

Chad Orzel  
**Breakfast  
with Einstein**  
*The Exotic Physics  
of Everyday Objects*

ЧАД ОРЦЕЛЬ

.....  
**ЗАВТРАК  
С ЭЙНШТЕЙНОМ**  
Экзотическая физика  
повседневных предметов

УДК 793.8  
ББК 77.056я92  
070

Chad Orzel. *Breakfast with Einstein.*  
*The Exotic Physics of Everyday Objects*

© 2018 by Chad Orzel  
Published by arrangement with BenBella Books, Inc.,  
and Folio Literary Management, LLC.

Серия «Физика – это интересно»

**Орцель, Чад**  
070 **Завтрак с Эйнштейном: Экзотическая физика повседневных предметов.**  
/ Пер. с англ. А.С. Дмитриева. – М.: Этерна, 2020. – 272 с.: ил. – (Физика – это интересно!)

ISBN 978-5-480-00402-1

Великолепная книга, погружающая нас в невероятный мир квантовой физики. Автор показывает, что «физика – везде, в каждой вещи, и никто не может объяснить физику лучше, чем Чад Орцель». Обыкновенный мир вокруг нас полон странных и загадочных явлений, и это объясняет физика. Орцель искусно выявляет и делает понятным самые сложные ее законы.

Эта книга обязательна для чтения каждому, кто хочет объяснить себе принципы работы окружающего нас мира.

УДК 793.8  
ББК 77.056я92

© 2018 by Chad Orzel  
© А.С. Дмитриев, перевод, 2020  
© ООО «Издательство «Этерна»,  
издание на русском языке, 2020

ISBN 978-5-480-00402-1 (Россия)  
ISBN 978-1-946-88535-7 (США)

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Введение</b> .....	<b>9</b>
<b>Глава 1 Восход: Фундаментальные взаимодействия</b> .....	<b>14</b>
<i>Гравитация</i> .....	<b>15</b>
<i>Электромагнитная сила</i> .....	<b>19</b>
<i>Сильное ядерное взаимодействие</i> .....	<b>23</b>
<i>Слабое ядерное взаимодействие</i> .....	<b>27</b>
<i>Продолжение истории</i> .....	<b>31</b>
<b>Глава 2 Нагревательный элемент: Отчаянный трюк Планка</b> .....	<b>33</b>
<i>Световые волны и цвета</i> .....	<b>34</b>
<i>Тепло и энергия</i> .....	<b>40</b>
<i>Ультрафиолетовая катастрофа</i> .....	<b>43</b>
<i>Квантовая гипотеза</i> .....	<b>49</b>
<b>Глава 3 Цифровые фотографии: Эвристика клерка из патентного бюро</b> .....	<b>53</b>
<i>Эксперимент Герца</i> .....	<b>54</b>
<i>Эвристика клерка из патентного бюро</i> .....	<b>57</b>
<i>Фотоэлектрические технологии</i> .....	<b>63</b>
<b>Глава 4 Будильник: Атом игрока в футбол</b> .....	<b>67</b>
<i>Краткая история отсчета времени</i> .....	<b>67</b>
<i>Тайна спектральных линий</i> .....	<b>70</b>
<i>Самая невероятная вещь внутри атома</i> .....	<b>74</b>
<i>Войдите в квантовый мир</i> .....	<b>77</b>
<i>Атомные часы</i> .....	<b>84</b>
<b>Глава 5 Интернет: Решение проблемы</b> .....	<b>88</b>
<i>Мировая паутина до Интернета</i> .....	<b>89</b>
<i>Как атомы испускают свет</i> .....	<b>93</b>
<i>Что Эйнштейн узнал о свете</i> .....	<b>96</b>
<i>История лазера</i> .....	<b>100</b>
<i>«Решение, которое ищет проблемы»</i> .....	<b>106</b>
<i>Сеть из света</i> .....	<b>109</b>

<b>Глава 6</b>	<b>Чувство обоняния: Исключительно химия</b>	<b>111</b>
	<i>Как работает обоняние</i>	112
	<i>Периодическая таблица</i>	115
	<i>От «старой квантовой теории» к современной квантовой механике</i>	120
	<i>Химия как запрет</i>	124
	<i>Спин</i>	127
	<i>От орбит до волн пилотов к вероятности</i>	131
	<i>Современная химия</i>	136
<b>Глава 7</b>	<b>Твердые предметы: Энергия неопределенности</b>	<b>138</b>
	<i>Определенность неопределенности</i>	140
	<i>Нулевая энергия</i>	144
	<i>Принцип неопределенности</i>	146
	<i>Стабильность атомов</i>	151
	<i>Принцип запрета Паули и твердая материя</i>	153
	<i>Применение в астрофизике</i>	160
<b>Глава 8</b>	<b>Компьютерные чипы: Интернет создан для котов Шрёдингера</b>	<b>163</b>
	<i>Кошачий парадокс</i>	164
	<i>Химические связи и состояния кота</i>	168
	<i>Больше означает иначе</i>	170
	<i>От спектральных линий к энергетическим полюсам спектра</i>	173
	<i>Почему существуют провалы между полосами спектра?</i>	177
	<i>Изоляторы и проводники</i>	180
	<i>Полупроводники и их использование</i>	184
<b>Глава 9</b>	<b>Магниты – как, черт возьми, они работают?</b>	<b>193</b>
	<i>Направляющий магнетизм</i>	195
	<i>Магнитные электроны</i>	199
	<i>Магнитные атомы</i>	202
	<i>Магнитные кристаллы</i>	208
	<i>Магнитное хранилище информации</i>	211

<b>Глава 10</b>	<b>Детектор дыма: Побег мистера Гамова</b>	<b>214</b>
	<i>Классическая физика детекторов дыма</i>	214
	<i>Загадки радиоактивности</i>	216
	<i>Квантовое туннелирование</i>	222
	<i>Солнечный свет и расцепленные атомы</i>	228
<b>Глава 11</b>	<b>Шифрование: Окончательная блистательная ошибка</b>	<b>232</b>
	<i>Секрет как сохранить секреты</i>	233
	<i>Играя в кости со Вселенной</i>	236
	<i>Квантовая физика и закон заголовков Беттериджа</i>	239
	<i>От Эйнштейна к Беллу и затем к Аспе</i>	243
	<i>Квантовая криптография</i>	249
	<i>Блистательная ошибка</i>	252
	<b>Заключение</b>	<b>254</b>
	<b>Благодарности</b>	<b>256</b>
	<b>Именной указатель</b>	<b>257</b>
	<b>Об авторе</b>	<b>271</b>

*Дэвиду, моему любимому Маленькому Чувачку.*

*Из всех маленьких чувачков, что я знаю, ты самый любимый.*

## ВВЕДЕНИЕ

*Солнце встает незадолго до того, как мой будильник начинает пищать, и я выбираюсь из постели, чтобы начать свой день. В коридоре еще темно, когда я выхожу из спальни, только сигнальный огонек на детекторе дыма отбрасывает слабый свет на стену. Дальше, на кухне я наливаю воду для чая, проверяя, светится ли нагревательный элемент, чтобы убедиться, что я спросонок опять не поставил чайник не на ту конфорку. Я открываю холодильник, чтобы начать завтрак, стараясь при этом быть аккуратным и не сдвинуть множество предметов искусства, прикрепленных к двери холодильника магнитиками. Я засовываю пару кусков хлеба в тостер, встряхиваю его, если хлеб немного прилипает к стенке, и опираюсь на стойку, поджидая.*

*Мой чай еще слишком горячий, чтобы пить, но я ощущаю его аромат, включаю компьютер, чтобы посмотреть, что происходит в мире. Мои социальные медиа полны обычных мелочей: утренние новости из Европы и Африки, вечерние истории из Азии и Австралии, цифровые фотографии детей и котиков от друзей со всего мира. Моя почта, в основном, приходит от студентов, которым нужно помочь с домашними заданиями, плюс пара чеков и уведомлений о покупках через Интернет.*

*После чая с тостом я хватаю собачий поводок, и мы направляемся на нашу утреннюю прогулку. Когда мы возвращаемся, будет самое время будить детей и готовиться к школе. Когда они сядут в автобус, я сам направляюсь в школу, чтобы учить еще одну группу студентов физике, которая их окружает.*

**Когда** я говорю людям, что я физик, то часто сталкиваюсь с вопросами о разных необычных явлениях, о ярких и блестящих примерах, которые возникли из десятилетних споров о квантовой теории. Люди спрашивают о знаменитом коте Шрёдингера<sup>1</sup>, живом и мертвом в одно и то же время, или о квантовой спутанности<sup>2</sup>, которую Эйнштейн высмеял как «жуткое действие на расстоянии», или о том, действительно ли Бог играет в кости со Вселенной. Эти темы захватывают воображение как людей, не принадлежащих науке, так и профессиональных физиков, потому что они сбивают нас с толку, как же «работает» мир.

