуться](#)

81

На самом деле мы понимаем работы Клаузиуса благодаря объяснениям таких ученых, как Джеймс Клерк Максвелл и другие.

[Вернуться](#)

82

Клаузиус был непоследователен в убеждениях относительно поглощаемого (из горячего резервуара) и испускаемого (из холодного резервуара) тепла в процессе. В 1854 году Клаузиус считал поглощенное тепло отрицательным и излучаемое – положительным, но в 1865 году, создавая второе начало, изменил свою точку зрения на обратную. Эта путаница сегодня все еще встречается в учебниках и в заметках, посвященных энтропии. Так что вам нужно четко представлять авторские убеждения.

[Вернуться](#)

83

В целом *свободная энергия* – удобный способ описать энтропию Вселенной в терминах энтропии и внутренней энергии (кинетической и потенциальной) системы. Точная форма свободной энергии будет меняться в зависимости от того, какие макроскопические величины мы считаем постоянными, например температуру или давление.

[Вернуться](#)

84

Герон Александрийский (ок. 10–70 н. э.) утверждал, что сжимаемость воздуха – следствие того, что он состоит из крошечных частиц.

[Вернуться](#)

85

Полезные модели правильно описывают известную экспериментальную информацию и в качестве бонуса позволяют прогнозировать те или иные физические процессы; они обладают описательными и предсказательными качествами.

[Вернуться](#)

86

Температура около 21 °С (около 70 °F) и давление, равное одной атмосфере.

[Вернуться](#)

87

Я рассматриваю популярный размер воздушного шара диаметром 25 см.

[Вернуться](#)

88

Примеры атомов, перемещающихся быстрее при увеличении температуры, можно найти в шине вашего автомобиля. Когда вы ведете автомобиль, трение между его шинами и дорогой производит тепло, заставляя температуру воздуха в шине увеличиваться. Это увеличение вызывает ускорение движения молекул воздуха (воздух – смесь молекул – главным образом азота и кислорода, которые составляют приблизительно 99 % воздуха), за счет чего они чаще сталкиваются друг с другом и со стеной шины (сосуд, в который они заключены). Это увеличение количества столкновений приводит к увеличению давления воздуха в шине. Это достаточно легко установить: просто измерьте давление воздуха перед поездкой и после нее. Именно поэтому вы замечаете медленную утечку воздуха не сразу после поездки, а когда вы поедете в следующий раз, например, на работу утром после того, как машина стояла всю ночь.

[Вернуться](#)

89

Безусловно, Клаузиус не верил этому, но он действительно утверждал, что для вычисления – даже при том, что имеет место распределение скоростей атомов газа – можно было просто использовать среднюю скорость. Это привело Клаузиуса к не совсем точному расчету давления газа, на что позднее указал Максвелл при определении математической формы распределения скоростей.

[Вернуться](#)

90

Есть три уникальных направления, доступных атому газа, – x , y и z (по системе координат Декарта). Они описывают направления «вниз или вверх», «влево или вправо» и «вперед или назад».

[Вернуться](#)

91

Тем не менее это не означает, что она увеличивается до «абсолюта» при каждом воздействии, что каждый шаг по этому пути приводит к росту энтропии. Скорее это происходит только в статистическом смысле. Таким образом, некоторые действия ведут к увеличению, а другие – к уменьшению энтропии. Когда система из начального неравновесного состояния наконец придет в состояние равновесия, уровень энтропии в целом изменится. Второе начало гарантирует это.

[Вернуться](#)

92

В случае системы с постоянной (одинаковой) энергией все становится несколько проще. У системы все еще есть набор микросостояний, но все они будут одинаковыми с точки зрения энергии. Распределение Больцмана будет не по диапазону энергий, а по одному значению энергии. Таким образом, вероятность данного микросостояния будет одной из множества составляющих систему. Другими словами, вероятность возникновения всех микросостояний будет одинаковой.

[Вернуться](#)

93

Однако эти вещи можно увидеть с помощью компьютерного моделирования. Здесь мы можем видеть движение атомов, их

траектории и все возникающие микросостояния. Перемещая атомы в соответствии с уравнениями движения Ньютона и следуя постулатам статистической механики, мы можем вычислить многообразие свойств многих систем и качественно соотнести их с экспериментальными результатами.

[Вернуться](#)

94

Я потрачу время на объяснение того, что такое «микросостояние» и «макросостояние», чтобы не было путаницы. Многие авторы просто говорят «состояние», и вам приходится самостоятельно разбираться, о каком из них идет речь, а иногда термин и вовсе используют неправильно.

[Вернуться](#)

95

Точнее, макросостояние системы описывается *переменными* системы, которая не изменяется даже при том, что атомы системы перемещаются, – то есть у системы изменяются микросостояния. В моем примере температура и объем (форма) воздушного шара, как вы видите, являются переменными макросостояния воздушного шара. Однако количество атомов в воздушном шаре будет другой переменной макросостояния. Очевидно, даже при том, что вы не видите атомы, их число в воздушном шаре не изменяется, если нет утечек.

[Вернуться](#)

96

Количество молекул воздуха в воздушном шаре также является величиной, связанной с макросостоянием. Это может показаться странным, так как вы не видите молекулы. Тем не менее вы знаете, что

общее количество молекул в воздушном шаре не изменяется, конечно, при отсутствии утечек.

[Вернуться](#)

97

Это очень важно, так что если вы ничего не запомните о микросостояниях и макросостоянии, по крайней мере, запомните связь между микросостояниями с энтропией: чем больше микросостояний у системы, тем выше ее энтропия.

[Вернуться](#)

98

Во время визита Больцмана в Беркли распитие и покупка пива и вина, к неудовольствию Больцмана, были запрещены. Тем не менее Больцман скоро узнал о магазине в Окленде, Калифорния, где продавали вино, и, по-видимому, стал его частым гостем.

[Вернуться](#)

99

Постоянную Больцмана используют, чтобы преобразовать температуру (в Кельвинах) в единицы измерения энергии. Больцман никогда не вводил эту постоянную, а записывал это выражение в виде пропорции. Эта постоянная была введена позже Планком.

[Вернуться](#)

100

Не все необратимые процессы являются спонтанными, но все спонтанные процессы необратимы. Большинство процессов по своей природе необратимо. Единственные обратимые по своей природе процессы – те, которые проходят в системах, находящихся в состоянии равновесия.

[Вернуться](#)

101

Греческий эпический поэт, известный прежде всего поэмами «Илиада» и «Одиссея». Годы жизни Гомера все еще остаются предметом спора. Геродот считал, что Гомер жил за 400 лет до него, то есть примерно в 850 году до н. э. Однако другие историки тех времен датируют его жизнь приблизительно 1194–1184 годами до н. э., то есть тем временем, когда шла Троянская война – так ее датируют те, кто полагает, что это реальное историческое событие, а не просто часть мифа.