Пока физики и популяризаторы были весьма успешны, продвигая некоторые из этих абстрактных и странных на вид идей в массовую культуру, и в какой-то мере мы все – жертвы этого успеха. Большинство людей слышали об этих странных и захватывающих явлениях и думают о них как о вещах, которые возможны только в дорогих, немало миллионов долларов, экспериментах, как Большой адронный коллайдер, или в экстремальных астрофизических условиях, например, около горизонта черной дыры.

Дело в том, что, с одной стороны, сама природа этих явлений плохо поддается здравому смыслу, с другой – приходится прибегать к метафорическому языку при обсуждении этих тем в нематематической терминологии. Оба этих фактора заставляют людей верить, что квантовая физика не имеет никакого отношения к повседневной жизни.

Может показаться удивительным, но описание обычного утра в начале книги было бы невозможным без «экзотической» квантовой физики. Время, которое показывают наши будильники, может быть отслежено вплоть до энергетических состояний атомов, они существуют благодаря волновой природе электронов. Полупроводниковые микросхемы, лежащие в основе компьютеров, которые мы используем, чтобы послать друг другу забавные мемы с котами, не будут понятны без квантовых суперпозиций, подобных несчастному полумертвому

---

<sup>1</sup> Ш р ё д и н г е р, Эрвин Рудольф Йозеф Александр (1887–1961) – австрийский физик-теоретик, один из создателей квантовой физики. Лауреат Нобелевской премии (1933). Ученый описал мысленный эксперимент с котом в 1935 г., согласно которому, когда мы не наблюдаем за системой, ядро атома (следовательно, и кот) находится в двух состояниях одновременно. – *Прим. ред.*

<sup>2</sup> Встречаются три термина, примерно в равных количествах: спутанный, запутанный и связанный (о взаимодействии этого типа). – *Прим. пер.*

коту Шрёдингера. Ни химия ароматов, ни даже стабильность твердой материи, что не дает нашим завтракам падать со стола, не могут быть объяснены без странных статистических свойств квантовых спинов.

При ближайшем рассмотрении оказывается, что весь наш повседневный мир находится под глубоким влиянием «экзотических» и «абстрактных» явлений квантовой физики. Даже самые обыденные действия, из каких состоят наши утренние привычки, в своей основе квантовые, если проанализировать их немного поглубже.

На первый взгляд это может показаться сомнительным, но если подумать, все верно. В конце концов, физики населяют тот же повседневный мир, что и остальные люди. В то время как в изощренных физических экспериментах используются лазеры и ускорители частиц для исследования того уровня мироздания, что находится далеко за пределами нашего повседневного опыта, даже наиболее сложные эксперименты и наблюдения должны начинаться и заканчиваться прямо здесь, в обычной реальности. Мудреные аппараты, применяемые в этих экспериментах, имеют самое прозаическое происхождение: инструменты и технологии, которые используются даже для самых скрытых аспектов физики, были сконструированы специально на протяжении многих лет, по слабым догадкам в погоне за еще более странными явлениями. Эти догадки ведут нас к экзотическому и абстрактному, и начинались они с намеков и загадок в поведении обычных объектов. Если бы квантовая физика не влияла на наш повседневный макроскопический мир, никогда бы не возникла необходимость обнаружить ее.

История этого открытия начинается с наблюдений и технологий, очень знакомых практически каждому, кто когда-либо готовил завтрак. Самая первая квантовая теория, которая ввела слово «квантовый» в физику, была изобретена Максом Планком<sup>1</sup>, чтобы объяснить красное свечение горячих предметов, таких как нагревательный элемент в электропечи или тостере. Квантовые идеи были впервые применены к материальным объектам в модели атома водорода, раз-

---

<sup>1</sup> П л а н к, Макс Карл Эрнст (1858–1947) – немецкий физик-теоретик, основоположник квантовой физики. Лауреат Нобелевской премии (1918). – *Прим. пер.*

работанной Нильсом Бором<sup>1</sup>; и вы можете видеть физику в действии каждый раз, когда используете флуоресцирующий свет.

История квантовой физики считается также и историей ученых, которые делают довольно смелые шаги и удачные догадки. Планк и Бор ввели свои квантовые модели в отчаянной попытке объяснить явления, какие просто не могла объяснить классическая физика.

Луи де Бройль<sup>2</sup> предположил, что электроны могут вести себя как волны, потому что математически это выглядело элегантно, и волновая природа материи оказалась существенной для понимания и управления движением электрических потоков, обеспечивая огромный диапазон современных технологий. Вольфганг Паули<sup>3</sup> объяснил концептуальные основы химии одним махом, когда ввел принцип запрета. «Принцип запрета» Паули также оказался решающим для понимания проблем, которые он даже и не рассматривал, таких как физика магнитов для холодильников или почему твердые предметы не обрушиваются внутрь самих себя.

Альберт Эйнштейн был ключевым игроком на всей этой поляне – его имя стоит на обложках книг не только для того, чтобы книги продавались. Мы в основном ассоциируем имя Эйнштейна с его теорией относительности – другую (и не менее восхищающую) ветвь современной физики. Если он и упоминается в связи с квантовой теорией, то обычно лишь для того, чтобы процитировать презрительные по содержанию замечания о теории последних в конце его жизни.

В действительности же Эйнштейн играл ведущую роль в развитии квантовой физики. В 1905 году, в тот же год, когда он «запустил» теорию относительности, ученый также подхватил и расширил квантовую модель Планка для объяснения фотоэлектрического эффекта. Это существенно важно для работы цифровых камер, которые мы так широко используем сейчас для фотографирования. Десятилетием

позже он разработал взаимодействие между светом и атомами таким образом, что это заложило основу для изобретения лазеров – основы современных телекоммуникаций. Даже после того, как Эйнштейн отошел от основного направления квантовой физики, он сделал ценный вклад – ввел идею спутанности атомов, именно она лежит в самом сердце множества предложений для следующего поколения квантовых технологий, включая невзламываемые шифры и компьютеры с беспрецедентными вычислительными мощностями.

Моя цель – продемонстрировать в этой книге квантовую составляющую повседневной реальности, глубоко проникнув в утреннюю рутину, описанную ранее. В следующих главах я покажу, как обычная каждодневная жизнь зависит от некоторых крайне странных явлений из когда-либо обнаруженных. По мере того как я буду объяснять, как квантовые эффекты связаны с нашей обычной жизнью, я также поделюсь рассказом о некоторых подсказках, которым физики следовали, чтобы открыть эти эффекты.

Мое намерение – не стащить квантовую физику с высот до ничем не выделяющегося обычного ежедневного завтрака. Скорее я надеюсь «приподнять» нашу обычную жизнь, найти удивительное и захватывающее в самых простых, привычных нам действиях. Квантовая физика – один из величайших интеллектуальных триумфов человеческой цивилизации, она расширяет сознание и будоражит воображение новыми идеями. Она вокруг нас каждый день, если мы только будем знать куда смотреть.

---

<sup>1</sup> Б о р, Нильс Хенрик Дэвид (1885–1962) – датский физик-теоретик, общественный деятель. Лауреат Нобелевской премии (1922). Известен как создатель первой квантовой теории атома. – *Прим. пер.*

<sup>2</sup> Б р о й л ь, Луи де (1892–1987) – французский физик-теоретик, один из основоположников квантовой физики. Лауреат Нобелевской премии (1929). – *Прим. пер.*

<sup>3</sup> П а у л и, Вольфганг Эрнст (1900–1958) – швейцарский физик-теоретик, работал в области физики элементарных частиц и квантовой механики. Лауреат Нобелевской премии (1945). – *Прим. пер.*

## ВОСХОД: ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

*Солнце встает незадолго до того, как мой будильник начинает пищать, и я выбираюсь из постели, чтобы начать свой день...*

Может показаться странным, что книга по квантовой физике обычных предметов начинается с разговора о солнце. В конце концов, Солнце – это огромная сфера горячей плазмы, чуть больше чем в миллион раз размера Земли, плавающая в космосе в ста пятидесяти миллионах километров отсюда.

Это не совсем обычный предмет в том смысле, как, скажем, будильник, который вы можете взять и швырнуть через всю комнату, когда он будит вас слишком рано.

С другой стороны, в некотором роде Солнце – наиболее важный повседневный предмет, даже если не принимать во внимание наблюдение, что день не может начаться, пока солнце не встанет. Без его света жизнь на Земле была бы абсолютно невозможной: растения, которые служат нам пищей и дают кислород, не будут расти, океаны замерзнут и так далее. Мы зависим от солнечного света и тепла всю жизнь. В этой книге Солнце будет полезным средством, чтобы познакомиться с ключевыми игроками квантовой физики: двенадцатью фундаментальными частицами, что составляют обычную материю, и четырьмя типами фундаментальных взаимодействий между ними.

Двенадцать фундаментальных частиц, которые не могут быть далее разделены на еще более мелкие части, распределяются на два «семей-

ства» – в каждом по шесть частиц. Семья кварков<sup>1</sup> состоит из верхнего, нижнего, странного, очарованного, истинного и прелестного кварков, а семья лептонов – из частиц: электрона, мюона и тау-лептона, вместе с электронным нейтрино, мюонным нейтрино и тау-нейтрино. Четыре фундаментальных взаимодействия – это гравитационное, электромагнитное, сильное и слабое взаимодействия<sup>2</sup>. Вы часто можете найти эти частицы и взаимодействия пронумерованными на цветных таблицах, которые висят в физических классах и которые в целом получили, к сожалению, общее название «Стандартной модели физики»<sup>3</sup>. Стандартная модель охватывает все, что мы знаем о квантовой физике (а также о способности физиков изобретать прилипчивые названия), и считается одним из величайших интеллектуальных достижений человеческой цивилизации. Солнце оказывается прекрасным введением в Стандартную модель, потому что все четыре фундаментальных взаимодействия играют роль в том, чтобы Солнце светило.

Итак, мы начинаем наш рассказ с Солнца, захватывающее путешествие по его внутренним механизмам, чтобы проиллюстрировать те важные физические процессы, что дают энергию всему. Мы пройдем через все фундаментальные взаимодействия по очереди, начиная с наиболее понятной и очевидной из этих сил – гравитации.

### Гравитация

Если бы вам надо было составить «рейтинг силы» фундаментальных взаимодействий Стандартной модели в стиле спортивного радиокomentатора, три из четырех сил претендовали бы на первое место.

<sup>1</sup> *Up* – верхний, *down* – нижний, *strange* – странный, *charm* – очарованный, *top* – истинный, *bottom* – прелестный (англ.). – Прим. пер.

<sup>2</sup> При описаниях стандартных терминов, например, названий частиц или взаимодействий, приводятся устоявшиеся в российской научной литературе термины и определения, если это не искажает смысл, вложенный автором. Так, «электромагнетизм» переводится как электромагнитное взаимодействие, а «слабое ядерное взаимодействие» – просто как «слабое». – Прим. пер.

<sup>3</sup> Для более полного и понятного обзора физических процессов в рамках Стандартной модели я рекомендую книгу: *Robert Oester. The Theory of Almost Everything*, 2006 год; а историческое развитие детально описано в работе: *Frank Close. The Infinity Puzzle*, 2013. – Прим. авт.

Если все-таки надо сделать выбор, я бы, вероятно, отдал это почетное право гравитации, поскольку в конечном счете она ответственна за существование звезд и, таким образом, за большинство атомов, составляющих наши тела и все вокруг нас, давая возможность вести глупые разговоры о «ранжировании» фундаментальных сил.

В нашей повседневной жизни гравитация наиболее знакома и неизбежна из всех фундаментальных взаимодействий. Именно с гравитацией вы боретесь, когда выбираетесь из кровати утром, и это она не дает мне возможность играть в баскетбол (ну, ладно, и еще то, что я не совсем в форме...). Мы проводим большую часть жизни, чувствуя притяжение гравитации, и как восхищает и леденит душу, когда в парке развлечений мы падаем, ее временное отсутствие.

Это близкое знакомство также делает гравитацию одной из наиболее изученных сил в истории науки. Люди думали, как и почему предметы падают на землю, по меньшей мере, с тех пор, как начали вестись записи людей, изучающих устройство мира вообще. Популярная легенда прослеживает происхождение физики от момента, когда упало яблоко на молодого Исаака Ньютона (в некоторых версиях, буквально), что дало толчок созданию теории гравитации. Однако, в противовес этой апокрифической истории, ученые и философы были уже достаточно хорошо знакомы с гравитацией и посвятили значительную часть своих размышлений принципам ее работы. Ко времени, когда жил Ньютон, эксперименты Галилео Галилея, Симона Стевина<sup>1</sup> и других уже подошли к некоторым количественным оценкам по исследуемой теме, было установлено, что все предметы, независимо от их веса, падают на землю с одинаковым ускорением.

Будучи уже пожилым человеком, Ньютон сам пересказывал версию о своем «яблочном» открытии молодым коллегам, но никакого упоминания об этом событии нет в материалах более раннего времени, когда это якобы произошло (в то время, когда он работал над теорией гравитации). В тот период он провел длительное время на своей семейной ферме в Линкольншире, поскольку университеты были закрыты из-за вспышки чумы. Хотя в этой истории есть зерно истины, но она уводит в сторону от сути ньютоновского прозрения. Озарение Ньютона касалось не самого существования гравитации,

<sup>1</sup> С т е в и н, Симон (1548–1620) – фламандский математик, механик, инженер. – Прим. ред.

а широты охвата этой силы. Он понял, что сила, которая притягивает яблоко к земле, та же самая, что держит Луну на орбите вращения вокруг Земли и Землю на орбите вокруг Солнца. В «Математических началах натуральной философии» Ньютон предложил универсальный закон для гравитации, дав математическую форму силам притяжения между двумя объектами во Вселенной, обладающими массами. Эта форма, в сочетании с законами движения, позволила физикам объяснить эллиптическую форму планетных орбит в Солнечной системе, постоянное ускорение предметов, падающих на землю и ряд других явлений. Это дало основу для физики как математической науки, основу, которая развивалась вплоть до сегодняшнего дня.

Важнейшей характеристикой Ньютоновского закона тяготения считается то, что сила между массами зависит в обратной степени от расстояния между ними, возведенного в квадрат, то есть, если вдвое уменьшить расстояние между двумя предметами, вы получите силу в четыре раза больше. Предметы, которые находятся ближе друг к другу, испытывают более сильную тягу, что объясняет, почему более близкие к Солнцу планеты вращаются по орбитам быстрее. Это также означает, что предметы беспорядочной кучи будут приближаться друг к другу и по мере сближения спрессовываться все более плотно за счет усиливающейся силы тяготения.

Эта возрастающая сила очень важна для существования Солнца и является конечным источником солнечного света. Солнце – не твердый объект, а скорее обширное скопление горячего газа, которое сохраняется лишь за счет взаимного гравитационного притяжения всех его отдельных атомов. В то время как гравитация возглавляет наш список в терминах повседневного воздействия, ее можно назвать самым слабым фундаментальным взаимодействием по сравнению с остальными, причем уму непостижимо, во сколько раз: гравитационная сила между протоном и электроном составляет всего лишь 0.00000000000000000000000000000000000000000000001 часть электромагнитной силы, которая держит их вместе в пределах атома. Невероятное количество материи находится в солнце, порядка 2,000,000,000,000,000,000,000,000,000 килограммов. Она создает гигантскую совместную гравитационную силу, притягивая все, что находится поблизости.

Звезда, подобная Солнцу, начинает жизнь как небольшое облако с чуть более высокой плотностью межзвездного газа (по большей части водорода) и пыли. Лишняя масса в этой области притягивает к себе больше газа, увеличивая тем самым ее размер, и это создает большое гравитационное притяжение, чтобы, в свою очередь, притянуть еще больше газа. И по мере того как новый газ попадает в область растущей звезды, он начинает разогреваться.

На микроскопическом уровне один атом, притягивающийся к протозвезде<sup>1</sup>, разгоняется во время падения внутрь нее точно так же, как кусок скалы, падающий на землю. Вы можете теоретически описать поведение газа в терминах скорости и направления каждого индивидуального атома, но это до смешного непрактично даже для предметов гораздо более мелких, чем шар газа размером с Солнце, не только из-за количества атомов, но и потому что все атомы взаимодействуют друг с другом. Невзаимодействующий атом будет притянут к центру газового облака, разгоняясь по мере прохождения своего пути, затем он проскочит насквозь и выйдет с другой стороны, замедлится, остановится и повернет обратно, чтобы повторить этот процесс. Реальные атомы, однако, не следуют таким гладким путем: в дороге они ударяются о другие атомы. После столкновения атомы перенаправляются по другим маршрутам, и некоторая часть энергии, набранная падающим атомом в ходе его ускорения за счет гравитации, передается тому атому, с которым он столкнулся. Для большого скопления взаимодействующих атомов в этом случае будет гораздо разумнее описать это облако в терминах коллективного свойства атомов, известного как температура.

Температура – это мера средней кинетической энергии материала как результата случайного движения его составных частей. Для газа это обычно функция скорости атомов, движущихся беспорядочно по зигзагообразным отрезкам<sup>2</sup>. Отдельный атом притягивается внутрь и ускоряется, набирая энергию от гравитационной силы и увеличивая

<sup>1</sup> Звезда на завершающей стадии своего формирования, вплоть до момента загорания термоядерных реакций в ядре, после которого она становится звездой главной последовательности. – *Прим. ред.*

<sup>2</sup> Чтобы дать представление о масштабах, атом водорода при комнатной температуре движется примерно со скоростью 600 метров в секунду (около двух скоростей звука), в то время как у поверхности Солнца его скорость составляет 3000 метров в секунду. – *Прим. авт.*

общую энергию газа. Когда он сталкивается с другими атомами, эта энергия перераспределяется, повышая температуру. Общая энергия не увеличивается, но после множества столкновений мы имеем уже не единичный быстро движущийся атом, проходящий сквозь более медленные, а увеличение на небольшую величину средней скорости каждого атома из этого скопления.