[Вернуться](#)

102

Греческий философ, известный прежде всего тем, что математическим методом вывел, что квадрат длин сторон прямоугольного треугольника равен квадрату самой длинной стороны (гипотенузы). Это равенство также известно как теорема Пифагора.

[Вернуться](#)

103

Греческий философ, поэт, социальный и религиозный критик.

[Вернуться](#)

104

Гераклит также считал, что для достижения гармонии необходимо соединить противоположности. Этот процесс часто напоминает борьбу или даже войну. Эта дуалистическая философия Гераклита напоминает инь и ян в китайской философии. Действительно, его работы, как и работы китайского классика Тао Те Чин, который обсуждал понятия инь и ян (предположительно введены Лао-цзы («Старым мастером»)),

были написаны приблизительно в одно и то же время. К сожалению, мы никогда не узнаем, была ли связь между этими работами.

[Вернуться](#)

105

Гераклит говорил: «Вы не можете дважды вступить в одну и ту же реку; вы всегда окажетесь в новой быстротекущей воде».

[Вернуться](#)

106

Часть молекул воды может уйти при испарении.

[Вернуться](#)

107

Гераклит полагал, что в человеческой душе также присутствует вечный огонь. Это напоминает индуизм, где у универсальной души, известной как Брахман, есть зеркальная копия во всех людях, известная как мировая душа (Атман).

[Вернуться](#)

108

На латинском языке это слово означает «сокращение до абсурда». Это крайне эффективный метод, который применяется в математике и философии. Подход действует следующим образом: сначала заявите начальное суждение, покажите, что установленное суждение приводит к противоречию, и таким образом начальное суждение считается неверным в результате противоречия.

[Вернуться](#)

109

На теорию идей Платона, также известную как теория форм, конечно, повлиял и Сократ.

[Вернуться](#)

110

Теория Анаксимена о воздухе как главном элементе и основе всякой материи довольно интересна. Объясняя физические механизмы, знакомые нам сегодня, например конденсацию (сжатие воздуха для повышения плотности) и разрежение (расширение воздуха для уменьшения его плотности), он также объяснял и то, как возникают другие «элементы». Проще говоря, он заявил, что, когда воздух сжимается, появляется вода, которая при дальнейшем сжатии становится землей. Однако, когда воздух становится более разреженным (менее плотным), он превращается в огонь. Таким образом, он описывает эти четыре элемента и рационализирует их преобразования.

[Вернуться](#)

111

В «Опровержении всех ересей» Ипполит рассматривает убеждения Анаксагора, касающиеся Земли, Солнца и Луны:

«Солнце, Луна и все звезды – раскаленные камни, охваченные круговращением эфира. Ниже звезд есть некие тела, которые вращаются вместе с Солнцем и Луной, невидимые для нас. Тепло звезд мы не ощущаем, так как они на большом расстоянии от Земли, и к тому же не так горячи, как Солнце, поскольку занимают область похолодней. Луна ниже Солнца и ближе к нам. Солнце по величине превосходит Пелопоннес. Свет у Луны не свой, но от Солнца. Круговращение звезд происходит под Землей. Затмения Луны бывают оттого, что ее заслоняет Земля, а иной раз и тела [которые обращаются] ниже Луны; затмения Солнца – когда его заслоняет Луна, по новолуниям. Повороты Солнца и Луны происходят оттого, что их отбрасывает назад воздух. Луна поворачивает часто, так как не может одолеть холодное начало [= воздух]. Он впервые точно определил

условия затмений и лунных фаз. Он сказал, что Луна землеобразна и что на ней есть равнины и ущелья. Млечный путь – отражение света звезд, не освещаемых Солнцем...»

[Вернуться](#)

112

Согласно Аристотелю, Анаксагор чувствовал, что Эмпедокл несправедливо определяет некоторые вещества как первичные, а другие – как вторичные. Более того, у Анаксагора, вероятно, была еще одна проблема с теорией Эмпедокла. Согласно Эмпедоклу, все в природе можно разделить на четыре основополагающих элемента. Таким образом, что-то, например апельсин, распадается на воздух, землю, огонь и воду. Буквально это означает, что то, что мы когда-то называли апельсином, сейчас исчезло, и все, что остается, – это те самые четыре элемента. Проблема в том, что, кажется, апельсин исчез; или, вернее, его больше не существует. Иными словами, «что-то» стало «ничем», что противоречило теории Парменида о невозможности такого сценария. Поэтому Анаксагор, возможно, пытался сохранить эту часть теории Парменида, когда объявил о существовании «части всего во всем». Однако для Эмпедокла объединение и разделение четырех элементов силами Любви и Борьбы соответственно было реальностью, в то время как «апельсин» был иллюзией или искусственным примером в человеческой интерпретации. Таким образом, ничто не исчезает из природы, так как четыре элемента, составляющие апельсин, остаются, даже когда сам он перестает существовать; его составляющие элементы просто переходят от состояния соединения к состоянию разделения в полном соответствии с теорией Эмпедокла.

[Вернуться](#)

113

Уцелевший фрагмент работы Анаксагора доказывает, что Анаксагор отличался беспрецедентным пониманием математического концепта бесконечности.

[Вернуться](#)

114

Демокрит полагал, что человеческая душа состоит из специальных атомов правильной круглой формы, что позволяет им проникать в наше тело для поддержания его функций.

[Вернуться](#)

115

Не совсем ясно, как Демокрит понял, что атомы изменяют направление движения, но, по-видимому, это вытекало из предполагаемого давления.

[Вернуться](#)

116

Теории Демокрита угрожал и Платон, но не в той же мере, что Аристотель.

[Вернуться](#)

117

Мы знаем большую часть атомной теории Демокрита благодаря критике Аристотеля, особенно в трудах «*О поколениях*» и «*Коррупция*», а также «*О небе*».

[Вернуться](#)

118

Это означало, что он управлял страной в отсутствие его отца (Филиппа II). Действительно, Александр подавил восстание в области Фракии и основал город Александрополь.

[Вернуться](#)

119

Как, по-видимому, разочарованно отметил Галилео, изучавший работы Аристотеля во время обучения в Пизанском университете.

[Вернуться](#)

120

Это также была попытка улучшить то, что он рассматривал как слабые места в «Теории идей» (форм) Платона.

[Вернуться](#)

121

Когда кто-то делает вывод на основе предполагаемой цели – это целенаправленное объяснение. Напротив, кто-то делает вывод, основываясь на возможных причинах, он осуществляет «механическое объяснение». Исторически выяснилось, что последний позволяет делать верные научные выводы. Аристотель использовал целенаправленные объяснения, тогда как Демокрит – механические.

[Вернуться](#)

122

Для Аристотеля Бог – чистая форма, существующая вне материи и действительности, и поэтому он не изменяется, так как он – совершенство. На самом деле все вещи стремятся уподобиться Богу – это их цель. Это означает, что Бог – целевая причина для всякого движения и изменения. Богословие Аристотеля таково, что материальные вещи «развиваются» в сторону подобия совершенству Бога.