Увеличивающаяся скорость атомов в облаке газа стремится вытолкнуть их наружу, поскольку более быстро движущийся атом может пройти большее расстояние от центра, прежде чем гравитация развернет его и втянет назад. Перераспределение энергии от новых атомов, однако, означает, что это увеличение недостаточно для того, чтобы остановить общий коллапс, и по мере того как новые атомы втягиваются внутрь, масса протозвезды увеличивается, увеличивая гравитационную силу. Это, в свою очередь, притягивает все больше газа, принося еще больше энергии и большую массу и так далее. Облако продолжает наращивать как температуру, так и массу, становясь все плотнее и плотнее и все жарче и жарче. Если не вмешиваться в ее работу, сила гравитации сожмет все до бесконечно малой точки, формируя не звезду, а черную дыру. Хотя они и потрясающие объекты, сворачивающие пространство и время и бросающие, наверное, самый дерзкий вызов большинству наших фундаментальных теорий физики, окружение около черной дыры – не очень гостеприимное место, чтобы проводить там ежедневный утренний завтрак. К счастью, другие фундаментальные взаимодействия тоже играют свои роли, останавливая коллапс звезды и формируя то солнце, которое мы знаем и любим. И тут появляется следующая сила, вторая из наиболее нам знакомых – электромагнитное взаимодействие.

## Электромагнитная сила

Мы постоянно встречаем электромагнитные взаимодействия в повседневной жизни, как в форме статического электричества, потрескивающего в стопке носков, что недавно из сушилки, или в виде магнитиков, которые держат школьные рисунки на холодильнике. В отличие от гравитации, которая всегда притягивает, электромагнитная сила может быть как притягивающей, так и отталкивающей: электрические заряды бывают положительной и отрицательной разновидности, и у

магнитов есть как южный, так и северный полюса. Электромагнитное взаимодействие еще более всепроникающе, чем статические заряды и магниты, но в реальности оно ответственно за нашу способность видеть, можно сказать, вообще всё.

В ранние 1800-е годы электромагнетизм был горячо обсуждаемой темой в физике вместе со многими явлениями, включая электрические токи и магниты, которые изучались тогда впервые. Среди тех, кто изучал электромагнетизм, был британский физик Майкл Фарадей. Он открыл множество технических новшеств, какие играют ключевые роли в наших утренних действиях, включая его работу по сжиженным газам, их применяют в охлаждающих приборах. Также он разработал «клетку Фарадея»<sup>1</sup> (среди многих других приборов), она помогает не выпускать наружу электромагнитные поля внутри микроволновой печи. Несомненно, наиболее важное его открытие заключалось в том, что не только электрические токи могут воздействовать на расположенные неподалеку магниты, но и движущиеся магниты и изменяющиеся магнитные поля могут создавать ток. Это положило основу огромному спектру систем коммерческого производства в современной жизни. Он был одним из первых, кто понял поведение зарядов и магнитов с точки зрения электрических и магнитных полей, заполняющих пустое пространство и определяющих движение удаленных частиц.

Фарадей – знаковая фигура в физике, один из троих, на кого был похож Эйнштейн в своих работах (двое других – это Ньютон и Джеймс Клерк Максвелл<sup>2</sup>). Увы, Эйнштейн был выходцем из «низов» и, хотя был великим экспериментатором с глубокой проницательностью в области физики, ему не хватало математической подготовки, необходимой для перевода его догадок в такие формы, какие убедили бы физиков его времени всерьез принять концепцию электромагнитного «поля». Джеймсу Клерку Максвеллу, происходившему из зажиточного шотландского семейства, выпало создать твердую базу для электрических и магнитных полей. В 1860-е годы Максвелл показал, что все известные электрические и магнитные явления могут быть объяснены простым набором математических отношений, говоря со-

<sup>1</sup> Устройство, изобретенное М. Фарадеем в 1936 г., для экранирования аппаратуры от внешних электромагнитных полей. – *Прим. ред.*

<sup>2</sup> Максвелл, Джеймс Клерк (1831–1879) – шотландский физик, математик и механик. – *Прим. ред.*

временным языком, четырьмя «уравнениями Максвелла»<sup>1</sup>, достаточно компактных, чтобы уместиться на футболке или кофейной чашке. Электрические и магнитные поля Фарадея – это реальные вещи, связанные между собой. Изменяющееся электрическое поле создает магнитное поле, и наоборот. Уравнения Максвелла охватывают все известные электрические и магнитные явления, а также предсказали новое, объединенное, электромагнитное поле. Если колеблющееся электрическое поле правильным образом скомбинировать с колеблющимся магнитным полем, они будут поддерживать друг друга, проходя через пространство. Изменяющееся электрическое поле будет вызывать изменения в магнитном, и наоборот. Эти электромагнитные волны путешествуют со скоростью света, и уже было известно, что свет ведет себя как волна.

Уравнения Максвелла были быстро восприняты как объяснение природы света, а именно, что это в основе своей электромагнитное явление. Электромагнетизм объясняет взаимодействие света, материи и, как мы увидим в следующих главах, природу взаимодействия между материальными объектами и электромагнитными полями. Это подготовило почву для множества открытий, которые и основали квантовую механику.

Электромагнитные силы также во многом ответственны за работу тех объектов, с которыми мы сталкиваемся каждый день. Обычная материя сделана из атомов, они, в свою очередь, состоят из более мелких частиц, отличающихся своим электрическим зарядом: положительно заряженных протонов, отрицательно заряженных электронов и имеющих нейтральный электрический заряд нейтронов. Атом состоит из положительно заряженного ядра, содержащего протоны и нейтроны, и окружено облаком электронов, притянутых электромагнитным влиянием ядра.

Как уже упоминалось, электромагнитное взаимодействие гораздо более сильное, чем гравитация. Этот факт прекрасно иллюстрируется трюком, который можно показывать на вечеринках: если потереть резиновый шарик о свои волосы и потом прикрепить к потолку. Во время трения очень маленькая часть атомов в шарике будет захва-

<sup>1</sup> Система уравнений, описывавших электромагнитное поле и его связь с электрическими зарядами и токами в вакууме и сплошных средах. – *Прим. ред.*

тывать электроны из атомов ваших волос, придавая ему небольшой отрицательный заряд<sup>1</sup>. Притяжение между этим маленьким зарядом и атомами потолка достаточно сильное, чтобы удерживать шарик на потолке, преодолевая гравитационную тягу всей Земли, которая в миллиарды миллиардов раз больше его массы.

Сила электромагнетизма – незаменимый фактор в работе Солнца. Электромагнитные взаимодействия отвечают за столкновения между атомами, которые превращают энергию, почерпнутую из гравитации, в жар. По мере роста температуры газа, падающего на растущую звезду, она становится достаточно горячей – около 100 000 кельвинов или почти 180 000 градусов по Фаренгейту<sup>2</sup>, чтобы отделить электроны в атомах водорода от протонов в ядре, производя газ с электрически заряженными частицами – плазму. Гравитация продолжает спрессовывать плазму, но взаимное отталкивание между положительно заряженными протонами разделяет их, сопротивляясь тяге гравитации. По мере того как формирующаяся звезда втягивает все больше газа, температура возрастает до все более высоких уровней.

Несмотря на огромную разницу между электромагнетизмом и гравитацией, плазма, однако, не может полностью избежать гравитации, поскольку электроны, которые были частью облака газа, все еще в ней. Они движутся слишком быстро, чтобы быть захваченными протонами и создать атомы, но они продолжают сохранять звезду в целом электрически нейтральной. Если бы в ней были только протоны, взаимное отталкивание такого огромного скопления положительно заряженных частиц разорвало бы звезду на части в один миг. Благодаря нейтрализующему действию электронов, каждый отдельный протон ощущает силу только нескольких ближайших соседей, в то время как гравитационная тяга, спрессовывающая звезду, исходит от массы всех частиц до единой. Чем больше газа добавляется, тем сильнее и сильнее становится гравитационная сила, и в конце концов она превосходит электромагнитную силу.

<sup>1</sup> Ваши волосы остаются, соответственно, с положительным зарядом, поэтому этот трюк заставит тонкие волосы встать дыбом. Теперь уже позитивно заряженные волосы отталкиваются друг друга и пытаются отдалиться друг от друга, насколько это возможно. – *Прим. авт.*

<sup>2</sup> Один кельвин равен одному градусу Цельсия, но шкала Кельвина не имеет отрицательных чисел и начинается от абсолютного нуля (температуры, при которой молекулярная активность минимальна). Вода замерзает при 0 градусов по Цельсию, что около 273 градусов Кельвина. – *Прим. авт.*

Электромагнитные взаимодействия могут замедлить сжатие горячей плазмы, коллапсирующей под действием гравитации, но один электромагнетизм не может остановить коллапс и создать стабильную звезду. Чтобы создать стабильное солнце, какое мы знаем, требуется невероятный выброс энергии, ведущей к еще большим температурам, которые приводят нас к следующему игроку в нашей истории – сильному ядерному взаимодействию.