[Вернуться](#)

123

Чтобы переводить работы с арабского языка на латынь (а некоторые непосредственно с греческого языка на латынь), христиане открывали центры перевода. Это было поистине удивительное достижение: мусульмане, евреи и христиане работали вместе ради этой общей цели и мирно сосуществовали.

[Вернуться](#)

124

Мы должны помнить, что атомная теория Демокрита попыталась ответить на фундаментальный вопрос об изменении постоянства – для древних греков в то время это было важно. Если бы вопрос был поставлен проще: «Каковы фундаментальные составляющие материи?» – тогда, возможно, его атомная теория завоевала бы большую популярность. Кроме того, в Средневековье Аристотеля считали экспертом по большинству вопросов, что усилило резкую критику трудов Демокрита. Наконец, как и у всех философов до Сократа, работы Демокрита уцелели только в виде фрагментов и слухов из порой ненадежных источников.

[Вернуться](#)

125

Период европейской истории с V (после падения Римской империи в 476 году) по XV век.

[Вернуться](#)

126

По большей части атомная теория Эпикура следует теории Демокрита – с одной значимой особенностью. По словам Эпикура, атомы в пустоте двигаются по нисходящей траектории параллельно

друг другу. Однако некоторые атомы спонтанно «отклоняются» в сторону. Эпикур считал, что возникающие столкновения позволяют атомам объединяться и формировать материальные объекты, которые мы можем наблюдать. Также это правило отвечает и за другие природные явления.

У Демокрита последующие столкновения атомов возникают в результате предшествующих. Таким образом, движение атомов – и вещей в целом – Демокрит рассматривал как детерминированные. Эпикур не мог поверить в полностью детерминированное представление о мире, которое отрицает какую-либо свободу, и поэтому добавил «отклонение» в его атомную теорию, чтобы придать ей долю хаотичности ради концепта свободы воли.

[Вернуться](#)

127

Период итальянской истории с конца XIII века до 1600-х годов.

[Вернуться](#)

128

Браччолини был гуманистом раннего Итальянского Возрождения.

[Вернуться](#)

129

Геродот был древнегреческим историком (484–425 до н. э.).

[Вернуться](#)

130

Николай Коперник был астрономом эпохи Возрождения. Он первым предположил, что Солнце является центром Вселенной, что противоречило идеям его времени. Он подробно описал свою работу в

труде «О вращении небесных сфер», который, опасаясь преследований со стороны церкви, он издал только перед смертью в 1543 году.

[Вернуться](#)

131

В 1634 году, когда Декарт был наконец готов опубликовать «Мир», он узнал, что инквизиция в Риме осудила Галилео за его учения в «Диалоге о двух главнейших системах мира». Теперь, понимая, что «Мир» содержал материал, который также будет признан церковью сомнительным, он боялся повторить судьбу Галилео и в 1634 году написал другу, что он не будет публиковаться. В 1662 году последнюю главу «Мира» издали отдельно под названием «О человеке», остальное было опубликовано в 1664 году; а весь труд – в 1677 году.

[Вернуться](#)

132

Сегодня мы говорим, что импульс (количество движения) и угловой момент (момент импульса) сохраняются независимо друг от друга. Мы говорили об импульсе в части 1. Вспомните, что это масса объекта, умноженная на его скорость. (Скорость объекта включает и быстроту перемещения, и направление движения; это вектор.) Превосходный пример сохранения импульса – игра в бильярд. После удара, когда бильярдный шар сталкивается с остальными шарами, он передает им свой импульс и, следовательно, сам теряет импульс; то есть в целом импульс сохраняется. Угловой момент также сохраняется. Вы можете думать об угловом моменте как о вращательном аналоге импульса. То, как вы удерживаете чашку кофе в руке, медленно вращаясь в определенном направлении, – отличный пример сохранения углового момента. Если вы вращаетесь влево, кофе в чашке будет вращаться вправо, и наоборот. Система, которая состоит из вас и чашки кофе, сохраняет угловой момент таким образом, чтобы его общая сумма равнялась нулю – значению до начала движения. Это и есть сохранение: начальное и конечное значения равны друг другу (то есть нулю).

[Вернуться](#)

133

Декарт действительно настаивал, что мир очень похож на механизм, похожа даже работа тела человека и животных в целом. Однако в своей теории он четко делал исключение для человеческой души. Согласно Декарту, если действие требовало любого умственного усилия, оно требовало и вовлечения души. Более того, душа и сложный механизм человеческого тела были связаны согласно Божьей воле. Интересно отметить некоторые из вещей, по мнению Декарта, не требовавших умственного усилия, – вещей, которым мы часто приписываем психологический компонент, – восприятие, память, чувства вроде страха или действия вроде ходьбы.

[Вернуться](#)

134

Ньютон учитывает теорию Галилео, но игнорирует идеи Декарта, который в «Первоначалах философии» (1644) гласит (как и Ньютонов первый закон движения): «Каждая вещь будет оставаться в прежнем состоянии, пока может; и, следовательно, начав двигаться, она всегда будет продолжать перемещаться».

[Вернуться](#)

135

Хороший пример с небольшой силой трения – движение объекта по льду. Любой, кто ездил по покрытой льдом дороге зимой, подтвердит, что из-за незначительного трения автомобиль может начать скользить.

[Вернуться](#)

136

Мы называем весом силу тяжести Земли, «тянущую» книгу вниз. Поэтому, согласно третьему закону Ньютона, этому «притяжению» книги со стороны Земли противодействует «притяжение» самой Земли со стороны книги. Эти силы равны, но противоположно направлены.

[Вернуться](#)

137

Пять томов, которые появились в 1799–1805 годах и были исправлены в 1823–1825 годах.

[Вернуться](#)

138

Арабы переводили работы Болоса Демокритоса, как и работы Аристотеля, что оказало большое влияние на арабскую алхимию.

[Вернуться](#)

139

По легенде, египетская алхимия началась с истории «Изумрудной скрижали», написанной египетским богом математики и науки, Тотом (греки считают, что это был Гермес. Это породило синтетическое именование божества Гермес-Тот, или Трижды Великий Гермес, также известный как Гермес Трисмегист). «Изумрудная скрижаль» – несомненно, один из самых древних и проверенных временем из всех алхимических документов. Греческие и исламские переводчики имели обыкновение благодарить кого-то (обычно более раннего автора), кроме автора первоисточника, за проделанную алхимическую работу. Действительно, самая ранняя дошедшая до нас версия «Изумрудной скрижали» появляется в арабском тексте начала XI века за авторством Аполлиния Тианского, мага, жившего в I веке (н. э.). Изумрудная скрижаль написана в форме шифра, как и множество алхимических писем, и у нее было несколько интерпретаторов, включая Ньютона. Алхимики Средневековья и Ренессанса заимствовали из «Изумрудной

скрижали» систему взглядов, иногда касающихся макромира и микромира, или же герметизм.