## Сильное ядерное взаимодействие

Третье фундаментальное взаимодействие мы непосредственно наблюдаем в повседневной жизни, поскольку эта сила действует на невероятно малых расстояниях, проявляя себя на дистанциях, сравнимых с размерами атомного ядра, около 0.000000000001 мм, или примерно одна десятиллиардная толщины человеческого волоса. Мы обязательно обнаружили бы отсутствие этой силы, поскольку она ответственна примерно за 99% массы всего, с чем мы имеем дело.

Понимание сильного ядерного взаимодействия требует от нас признания того, что две частицы, из которых состоит обычная материя, протоны и нейтроны, на самом деле собраны из «кварков» – частиц с электрическим зарядом, равным малой доле заряда электрона. Протон сделан из двух «верхних» кварков (каждый с положительным зарядом в две трети от заряда электрона) и одним «нижним» кварком (отрицательный заряд в одну треть от заряда электрона), в то время как нейтрон состоит из одного верхнего и двух нижних кварков. Эти кварки держатся вместе за счет сильного ядерного взаимодействия, похоже, как электромагнитные силы удерживают электроны в атомах. И если «электрический заряд» ассоциируется с электромагнетизмом, то сильное ядерное взаимодействие – с цветом: красный, синий и голубой. Частица, состоящая из трех кварков, такая как протон, будет иметь по одному кварку каждого цвета, что делает ее «бесцветной» (или «белой<sup>1</sup>») подобно тому, как атом, содержащий равное число протонов и электронов, электрически нейтрален.

<sup>1</sup> В российской традиции применяются оба термина, «бесцветная» и «белая» частица – частица с нулевым цветным зарядом. – *Прим. пер.*

Композитная природа протонов и нейтронов и природа сильных взаимодействий между кварками помогает объяснить одну из загадочных характеристик материи, а именно, как ядро, составляющее сложный атом, держится вместе, не распадаясь. Атомы углерода, например, имеют шесть протонов в своих ядрах, каждый с положительным зарядом. Как мы знаем из электромагнетизма, эти положительные заряды отталкивают друг друга, создавая огромную силу, которая стремится разорвать ядро на части. Поэтому в школе дети часто задают вопрос, почему ядро не разваливается на части?

Ответ лежит в сильном ядерном взаимодействии. В реальности оно примерно в 100 раз сильнее, чем электромагнетизм, более чем достаточно мощное для того, чтобы удерживать протоны вместе внутри атома. Поскольку взаимодействие происходит между отдельными кварками, эта сила проявляется, только когда частицы достаточно близко друг к другу. Точно так же два нейтральных атома не будут взаимодействовать, пока они далеко друг от друга, но станут «ощущать» притягивающую силу, которая собирает их в молекулу, когда они придвинутся достаточно близко. Бесцветные протоны, разделенные на расстояние больше, чем несколько их радиусов, не взаимодействуют друг с другом через сильное ядерное взаимодействие. Результат похож на то, как электроны защищены экраном из протонов, что позволяет гравитации не давать плазме разорвать звезду на части, как мы упоминали ранее: присутствие других цветов экранирует сильное взаимодействие между отдельными кварками, оставляя только электромагнитное отталкивание.

Однако на достаточно близком расстоянии отдельные кварки в соседних частицах притягиваются друг к другу, это и держит протоны (и нейтроны) вместе внутри ядра, так и внутри Солнца сильное взаимодействие вступает в игру. При обычных температурах электромагнетизм держит протоны слишком далеко друг от друга для того, чтобы проявилось сильное взаимодействие, но по мере того как формирующаяся звезда плазма внутри становится все жарче и жарче и протоны движутся все быстрее и быстрее<sup>1</sup>, они начинают приближаться друг к другу все ближе. При температурах и плотности материи внутри ядра будущей звезды небольшая часть этих протонов подойдет друг

<sup>1</sup> Электроны также движутся быстрее, но на таких высоких скоростях, что прирост скорости не дает сильной разницы. Их единственная роль в плазме внутри звезды – обеспечить «размазанный» фон отрицательного заряда, сохраняя всю звезду электрически нейтральной. – Прим. авт.

к другу достаточно близко, чтобы сильное взаимодействие проявило себя и соединило их вместе. Этот процесс превращает водород (простейший атом с ядром, содержащим один протон) в гелий (ядро с двумя протонами и двумя нейтронами). Одновременно освобождается невероятное количество энергии.

Откуда же эта энергия? «Из самого известного в мире уравнения,  $E = mc^2$ , то есть часть массы начального водорода превращается в энергию: энергия, исходящая из Солнца, включает превращение четырех миллионов тонн массы в энергию каждую секунду. Но ответ может отчасти ввести в заблуждение, поскольку общее число частиц не изменилось – четыре ядра водорода содержат двенадцать верхних и нижних кварков, точно так же, как и ядро гелия, поэтому не вполне очевидно, откуда происходит недостающая масса. Объяснение требует более глубокого взгляда внутрь протона и природу сильного взаимодействия.

Физики ядерных частиц знали о существовании кварков с 1960-х годов, и свойства верхних и нижних кварков хорошо известны. Если вы будете искать слово «кварк» в *Google*, вы найдете всевозможные варианты информации об этих частицах, включая массы верхнего и нижнего кварка – 2.3 и 4.8 единиц, которыми физики обычно измеряют подобные штуки<sup>1</sup>. Однако это удивительно, поскольку масса протона в тех же единицах равна 938, что примерно в 100 раз больше, чем масса частиц, из которых он состоит.

Откуда же происходит масса протона? Ответ, конечно, в формуле  $E = mc^2$ . Кварки внутри протона связаны друг с другом сильным ядерным взаимодействием, и это взаимодействие включает в себя огромное количество энергии. Для наблюдателя снаружи, эта энергия взаимодействия выступает как масса. Что-то около 99% массы протона, таким образом, выступает не в форме материальных частиц, а в виде энергии от сильного взаимодействия, удерживающего протон как единое целое.

<sup>1</sup> Единицы измерения основаны на энергии, содержащейся согласно уравнению  $E = mc^2$ : масса верхнего кварка в  $2/3 \text{ MeV}/c^2$  показывает, что превращение верхнего кварка в энергию высвободит 2.3 миллиона электронвольт энергии (в обычных условиях это происходит, когда верхний кварк аннигилирует со своей противоположностью из мира антиматерии, высвобождая два фотона, каждый с 2.3 MeV энергией). Если посмотреть с другой стороны, требуется 2.3 MeV энергии соударения для создания верхнего кварка в ускорителе частиц (или, с более практической точки зрения, 4.6 MeV для создания кварка и антикварка как пары). – Прим. авт.

Такой же процесс имеет место внутри атома, так как протоны и нейтроны связаны мощной силой. Масса ядра атома – не просто сумма масс составляющих его протонов и нейтронов, но она также включает вклад от энергии сильного взаимодействия, связывающей их вместе.

Точное количество массы, которую привносит сильное взаимодействие, однако зависит от деталей конкретного атома и от того, как он внутри соединен. Для очень легких атомов, типа водорода или гелия, оказывается более эффективным иметь большее ядро – количество энергии, требуемой для удержания вместе двух протонов и двух нейтронов, несколько меньше, чем необходимо для четырех отдельных протонов. Когда четыре протона сливаются, чтобы создать гелий<sup>1</sup>, тогда они уже не требуют часть энергии, какую они имели первоначально, и эта энергия высвобождается в виде тепла. Энергия, высвобожденная в ходе реакции, очень мала – бейсбольный мячик добрался бы до конца площадки примерно, за месяц, но количество водорода, подвергающегося слиянию, в недрах Солнца ошеломляюще огромно –  $10^{38}$  (единица с 38 нулями) таких реакций происходит каждую секунду (с поправкой в ту или другую сторону).

Если резюмировать сказанное: по мере формирования такой звезды, как Солнце, гравитация и электромагнетизм начинают процесс разогрева газа по мере его падения к центру. Когда температура поднимается достаточно высоко для того, чтобы несколько атомов водорода начали сливаться в атом гелия, энергия, выделяющаяся при этом, быстро поднимает температуру, что, в свою очередь, увеличивает количество слияний. Постепенно достигается равновесие между гравитацией, которая тянет внутрь, и давлением наружу, производимым этим теплом. Соответственно, звезда остается стабильной до тех пор, пока в ядре есть водород, чтобы «гореть».

Жизнь звезды длительностью в несколько миллиардов лет, таким образом, определяется гравитацией, электромагнетизмом и сильным взаимодействием. Гравитация стягивает газ вместе, электромагне-

<sup>1</sup> Если вы детально рассмотрите процесс слияния атомов водорода, он окажется довольно сложным, с множеством возможных промежуточных путей, включающих взаимодействие с дополнительными частицами и временным формированием нестабильных элементов. Если же рисовать картину крупными мазками, единственное, что имеет значение – это разница в энергиях между начальным состоянием (четыре свободных протона) и конечным состоянием (ядро гелия). – *Прим. авт.*

тизм сопротивляется схлопыванию (коллапсу) и увеличивает температуру. Когда температура достаточно высока, так что электромагнетизм уже не может удерживать протоны вместе, сильное ядерное взаимодействие освобождает огромное количество энергии по мере слияния водорода и превращения его в гелий. Соревнование между этими тремя силами создает стабильную звезду, излучая свет и тепло, которые поддерживают жизнь на нашей планете.

Может показаться, что мы рассказали всю историю с помощью только трех из четырех фундаментальных взаимодействий, пренебрегая, к сожалению, слабым ядерным взаимодействием (оно уже было названо худшим наименованием из всех). В реальности же слабое взаимодействие также играет свою роль в снабжении Солнца энергией – вклад меньший, чем у других, но не менее существенный.

### Слабое ядерное взаимодействие

Слабое ядерное взаимодействие занимает необычное место в Стандартной модели, будучи, возможно, менее очевидным из фундаментальных взаимодействий и при этом одним из наиболее понятных. Математическая теория слабого взаимодействия и ее тесная связь с электромагнетизмом была разработана в 1960-е и начале 1970-х годов, а кульминацией экспериментального подтверждения этой теории стало открытие «бозона Хиггса» в 2012 году, ставшее одним из величайших триумфов Стандартной модели. Сильное ядерное взаимодействие в то же время продолжает создавать проблемы для теоретиков, вычисляющих свойства материи, и одновременно гравитация печально известна своей математической несовместимостью с остальными тремя взаимодействиями<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Наша лучшая теория гравитации – общая теория относительности, она описывает влияние гравитации в терминах искривления пространства и времени, которые гладкие и протяженные. Другие три силы описываются квантовыми теориями, которые включают отдельные частицы и неожиданные случайные отклонения. Математические техники, применяемые к одной теории, не так-то легко применить к другим, и проблема найти способ сочетать их, чтобы создать квантовую теорию гравитации, доводит физиков-теоретиков до иступления в течение десятилетий. К счастью для нас, ситуации, где вам нужна сразу и квантовая физика, и общая теория относительности, очень редки – недалеко от центра черной дыры или во времена начала Вселенной, то есть это не то, что вы видите во время своего утреннего моциона. – *Прим. авт.*

При всем при этом, однако, очень трудно указать точно, что же делает слабое взаимодействие. Что делает слабое взаимодействие особенно трудным для объяснения неспециалистам в физике по сравнению с другими силами, так это то, что она не выступает в виде силы, которую можно ощутить в обычном смысле. Тяга гравитации является центральным элементом нашего повседневного опыта, и электромагнитные силы между зарядами и магнитами тоже являются чем-то, что можно почувствовать. И хотя сильное взаимодействие проявляет себя на очень удаленной шкале, все же довольно легко понять силу, удерживающую ядро против электромагнитного отталкивания.

А вот слабое взаимодействие не используется, чтобы что-то удерживать вместе или отталкивать друг от друга. Вот почему большинство физиков отбросили приятный и неточный термин «фундаментальные силы» в пользу «фундаментальных взаимодействий». Вместо того чтобы тянуть или толкать частицы, слабое ядерное взаимодействие выполняет важную функцию по обеспечению превращений частиц: если быть более точным, она превращает частицы из семейства кварков в частицы из семейства лептонов. Это позволяет нижнему кварку (отрицательно заряжен) превращаться в верхний кварк (имеет положительный заряд), излучив электрон и третью частицу, известную как нейтрино. Или верхний кварк может превратиться в нижний, поглотив электрон и испустив антинейтрино. Эти превращения позволяют нейтронам превращаться в протоны, и наоборот.

Процесс, имеющий место в Солнце, включает в себя как раз последний вариант и становится обратной стороной явления, более известного как «бета-распад», когда нейтрон в ядре атома испускает электрон и превращается в протон. Бета-распад был известен с самого начала исследований радиоактивности, но его объяснение было раздражающим вызовом на заре квантовой теории, приводя к ярким анекдотам физики XX века.

Проблема с бета-распадом заключается в том, что электроны, испускаемые распадающимся ядром, возникают с широким спектром энергий (до крайне высоких значений). Такое не должно было быть возможным для реакции, включавшей лишь две частицы – законы сохранения энергии и сохранения импульса указывают, что возможно лишь одно значение энергии для отделяющегося электрона (как в случае с процессом «альфа-распада», где тяжелое ядро распадается,

испуская ядро гелия: два протона и два нейтрона, скрепленных вместе). Объяснение широкого спектра значений энергии, получаемых при бета-распаде, долгое время загоняло в угол физиков и довело некоторых до предложения радикальных мер – отказа от идеи сохранения энергии как фундаментального физического принципа.

Решение было найдено молодым австрийским физиком Вольфгангом Паули. В 1930 году он предположил (в письме, посланном на конференцию, которую он пропустил из-за бала в Цюрихе), что в бета-распаде участвуют не две, а три частицы, – нейтрон, превращающийся в протон, электрон и третья, неуловимая частица с очень малой массой. Новой частице быстренько подобрали название – «нейтрино» (похоже на «маленькая и нейтральная» по-итальянски). Она уносит часть энергии, точное количество которой зависит от точного импульса электрона и нейтрино, когда они покидают ядро.

Введение нейтрино сначала показалось не менее отчаянным шагом, чем отказ от закона сохранения энергии. Паули сам писал другу: «Я сделал нечто ужасное. Я ввел частицу, которую невозможно поймать. Это нечто такое, что теоретик никогда не должен делать». В течение нескольких лет великий итальянский физик Энрико Ферми развил общее предположение Паули в полную и исключительно успешную математическую теорию бета-распада, после чего эта идея была быстро принята. Нейтрино Паули оказалось одним из трех (изначально было предложено нейтрино, мюон и тау-нейтрино), и, несмотря на все начальные сложности, в итоге оказалось возможным его обнаружить, что и было подтверждено Клайдом Коуэном<sup>1</sup> и Фредериком Райнесом<sup>2</sup> в 1956 году<sup>3</sup>.

Какое все это имеет отношение к Солнцу? Ответ достаточно деликатен, но мы уже намекали на это несколько раз по ходу обсуждения раньше. Солнце подпитывается энергией от слияния ядер водорода,

<sup>1</sup> К о у э н, Клайд Лоррейн (1919–1974) – американский физик-теоретик, со-первооткрыватель нейтрино вместе с Фредериком Райнесом. – *Прим. ред.*

<sup>2</sup> Р а й н е с, Фредерик (1918–1998) – американский физик, профессор. Лауреат Нобелевской премии (1995). – *Прим. ред.*

<sup>3</sup> Райнес разделил Нобелевскую премию по физике с Коуэном, который умер в 1974 г., а эта премия не присуждается посмертно. Две других Нобелевских премии были даны за работы с детекторами нейтрино Реймонду Дейвису-младшему и Масатоси Косибе в 2002 г., а также Такааки Кадзите и Артуру Б. Макдональду в 2015-м. – *Прим. ред.*

которые представляют единичные протоны, в ядра гелия, состоящие из двух протонов и двух нейтронов. Где-то в ходе этого процесса два протона должны обратиться в нейтроны, что делается возможным благодаря слабому ядерному взаимодействию и процессу «обратного бета-распада», упомянутого ранее: протон превращается в нейтрон, испуская при этом нейтрино<sup>1</sup>. В результате Солнце производит невероятное количество нейтрино, которые были обнаружены на Земле, и их измерения дают информацию как о ядерных реакциях в ядре Солнца, так и о свойствах самих нейтрино.