[Вернуться](#)

140

Александрию основал Александр Великий в 331/332 году до н. э.

[Вернуться](#)

141

Поскольку в колледже я специализировался на химии, то должен был посещать несколько лабораторных классов. На каждом из них я вел тетрадь с наблюдениями за поставленными экспериментами. Основное правило ведения лабораторного журнала запрещало вырывать любую страницу, даже если на ней была ошибка. Было достаточно просто зачеркнуть ошибку. Таким образом, позже я мог пересмотреть ошибки, если думал, что там все еще можно найти нечто полезное. Иногда ошибки или процесс их совершения приводят к чему-то важному, поэтому забывать их – не такая уж хорошая идея. В самом деле, так часто бывало, и возможность приглядеться к моей исходной «ошибке» подсказывала мне практичные идеи. Мои записи всегда включали в себя как «ошибки», так и верную информацию. В некоторой степени так же можно думать об отношениях между алхимией и химией – не то чтобы я строго относил алхимию к очевидным ошибкам. Скорее сходство заключается в том, что исходная попытка, которую некто вначале считал не очень правильной, может привести к правильному ответу (или некоторой его форме). Зачастую ответ присутствовал в «ошибке» и ждал своего часа для дальнейшего изучения или чуть больших усилий.

[Вернуться](#)

142

Джабир ибн Хайян, в латинизированном варианте – Гебер, достиг небывалого для исламской алхимии уровня знаний. Ему приписывают создание *aqua regia* («царской водки», на латыни – королевской воды), смеси азотной и соляной кислот (одна часть концентрированной азотной кислоты и три части концентрированной соляной кислоты по объему). *Aqua regia* растворяет множество металлов, включая золото и платину, которые являются членами группы металлов, известных как «королевские металлы» (отсюда и «королевская вода»), или «благородные металлы», которые плохо поддаются коррозии и окислению. Тем не менее *aqua regia* не может растворить все королевские металлы.

[Вернуться](#)

143

Филипп Ауреол Парацельс, или просто Парацельс, урожденный Теофраст Бомбаст фон Гогенгейм.

[Вернуться](#)

144

Алхимия была основой некоторых идей Ньютона, возможно, даже некоторых «наиболее уважаемых», о которых мы знаем. Действительно, кажется, что его исследования алхимии дали ему возможность понять нечто очень важное об атомах: они взаимно отталкиваются и притягиваются; они «толкают» и «притягивают» друг друга в различных степенях. Было даже предположение, что его знание о «притягательной» природе атомов привело его к созданию закона тяготения, чего мы, к сожалению, не узнаем.

[Вернуться](#)

145

Это было самое подходящее время, так как появлялся новый тренд экспериментальных исследований. Дни простых наблюдений и записи

данных сменялись более критическим процессом экспериментов. В 1620 году Фрэнсис Бэкон (1561–1626) написал «Новый Органон», в котором заявлял о необходимости нового подхода к сбору и интерпретации экспериментальных данных. В этом труде он приводит доводы в пользу *индуктивного*, а не *дедуктивного* подхода к работе с экспериментальными данными. Таким образом, он заложил основы научного метода, который мы используем сегодня. Он также утверждал, что для того чтобы действительно добиться фундаментального понимания природы, нужно, так сказать, рассматривать природу на месте. Бэкон говорит об этом довольно изящно: «В напряжении и беспокойстве; так сказать, когда искусством и руками человека ее выводят из ее естественного состояния, сжимают и лепят». Действительно, аристотелевский подход простого наблюдения уступал дорогу экспериментам, которые допускали контролируемое наблюдение природных явлений.

[Вернуться](#)

146

Проводя эксперименты, Лавуазье был очень дотошен. Он особенно обращал внимание на количественные экспериментальные методы и использование химических весов, чтобы тщательно взвешивать исходные и конечные материалы. Его химические эксперименты опровергли теорию флогистона, согласно которой флогистон был чем-то, что было встроено в вещество и высвобождалось при горении. Вместе с тем эксперименты Лавуазье показали, что когда вещество горит, оно в процессе объединяется с кислородом; горение – процесс, при котором исходный материал объединяется с кислородом. Следовательно, когда исходный материал объединяется с кислородом, вы получаете конечный материал горения, который на самом деле тяжелее, чем ваш исходный материал. (В этом примере мы не считаем кислород исходным материалом.) Если бы действительно огонь был результатом выделения флогистона, следовало бы ожидать, что горение приведет к уменьшению массы, тогда как Лавуазье ясно показал, что она увеличилась.

[Вернуться](#)

147

Однако иногда в ходе химической реакции могут остаться исходные материалы, которые указывают, что не все было использовано. В этом случае количество оставшихся материалов в сумме с конечными материалами должно равняться количеству исходных материалов.

[Вернуться](#)

148

В 1644 году Декарт создал свой основной труд – «Первоначала философии». В нем он отрицает понятие действия на расстоянии и предполагает, что все пространство заполнено частями материи, которые взаимодействуют через прямой контакт. В 1687 году Ньютон написал «Начала». В этой работе он утверждает, что сила тяжести – один из способов взаимодействия на расстоянии, при котором объекты, такие как планеты, за счет силы тяжести взаимно притягиваются в вакууме. Ньютон принимал понятие действия на расстоянии без энтузиазма. «Общая теория относительности» Эйнштейна рассматривала гравитацию как искривление пространства – времени. Таким образом, материя искривляет пространство – время с помощью силы тяжести, являющейся результатом этого искривления, пространство – время влияет на движение материи, и действие на расстоянии оказывается исключенным. Действие на расстоянии возникает в *квантовой запутанности*. Эйнштейн назвал его «жутким действием на расстоянии», которое мы обсудим, когда будем говорить о квантовой механике в части 4.

[Вернуться](#)

149

Дальтон полагал, что частицы газа взаимодействуют с силами отталкивания, причем чем ближе частицы друг к другу, тем больше сила взаимодействия. Эту идею он взял из абзаца Ньютона в «Началах», где тот описывал вычисления, которые он проделал, чтобы

показать, что закон Бойля – Мариотта можно верно вывести, исходя из того, что частицы газа взаимодействуют таким образом. Однако сам Ньютон не намеревался утверждать, что частицы газа действительно так взаимодействуют.

[Вернуться](#)

150

Дальтон также известен благодаря своему закону парциального давления. С его помощью можно рассчитать полное давление, оказываемое смесью газов в сосуде, когда газы в смеси не сильно взаимодействуют друг с другом – то есть когда они ведут себя почти как *идеальный газ*. Согласно закону *парциального давления Дальтона*, полное давление смеси получается просто сложением парциального давления каждого из газов в смеси. Парциальное давление – это давление, которое оказывал бы данный газ смеси, если бы он был в сосуде один; то есть каждый газ в сосуде, как предполагается, ведет себя независимо от других газов смеси.