Превращение протонов в нейтроны внутри звезд является существенно важным для существования огромного количества элементов, с которыми мы имеем дело в повседневной жизни – кислород в воздухе, которым мы дышим, и вода, которую мы пьем, углерод в пище, которую мы едим, кремний в земле под нами. Когда очень тяжелая звезда выжигает большую часть водорода в своем ядре, она начинает реакцию слияния гелия в еще более тяжелые элементы. Когда гелия остается мало, очень тяжелые звезды начинают выжигать углерод и так далее по всей Периодической таблице элементов. На каждой стадии этого процесса энергия сильного взаимодействия, высвобождающаяся за счет слияния, уменьшается<sup>2</sup>, пока кремний не будет превращаться в железо. Ядерная реакция слияния кремния в железо уже не дает никакой энергии, производство тепла, поддерживающего ядро

<sup>1</sup> В ходе этого процесса протон также должен либо испустить позитрон (эквивалент электрона в области антиматерии), либо поглотить один из огромного количества электронов, оставшихся от изначального газа, присутствующего в Солнце. Любой из излученных позитронов будет быстро аннигилировать с одним из упомянутых электронов, так что конечный результат для внешнего наблюдателя будет следующим: один протон и один электрон исчезли, оставив один нейтрон и одно нейтрино вместо себя. – *Прим. авт.*

<sup>2</sup> То, что энергии при ядерном слиянии становится все меньше при переходе к более тяжелым элементам, может быть понято в терминах энергии сильного взаимодействия, выступающей в форме массы: энергия требуется для того, чтобы держать двенадцать кварков вместе в ядре гелия, оно существенно меньше чем та, что нужна для четырех отдельных, не связанных между собой протонов. Но по мере увеличения количества частиц прирост энергии уменьшается. Это немного похоже на организационную эффективность группы людей: два человека, которые совместно пользуются помещением, платят за него дешевле, чем один, но добавление соседей по комнате экономит деньги лишь до определенного момента. Расходы на обустройство шестого соседа по комнате могут превысить экономию на квартплате. Таким же образом, энергия, полученная за счет добавления новых частиц к большому ядру, недостаточно велика. – *Прим. авт.*

звезды, останавливается. В этой точке процесса внешние слои звезды обрушиваются внутрь, чтобы произвести взрыв суперновой звезды, высвобождая так много энергии, что взрывающаяся звезда зачастую на некоторое время становится самой яркой в своей галактике.

В суперновой звезде большинство массы вырывается с огромной скоростью наружу в виде расширяющегося облака газа, унося с собой более тяжелые элементы, произведенные в ядре во время поздних стадий слияния. Эти облака газа расширяются, охлаждаются и взаимодействуют с окружающим газом, создавая сырье для следующих поколений звезд, а также скалистых планет, похожих на Землю, которые в основном сделаны из тяжелых элементов, созданных в ядре умирающей звезды.

Невероятное разнообразие веществ, которое мы видим на Земле – скалы и минералы, воздух, – всё построено из пепла мертвых звезд и создано с помощью всех четырех фундаментальных взаимодействий. Начиная с простых облаков водорода, сформировавшихся вскоре после Большого Взрыва, гравитация стягивает газ вместе, электромагнетизм сопротивляется коллапсу и нагревает газ, сильное ядерное взаимодействие освобождает огромное количество энергии в ядерном слиянии, и, наконец, слабое ядерное взаимодействие обеспечивает трансформацию частиц, превращает водород в более тяжелые и интересные элементы. Уберите хотя бы одно из этих фундаментальных взаимодействий, и наше повседневное существование станет невозможным.

## Продолжение истории

Описанное выше ни в коем случае нельзя считать полной историей фундаментальной физики. Четыре фундаментальных взаимодействия, которые питают Солнце энергией, единственные, которые мы знаем, но Стандартная модель включает четыре типа кварков помимо семейств верхних и нижних, которые составляют протоны и нейтроны, а также четыре дополнительных лептона, кроме электрона и электронного нейтрино. Частицы в Стандартной модели также имеют эквиваленты из антиматерии – частицы с такой же массой, но противоположным зарядом. Когда частица встречает своего двойника из антиматерии, они взаимно уничтожаются (аннигилируют), превращая их массу в высокоэнергетические фотоны света.

Существование всех этих частиц было экспериментально подтверждено, и их свойства изучены очень детально. Однако ни одна из этих дополнительных частиц не «живет» слишком долго. Самая длительная по времени существования частица – наверное, мюон со средней продолжительностью жизни около двух миллионных секунды, поэтому их влияние на повседневное бытие весьма минимально. Они создаются на скоротечный миг в высокоэнергетическом слиянии между более обычными частицами как в земных физических экспериментах, так и в астрофизических событиях. Они очень быстро распадаются на верхний и нижний кварки (обычно в форме протонов и нейтронов), электроны и нейтрино. История их открытия и развитие Стандартной модели восхитительна, но она лежит за пределами нашей книги.

В целях исследования физики повседневных предметов мы можем ограничить себя всего тремя, наиболее знакомыми, материальными частицами: протонами, нейтронами и электронами. Они комбинируются для создания атомов, которые, в свою очередь, создают все, с чем мы взаимодействуем в ходе нашего обычного дня. В терминах фундаментальных взаимодействий типичная утренняя рутина в основном связана с электромагнетизмом, он ответственен за удержание атомов и молекул между собой и объединяет материю и свет.

Стоит помнить, что все четыре взаимодействия, действуя среди кварков и лептонов, требуются для работы нашего самого существенного ежедневного товарища – Солнца.

## НАГРЕВАТЕЛЬНЫЙ ЭЛЕМЕНТ: ОТЧАЯННЫЙ ТРЮК ПЛАНКА

*На кухне я наливаю воду для чая, проверяя, светится ли нагревательный элемент, чтобы убедиться, что я спросонок опять не поставил чайник не на ту конфорку...*

Красное свечение горячего предмета – один из простейших и наиболее универсальных явлений в физике. Если вы возьмете кусочек любого материала, достаточно горячего, то он начнет светиться сначала красным цветом, потом желтым, потом белым. Цвет зависит только от температуры предмета. Неважно, что за материал был взят – стержень чистого стекла или чугуна, нагретый до той же температуры он будет светиться абсолютно тем же цветом. Метод нагревания также не важен, пропускаете ли вы электрический ток через виток металла, как в моей электрической печке, или помещаете этот виток в раскаленный уголь, цвет горячего металла будет одинаковым при определенной температуре.

Такое простое и универсальное поведение действовало на физиков как валерьянка на котов, потому что оно предполагало, что в основе этого явления должен быть простой и всеобщий принцип. В поздние 1500-е годы Галилео Галилей и Симон Стевин эмпирически продемонстрировали, что различные материалы и гири падают с одинаковым ускорением: Стевин бросал два свинцовых шара, один в десять раз тяжелее, чем другой, с церковной колокольни<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Эти опыты можно делать, только если оба предмета достаточно плотные, чтобы пренебречь силой сопротивления воздуха. Если вы будете бросать вниз скрепку для бумаги и перо, скрепка будет падать быстро, в то время как перо будет опускаться на землю медленно. Сила гравитации, действующая на них, одинакова, в вакууме они достигли бы земли одновременно, как это было театрально продемонстрировано командиром Дэйвом Скоттом во время миссии «Аполлона-15» на Луну. – Прим. авт.

Это наблюдение позволило Исааку Ньютону разработать закон всеобщего тяготения в 1600-х годах. Через несколько сотен лет еще одно направление, основанное на том же принципе, вдохновило Альберта Эйнштейна на создание общей теории относительности, которая до сих пор остается нашей лучшей теорией гравитации.

Эйнштейн вспоминал ключевой момент в развитии своей теории – в 1907 год, когда его озарило понимание, что человек, падающий с крыши, будет чувствовать невесомость во время падения. Появилась связь между ускорением и гравитацией, что и является основой общей относительности. Эйнштейн говорил об этом как о «самой счастливой мысли всей своей жизни». Математическая проработка последствия этой счастливой мысли заняла почти восемь лет, но ученый создал одну из величайших и наиболее успешных теорий современной физики.

Универсальное поведение теплового излучения в таком случае представляется похожим на многообещающий источник озарения: на этом явлении хорошо тестировать идеи о распределении энергии в горячих объектах и способах взаимодействия света и материи. К несчастью, в конце 1800-х годов усилия физиков предсказать цвет света, испускаемого горячими предметами при различных температурах, потерпели неудачу.

В конце концов объяснение температурного излучения потребовало радикального разрыва с существующей физикой. Начальная точка для всей квантовой теории, чье применение физики все еще обсуждают по прошествии столетия, обнаруживается в красном свечении нагревательных элементов, которые мы используем для приготовления завтрака.

В практическом смысле все экзотические явления, связанные с квантовой физикой – дуальная волновая природа частиц, кот Шрёдингера, «спутанная связь» на расстоянии, могут быть продемонстрировано прямо на вашей кухне.

## Световые волны и цвета

Как часто случается, самый простой способ объяснить необходимость в радикально новой теории – это демонстрация провала прежней теории. До того, как мы поймем, как квантовая модель решила

проблему теплового излучения, мы должны увидеть, почему этого *не смогла* сделать классическая физика. Для этого, несомненно, нужно разобраться в основах того, что классическая физика говорит о свете, тепле и материи.

Первой, очень важной, концепцией, лежащей в основе экспериментов, которые привели к разрушению классической физики, считается идея, что свет – это волна. Волновая природа света была известна за полвека до уравнений Максвелла, по большей части благодаря экспериментам, выполненным около 1800 года английским эрудитом Томасом Юнгом<sup>1</sup>. Физики спорили, представлять свет лучше всего как поток частиц или как волну в какой-то субстанции, но Юнг убедительно продемонстрировал волновую природу своим гениально простым экспериментом со светом «на двух щелях»: свет проходил через две узкие щели, прорезанные в экране. Юнг обнаружил, что свет, который проникал через две близко расположенные прорезы в экране, с другой стороны не превращался в две яркие полосы, как можно было бы ожидать (как в случае со светом, проходившим через одну прорезанную щель). Вместо этого на экране появлялся ряд светлых и темных точек<sup>2</sup>.