Закон парциального давления Дальтона можно понять из *кинетической теории газов*. Согласно этой теории, средняя *поступательная кинетическая энергия* (кинетическая энергия, связанная с движением в направлениях x , y и z) отдельной частицы (атома или молекулы) в газе зависит только от температуры; если температура известна, можно определить среднюю поступательную кинетическую энергию отдельной частицы в газе. Поэтому при заданной температуре у всех частиц в смеси газа средняя поступательная кинетическая энергия одинакова. Безусловно, если у меня есть смесь, содержащая два газа, А и В, у частиц газа А та же средняя поступательная кинетическая энергия, что и у частиц газа В. Таким образом, если я возьму контейнер с частицами А и добавлю в него частицы В, средняя полная кинетическая энергия будет суммой энергий всех частиц А и В. Далее, давление газа в сосуде – мера средней полной кинетической энергии, которую частицы передают стенкам сосуда, когда сталкиваются с ними. Так как мы предполагаем, что частицы ведут себя идеально, добавив атомы газа В в сосуд с атомами газа А, мы увеличим среднюю полную кинетическую

энергию, и полное давление будет суммой парциального давления газов А и В. Довольно забавно, что закон парциального давления Дальтона понятен из кинетической теории газов – теории, в которую никогда не верил сам Дальтон.

[Вернуться](#)

151

Растворимость – мера того, как хорошо одно вещество (раствор) распадается в другом веществе (растворителе). Представьте вещество, растворенное в воде. Его способность распадаться в воде связана с его способностью «тесно» взаимодействовать с молекулами воды. Если вещество будет неспособно тесно взаимодействовать с водой, оно не будет хорошо распадаться. Столовая соль хорошо распадается в воде, потому что ее молекулы вступают в тесное взаимодействие с водой, тогда как оливковое масло распадается плохо, поскольку его молекулы неспособны вступать в такие взаимодействия. Поэтому, строго говоря, растворимость не обязательно связана с весом. Однако есть некоторые примеры, когда вес вещества действительно связан с его способностью распадаться в растворителе. Вещества, разрабатываемые при изобретении лекарства, часто становятся менее растворимыми в воде, когда их вес увеличивается. Это происходит, потому что за счет повышения их веса растет количество их атомов углерода и водорода. Проще говоря, углерод и водород не вступают в достаточное количество предпочтительных связей с водой, таким образом понижая растворимость молекулы в целом.

[Вернуться](#)

152

«Песок», World Book Encyclopedia (Чикаго: издательство World Book, 2000).

[Вернуться](#)

153

Это реакция горения, а значит, вы должны с помощью источника пламени заставить водород гореть, таким образом запуская реакцию.

[Вернуться](#)

154

Вещества, содержащие несколько элементов, могут не придерживаться закона кратных отношений. Например, рассмотрим такое органическое соединение, как сахароза (сахар) и глюкоза (сахар, содержащийся в крови), молекулярные формулы которых – $C_{12}H_{22}O_{11}$ и $C_6H_{12}O_6$ соответственно. Здесь простое отношение целых чисел справедливо только для углерода в пропорции 2: 1.

[Вернуться](#)

155

В 1865 году Иоганн Лошмидт (1821–1895), используя кинетическую теорию, измерил размер одной молекулы воздуха. Простой набор его уравнений позволил бы ему оценить количество воздушных молекул в данном объеме. Однако он не сделал этот заключительный шаг, который был позже сделан Джеймсом Клерком Максвеллом (1831–1879), который вычислил значение $1,9 \cdot 10^{25}$ воздушных молекул на кубический метр.

[Вернуться](#)

156

С 2006 года Американский национальный институт стандартов и технологий (*NIST*) утвердил следующее значение: $6,02214179(30) \cdot 10^{23}$ частиц/моль.

[Вернуться](#)

157

Это также означает, что для того чтобы найти относительную массу элемента или химического соединения, оно либо должно находиться в газообразном состоянии, либо его можно перевести в это состояние; это не подходит для всех веществ, и поэтому необходимо применить другие методы.

[Вернуться](#)

158

Под «большим» я имею в виду что-то намного большее, чем один единственный атом или молекула, а нечто размером с частицу пыли.

[Вернуться](#)

159

Под «погруженным в жидкость» мы имеем в виду всего лишь противоположность веществу, которое растворяется в жидкости. Например, если вы добавляете сахар или соль в воду, они растворяются. Если какое-то вещество добавлено в воду, но при этом оно не растворилось в ней, а осталось на поверхности, то оно погружено в воду.

[Вернуться](#)

160

Первой техникой, которая могла получение изображения отдельных атомов, стал полевой ионный микроскоп (1950-е годы).

[Вернуться](#)

161

Это приблизительный расчет, поэтому давайте потратим минуту, чтобы понять его. Молекула воды, как вы знаете, имеет формулу H_2O . Это плоская молекула, атомы которой связаны как $H - O - H$, и

получающийся при их соединении угол составляет $104,5^\circ$. Длины связи Н – О составляют приблизительно 0,1 нанометра (нм), что составляет 10^{-10} метров (м), или 0,0000000001 м. Кроме того, расстояние между двумя молекулами водорода составляет приблизительно 0,15 нм. С другой стороны, размер броуновской частицы – несколько микрометров (мкм); один микрометр равен 10^{-6} , или 0,000001 м. В письме своему другу Эйнштейн пишет, что согласно его новой теории, частицы такого размера должны совершать наблюдаемые (через микроскоп) движения благодаря тепловым движениям молекул жидкости. Поэтому для простоты я взял молекулу воды как самую длинную, около 0,15 нм (расстояние между атомами водорода), а также 1 мкм для размера броуновской частицы. Отношение этих размеров равно 6666,7, или примерно 6700.

[Вернуться](#)

162

Сегодня мы используем более изящный подход, чем выражение Эйнштейна. Можно записать уравнение движения Ньютона для броуновской частицы, которое учитывает трение (силу, пропорциональную скорости) и силу, представляющую собой случайную функцию времени, с которой действуют на тело молекулы жидкости (например, воды). Это уравнение известно как стохастическое дифференциальное уравнение Ланжевена.

[Вернуться](#)

163

Выражение Эйнштейна для среднеквадратичного смещения в одном направлении выглядело так: $\langle x^2 \rangle = 2Dt$, где D – коэффициент диффузии, а t – величина промежутка времени. Однако данное выражение справедливо только по прошествии определенного временного периода. Если промежуток времени будет слишком коротким, среднеквадратичное смещение будет непосредственно следовать из уравнения движения Ньютона и может быть записано

следующим образом: $\langle x^2 \rangle \sim \langle v_0^2 \rangle t^2$, где v_0 – средняя скорость системы при данной температуре. Отчасти это могло привести к ошибкам в изначальных измерениях. Таким образом, на коротких временных интервалах $\langle x^2 \rangle$ определяется классическими уравнениями движения, а при более длинных промежутках берет свое статистическая природа системы, и выражение Эйнштейна вступает в силу.

[Вернуться](#)

164

Именно так Перрен и смог получить первое точное значение, как отмечалось ранее.

[Вернуться](#)

165

Например, при комнатной температуре предметы испускают излучение преимущественно в инфракрасной области электромагнитного спектра, хотя наши глаза не позволяют нам непосредственно его наблюдать. Однако оно лежит в основе работы *тепловизоров*, использующихся в некоторых очках ночного видения, позволяющих четче видеть предметы в темное время суток. Другой знакомый пример – лампа накаливания, нить которой нагрета (до температуры около 3000 К), чтобы давать видимый свет. Однако, помимо видимого света, она излучает в инфракрасных и красных областях электромагнитного спектра, который составляет большую часть ее излучения.

[Вернуться](#)

166

При прохождении света через дифракционную решетку разные цвета в нем (то есть световые волны разных *частот*, или *длин*) разделяются. Таким образом, луч света, испускаемого атомом, в результате дает *спектр*, который служит «отпечатком пальцев» для этого определенного типа атома, или химического элемента.

[Вернуться](#)

167

Радуга образуется, когда Солнце появляется после дождя или светит во время дождя. Капельки воды, находящиеся в воздухе, разделяют солнечный свет на разные цвета, которые его составляют, – они и видны как радуга. Это явление отличается от дифракции и включает в себя как преломление, так и полное внутреннее отражение света в капле.

[Вернуться](#)

168

Следует признать, что я только предлагаю довольно вероятную схему, по которой Кирхгоф мог провести свой эксперимент.

[Вернуться](#)

169

Вы можете поспорить, что картошка снова поглощает часть испускаемого ею излучения, вследствие этого полное количество энергии поглощенного теплового излучения равно вышеупомянутой части энергии, испущенной индейкой, плюс количество энергии, снова поглощенной самой картошкой. Здесь я решил не принимать во внимание возможность повторного поглощения, поскольку

окончательное математическое соотношение, которое мне хотелось бы обсудить, не изменится.

[Вернуться](#)

170

Второй закон требует, чтобы каждый объект в системе (например, индейка и картошка) по отдельности излучал и поглощал с одной и той же скоростью. Первый закон всего лишь требует, чтобы *полная* излученная энергия и *полная* поглощенная энергия были равны друг другу. Однако соблюдение только первого закона допустит следующее развитие событий: (в системе двух объектов) один из них будет только излучать, тогда как другой – только поглощать. Таким образом, излучающий объект будет продолжать охлаждаться, а поглощающий – нагреваться. Другими словами, мы имеем передачу тепла от холодного объекта к более теплomu, что является строгим нарушением второго начала термодинамики. Эту катастрофу можно предотвратить заключением, что, когда система находится в равновесии, каждый объект должен излучать и поглощать с одной и той же скоростью.

[Вернуться](#)

171

Поразительно, что это уравнение не зависит от формы или состава объектов, или ящика.

[Вернуться](#)

172

Двое из его братьев и сестер были от первого брака его отца.

[Вернуться](#)

173

Стоит отметить, что в 1879 году Йозеф Стефан (1835–1893), основываясь на экспериментальных данных, выдвинул предположение, что полная энергия, излучаемая горячим объектом, пропорциональна T^4 . В общем случае это утверждение неверно, и в 1884 году Больцман получил точный результат, показав, что зависимость от T^4 , выдвигаемая Стефаном, применима лишь к абсолютно черному телу, а не к любому горячему объекту.

[Вернуться](#)

174

В своей «Научной автобиографии» 1948 года Планк отмечал, что близкая дружба его отца с профессором физики Кильского университета внесла свою лепту в его назначении на должность.

[Вернуться](#)

175

Возможно, Гельмгольц помог Планку в получении должности.

[Вернуться](#)

176

Во всей своей научной работе Планк использовал эту концепцию резонаторов, иногда рассматривая набор резонаторов, а иногда – только один.

[Вернуться](#)

177

На самом деле всякая неравновесная система, стремящаяся к равновесию, делает это необратимо.

[Вернуться](#)

178

Выражение для W в комбинаторной форме имеет вид:

$$W = (N - 1 + P)! / P! (N - 1)!$$

В модели Больцмана ему равнялось суммарное число разных способов, которыми P различных порций энергии могут быть распределены по системе N различных атомов газа, то есть полное число микросостояний системы.

[Вернуться](#)

179

Это равносильно утверждению, что система состоит из N независимых резонаторов. В этом случае полная энтропия системы будет суммой энтропий всех резонаторов, или $N \times S_1$, где S_1 – энтропия одного резонатора. Более того, данная аналогия является совершенно точной, поскольку Планк рассматривал свою систему в состоянии равновесия. Поэтому систему из N независимых резонаторов, находящуюся в равновесии, можно сравнить с равновесной системой, состоящей из всего лишь одного резонатора.

[Вернуться](#)

180

Весной 1905 года Эйнштейн написал своему старому школьному другу (из университета Цюриха), Конраду Хабихту, о своей работе с заметным энтузиазмом.

[Вернуться](#)

181

Однако Эйнштейн на самом деле ее получил в 1922 году.

[Вернуться](#)

182

Интересно, что энергия света в ящике при изменении объема не меняется. В уравнении Эйнштейна это следует из того, что он рассматривает свет с частотами, лежащими лишь в малом интервале, и этот интервал не меняется при изменении объема. Поэтому не изменяется полная энергия света.

[Вернуться](#)

183

В уравнении Больцмана для энтропии предполагается, что вероятность возникновения данного микросостояния одинакова для всех микросостояний. В общем случае это не так, и обычно для расчета энтропии требуется более сложное выражение.

[Вернуться](#)

184

Любопытно, что, несмотря на то что выражение для разности энтропий этой системы было известно (и по-прежнему известно), Эйнштейн потратил около двух страниц, чтобы его заново вывести своим индивидуальным способом. Прямо перед тем, как перейти к этому выводу, Эйнштейн сделал паузу, чтобы выразить что-то похожее на недовольство способом определения W , который использовали другие. Точнее говоря, он чувствовал, что метод подсчета, введенный Больцманом и примененный Планком, был довольно неестественным. На самом деле он обещал ввести свой собственный новый метод в следующей статье: «...и я надеюсь, что он устранил логическую трудность, которая по-прежнему мешает применению принципа [уравнения] Больцмана». Статья, которую обещал Эйнштейн, никогда не была издана. Несомненно, часть (если не бо2льшая) его желания потратить время на проведение вывода заново была попыткой обосновать будущую статью. Возможно Эйнштейн представлял способ обобщения определения W , полученного для идеального газа, на

другие системы. К сожалению, его оптимизм был неуместен, поскольку идеальный газ представляет собой особый случай, в котором W рассчитывается легко.

[Вернуться](#)

185

Часто ошибочно говорят, что Эйнштейн с помощью той работы продолжил развивать идеи Планка. Это неправильно, поскольку здесь Эйнштейн вообще не использовал работы Планка.

[Вернуться](#)

186

Конкретнее, он говорил: «Определенный вид движения, или быстрое и живое действие, которое передается нашим глазам через толщу воздуха и других прозрачных тел, подобно тому, как движение или сопротивление тел, с которыми сталкивается человек, передается его рукам посредством палки».

[Вернуться](#)

187

Точная хронология экспериментов Ньютона по оптике немного запутана. Тем не менее, вероятнее всего, Ньютон начал свою работу по оптике около 1666 года, расширяя первоначальные исследования, и прояснил свою теорию в 1669. Хотя к 1670 году его теория была полностью разработана, свои изначальные взгляды он опубликовал только в статье 1672 года.

[Вернуться](#)

188

Звук с тоном ниже – то есть звуковая волна большей длиной волны (меньшей частоты) – будет дифрагировать (или огибать) объект в

большей степени, чем волна с тоном выше (звуковая волна меньшей длины, то есть большей частоты). Это означает, что звук с тоном ниже легче услышать около предмета, который может находиться перед источником, чем звук с более высоким тоном.

[Вернуться](#)

189

В 1862 году Фуко измерениями получил значение скорости света 299 796 км/с, что хорошо согласуется с современным значением – 299 792,458 км/с.

[Вернуться](#)

190

Данная картина немного упрощена. Отдельный электрон испытывает притяжение со стороны всех близких атомов, а не просто со стороны одного атома.

[Вернуться](#)

191

Планк намеренно сохранял описание своих резонаторов нечетким и использовал его для своего удобства в своей работе над квантовой теории света и вещества.

[Вернуться](#)

192

Импульс света (как волны) можно получить из уравнений Максвелла, которые также покажут, что он равен энергии света, разделенной на скорость его распространения. Наконец, тот же самый результат получают из соотношения между энергией и импульсом в рамках специальной теории относительности, поскольку масса покоя фотона равна нулю.

[Вернуться](#)

193

Эйнштейн также нуждался в ясном понимании импульса фотона, чтобы с легкостью продолжить расчет числа микросостояний. В 1905 году у Эйнштейна должно было быть (во всяком случае, не могу себе представить, что его не было) четкое представление об импульсе фотона. Если оно и было, он не сообщил о нем сразу же. На самом деле, первым импульс фотона упомянул Йоханнес Штарк в 1909 году, в том же самом году (как мы обсуждали выше), когда Эйнштейн показал, что у флуктуации импульса света есть корпускулярная и волновая составляющие. Без сомнений, к 1909 году Эйнштейн, должно быть, очень хорошо был знаком с импульсом фотона. Но продолжал молчал. И так было до 1917 года, когда Эйнштейн реально об этом заговорил.

[Вернуться](#)

194

Однако, как мы обсуждали ранее, он уже определил число микросостояний с помощью своего предыдущего подхода.

[Вернуться](#)

195

Бозе прямо использовал импульс фотона ($h\nu / c$), что сыграло важную роль в разработке этой новой картины микросостояний фотонов.

[Вернуться](#)

196

В своем труде 1905 года Эйнштейн как раз предположил, что фотоны (световые кванты) сохраняются. Это предположение

проникает в вывод Эйнштейна, когда он приравнивает энтропию идеального газа к энтропии света, что (как мы помним) приводит к выражению $E = N h \nu$, где N – фиксированное число атомов идеального газа. Эйнштейн понимал N также как число фотонов и таким образом предполагал, что фотоны сохраняются.

[Вернуться](#)

197

Тем не менее, Бозе искал способ достижения максимума числа микросостояний, чтобы получить равновесную энтропию согласно методу Больцмана. С другой стороны, Планк использовал метод Больцмана для получения числа микросостояний, пропустив шаг максимизации и предположив, что результат был равновесной энтропией.

[Вернуться](#)

198

Планк считал свои резонаторы различимыми, как и Больцман – атомы газа. Однако порции энергии считались неразличимыми, как и частицы у Бозе (фотоны).

[Вернуться](#)

199

Очевидно, Бозе обсуждал с Эйнштейном идею того, что фотоны имеют что-то наподобие спина, но Эйнштейн сказал ему не акцентировать на этом внимания. Сомнения в необходимости развития темы спина в общем-то понятны, поскольку концепция частицы с «квантовым спином» тогда была неизвестна.

[Вернуться](#)

200

Вспомним, что Эйнштейн уподобил свет идеальному газу. Следствие его утверждения состоит в том, что оно означает одинаковость методов подсчета микросостояний как для фотонов, так и для идеального газа. Другими словами, Эйнштейн использовал подход, очень отличающийся от такового у Бозе (который был правильным). Тем не менее, он получил верный результат. Это было возможно, поскольку Эйнштейн рассматривал свет при низких плотностях энергии (используя в своих вычислениях закон излучения Вина). То есть правильные результаты получились, когда он сравнил его с моделью идеального газа, хорошо описывающей реальный газ при низких плотностях. Более того, микросостояния идеального газа у него обуславливаются различимостью атомов газа. Поэтому Эйнштейн также пришел к рассмотрению фотонов как различимых. Опять же, это все работало, поскольку Эйнштейн рассматривал каждую систему только при низких плотностях.

[Вернуться](#)

201

Статьи Бозе и Эйнштейна на самом деле были лишь самым началом квантовой статистики. Сегодня мы знаем, что в зависимости от квантовой статистики, которой они подчиняются, микроскопические частицы принадлежат одной из двух возможных групп: они являются либо *бозонами*, либо *фермионами*. Таким образом, хоть они все неотличимы друг от друга, в дальнейшем их нужно относить к соответствующим группам. Применением метода Бозе к атомам Эйнштейн раскрыл их неразличимую сущность. Понадобились работы Поля Дирака (1902–1984), Вольфганга Паули (1900–1958) и других, которые вскоре последовали за работой Эйнштейна, чтобы прояснить вопросы классификации в квантовой статистике.

[Вернуться](#)

202

Адаптируя подход Бозе (в своей первой статье 1924 года) и применяя его к идеальному квантовому газу, Эйнштейн окончательно

принял метод Больцмана, хотя раньше его открыто критиковал. Это связано с тем, что при вычислении полного числа микросостояний и суммарной энтропии Бозе использовал, хоть и модифицированную, но версию метода Больцмана. Следуя подходу Бозе, Эйнштейн поступил так же.

[Вернуться](#)

203

Удивительно, что Эйнштейн обнаружил фазовый переход, используя при рассмотрении идеального газа метод подсчета микросостояний Бозе. Другими словами, он установил этот переход через чисто статистическое рассмотрение неразличимых частиц. Между тем, сегодня мы знаем, что этот тип фазового перехода присущ только бозонам.

[Вернуться](#)

204

Распространение де Бройлем дуализма на рентгеновские лучи было значительным расширением работы Эйнштейна 1905 года. В то время Эйнштейн имел дело лишь с излучением абсолютно черного тела в случае низкой плотности энергии, который был описан в законе излучения Вина (а не Планка).

[Вернуться](#)

205

Есть предположения, что Эйнштейн уже пришел к концепции корпускулярно-волнового дуализма вещества до того, как познакомился с какой-либо работой де Бройля.

[Вернуться](#)

206

Результатами этих усилий стали статьи «По кинетической теории магнетизма» и «Исследование кинетики диэлектриков, точки плавления, пиро- и пьезоэлектричества».

[Вернуться](#)

207

Сегодня Изонцо расположена на территории нынешней Словении. В 60 миль в длину, река лежит в долине, по обе стороны от которой находятся горы, и течет с севера на юг, беря начало в Юлийских Альпах и впадая в Адриатическое море. В течение Первой мировой войны она находилась на территории Австро-Венгрии, вдоль ее границы с Италией. Между 1915 и 1917 годами на реке Изонцо прошло 12 битв.

[Вернуться](#)

208

В 1916 году Эйнштейн закончил работу над общей теорией относительности. Он показал, что в присутствии вещества пространство-время искривляется, что приводит к «силе», которую мы называем силой гравитации. Так что прошли те времена, когда люди думали, что гравитация представляет собой силу, действующую (мгновенно) на расстоянии, приводя к тому, что одно тело притягивается к другому. В 1918 году Герман Вейль (1885–1955) попытался объединить те два взаимодействия, которые были тогда известны физикам, – гравитационное и электромагнитное, в рамках общей теории относительности посредством введения калибровочного преобразования. В пространстве-времени Эйнштейна (Римана) модуль вектора при его движении от точки к точке по пространственно-временной траектории остается постоянным. Однако с калибровочными преобразованиями Вейля все меняется, и теперь модуль вектора при движении в этом новом (не римановом) пространстве-времени будет меняться. Хорошей новостью было то, что в рамках этого математического подхода Вейль успешно объединил гравитацию и электромагнетизм. Он отправил свои

результаты Эйнштейну, тот был сначала от них в восторге, но в конечном счете не смог принять реальные физические последствия подхода Вейля. В теории Вейля находит отражение тот факт, что длина измерительного стержня будет меняться от точки к точке при его движении вдоль траектории в пространстве-времени. Другими словами, значение, полученное при измерении в одной точке, будет отличаться от значения, измеренного в другой точке, просто потому, что положение в пространстве-времени меняется. Более того, темп изменения во времени будет также меняться от точки к точке на пространственно-временной траектории. То есть измерения длины и времени больше не являлись абсолютными (какими они были в теории Эйнштейна). Вместо этого они становятся относительными и зависят от положения, где они были проведены, – они локально зависимы.

В частности, Эйнштейн указал на то, что, согласно теории Вейля, атомные спектры определенного химического элемента будут зависеть от того, где и когда были проведены измерения. Однако мы знаем, что физически дело обстоит иначе. В 1922 году в своей статье «О замечательном свойстве квантовых орбит одного электрона» Шрёдингер вернулся к подходу Вейля. Он рассмотрел электрон на орбите в атоме водорода согласно атомной модели Бора. Далее он вообразил связанный с ним вектор, величина которого менялась в соответствии с теорией Вейля при движении электрона (в пространстве и во времени) от точки к точке по своей орбите. Какое именно физическое свойство представлял вектор, Шрёдингеру тогда было не ясно. Однако он отметил, что математически (с правильным выбором неопределенной постоянной, в качестве которой он взял постоянную Планка) было возможно сохранить модуль вектора электрона при его движении по орбите, тем самым устраняя любые физически не желаемые эффекты. Другими словами, оказалось, что в этом случае теория Вейля была физически реализуемой. Хотя Шрёдингер не смог установить физический смысл предположенного вектора, он заметил: «Сложно поверить, что этот результат – всего-навсего случайное математическое следствие квантовых условий и не имеет более глубокого физического смысла». Позднее Шрёдингер поймет, что физический смысл его неопределенного вектора был не чем иным как связанным с длиной волны де Бройля. Интересно подумать, что, если бы Шрёдингер не был так измучен, возможно, он

смог бы на основе этого намека написать свой величайший труд уже тогда, а не четыре года спустя.

[Вернуться](#)

209

На самом деле волновое уравнение он знал еще до того, как сделал этот «вывод», по всей видимости, получив уравнение очень простыми математическими манипуляциями. Вывести волновое уравнение Шрёдингера из классической механики напрямую невозможно. Это связано с тем, что вдобавок к математическим формулам требуются особые постулаты. В частности, Шрёдингер потребовал, чтобы волновая функция как решение его уравнения была вещественной, однозначной, ограниченной и имеющей непрерывную вторую производную. К моменту написания своей четвертой статьи он пришел к заключению, что иногда волновая функция может быть комплексной (то есть не вещественной) величиной.

[Вернуться](#)

210

Эйнштейн на самом деле рассмотрел три процесса: спонтанное излучение, вынужденное излучение и поглощение. Гейзенберг сосредоточился только на спонтанном излучении, при котором переход осуществляется без взаимодействия со светом. Именно на спонтанное излучение Эйнштейн обратил внимание в конце своей статьи, отмечая, что из его теории следовало, что направление импульса отдачи для этого процесса – к его величайшему сожалению – определен исключительно случаем.

[Вернуться](#)

211

Именно эти последние две статьи составляют основу матричного подхода к квантовой механике, преподаваемого в настоящее время.

[Вернуться](#)

212

Импульс электрона после столкновения можно определить с помощью детектора. Импульс фотона до столкновения можно установить с помощью источника света наподобие лазера, где известны как модуль, так и направление импульса фотона. Тем самым остается определить импульс фотона после столкновения, чтобы найти начальный импульс электрона.

[Вернуться](#)

213

Сегодня мы знаем, что на самом деле это постоянная Планка, поделенная на 4π .

[Вернуться](#)

214

Задний экран расположен на расстоянии, значительно превышающем расстояние между центрами двух щелей.

[Вернуться](#)

215

Читателю, которому интересно узнать больше об этой области исследования, предлагаю взглянуть на книги Брайана Грина.

[Вернуться](#)

216

Посмотрите книгу Брайана Грина «Скрытая реальность. Параллельные миры и глубинные законы космоса».

[Вернуться](#)

217

Я рекомендую «Вечность. В поисках окончательной теории времени» Шона Кэрролла.

[Вернуться](#)