Эти пятна возникают в ходе процесса, известного как «интерференция», который происходит тогда, когда складываются волны из двух различных источников. Если две волны приходят в конкретную точку пространства «в фазе», так что пики (гребни, максимумы) одной волны совпадают с гребнями другой волны, они складываются и образуют волну с более высоким гребнем, чем каждая по отдельности. С другой стороны, если волны приходят «не в фазе», например, гребень одной волны и впадина другой, они взаимно вычитаются, и гребень одной волны заполнит долину другой, в результате волны не будет совсем. Это работает для любых источников волн, например, так бывает при возникновении сложных паттернов (картинок) от волн в

<sup>1</sup> Юнг, Томас (1773–1829) – английский ученый широкого профиля: физик, механик, врач, астроном, филолог, востоковед. – *Прим. ред.*

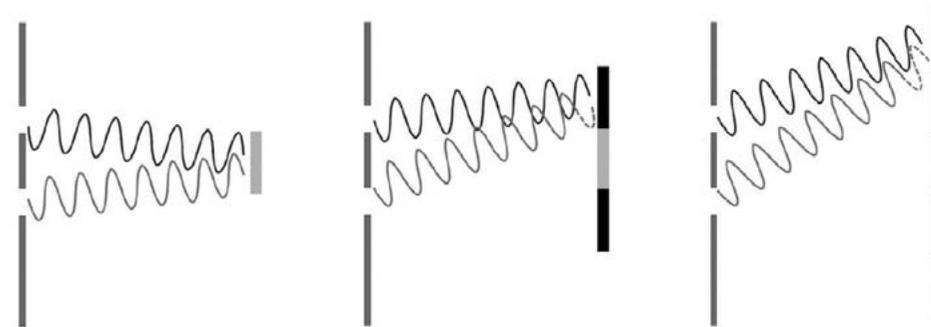
<sup>2</sup> Если вы хотите увидеть это сами, то должны сделать две тонкие прорезы на кусочке алюминиевой фольги и осветить их с помощью лазерной указки. Другое явление, также очень тесно связанное с этим опытом, еще проще увидеть: если вы поставите прядь волос на пути лазерной указки, световые волны обогнут отдельные волосинки с разных сторон, сложатся и создадут образ (паттерн) из множества пятен. – *Прим. авт.*

прудях развлекательных парков. Тот же процесс интерференции используется для уничтожения волн и подавления «шума» в наушниках.

Интерференция в эксперименте Юнга получается потому, что волнам света от каждой щели нужно различное количество времени, чтобы дойти до определенной точки на экране. В точке ровно по центру между двумя щелями обе волны идут одно и то же расстояние и таким образом приходят в фазе, образуя яркое пятно. В точке несколько слева от центра волны от щели с левой стороны проходят более короткий путь до экрана, чем волны от щели с правой стороны. Это дополнительное расстояние означает, что волны от правой щели чуть дольше колебались и пики право-щелевых волн совпадают с долинами лево-щелевых, образуя темное пятно. Еще чуть дальше, и дополнительное расстояние позволяет волнам закончить колебание до полного цикла, накладывая пики волн от правой и левой щели друг на друга и создавая следующее яркое пятно.

Этот паттерн повторяется много раз, создавая ряд светлых и темных пятен. Расстояние между светлыми пятнами имеет простую зависимость от длины волны, обеспечивая удобный способ измерять длину волны видимого света. В современных единицах она варьируется от 400 нанометров для фиолетового цвета до примерно 700 нанометров<sup>1</sup> для глубоко красного цвета. Добавление дополнительных щелей будет делать яркие точки уже и более отчетливыми. К 1820-м годам Йозеф фон Фраунгофер<sup>2</sup> использовал «дифракционные решетки», основанные на интерференции света, для того, чтобы сделать первые достаточно точные измерения длин волн света, испускаемого Солнцем и другими звездами.

Эксперимент Юнга, опубликованный в 1807 году, вызвал сенсацию в кругах физиков, но многие ученые неохотно расставались с теорией света как частиц (корпускулярной теорией света). Когда французский физик Огюстен Жан Френель представил статью по волновой теории для конкурса по физике, один из несогласных, Симеон Дени Пуассон<sup>3</sup>, указал, что интерференция волн, которую используют для объяснения эксперимента Юнга, должна предсказывать, что в центре



*Интерференция световых волн в двухщелевом эксперименте. На полпути между щелями волны проходят в фазе и объединяются, образуя яркое пятно. Немного выше центра, волны от нижней щели проходят большее расстояние, и таким образом происходит дополнительное полуколебание (пунктирная линия), так что пики от нижней волны заполняют поля сверху, производя темное пятно. На еще большем расстоянии волны от нижней щели завершают полное дополнительное колебание (пунктирная линия), и волны снова находятся в фазе, создавая еще одно яркое пятно.*

тени от круглого предмета должно появляться светлое пятно. Такое светлое пятно в центре тени казалось совершенно абсурдной идеей, и Пуассон, таким образом, забраковал волновую модель света.

Франсуа Араго<sup>1</sup>, один из судей на конкурсе, был заинтригован идеей Пуассона и начал тщательный экспериментальный поиск светлых пятен в центре теней. Наблюдение светлого пятна требовало особенной тщательности, но Араго был вполне готов к такой задаче и окончательно показал, что свет, проходя вокруг округлого предмета, действительно может интерферировать и создавать светлое пятно в центре тени. Это «пятно Араго», или «пятно Френеля»<sup>2</sup>, было окончательным доказательством, чтобы убедить большинство физиков, что свет в действительности является волной.

<sup>1</sup> Один нанометр равен  $10^{-9}$  метра, или 0.000000001 м. – Прим. авт.

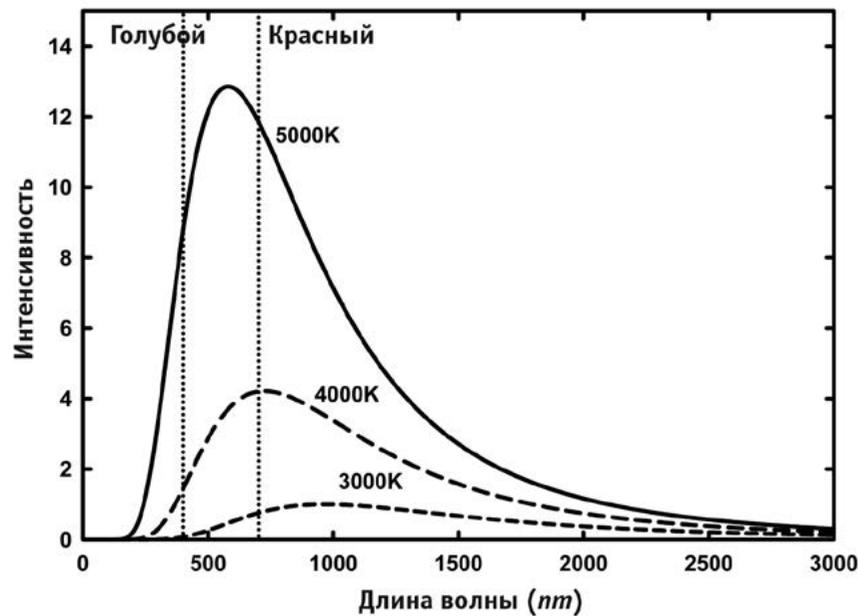
<sup>2</sup> Ф р а у н г о ф е р, Йозеф фон (1787–1826) – немецкий физик-оптик. – Прим. ред.

<sup>3</sup> П у а с с о н, Симеон Дени (1781–1840) – французский математик, механик, физик. – Прим. ред.

<sup>1</sup> А р а г о, Доминик Франсуа Жан (1786–1853) – французский физик, астроном и политический деятель. – Прим. ред.

<sup>2</sup> В русской традиции называется также «пятно Араго-Пуассона». – Прим. пер.

Эксперимент Араго обеспечил успех волновой теории, но все-таки это оставалось загадкой до 1860-х годов, когда уравнения Максвелла объяснили свет как электромагнитную волну. В последние десятилетия 1800-х волновая теория была надежно обоснована, и физики стремились объяснить все взаимодействия между светом и материей в терминах электромагнитных волн.



Спектр теплового излучения для различных температур. Вертикальные линии обозначают ограничения по видимому спектру, показывая, как максимум движется от инфракрасного в видимый диапазон с повышением температуры.

При изучении волн есть два свойства, которые мы можем легко измерить: длина волны и ее частота. Длина волны есть расстояние между максимумами (гребнями) волн, если смотреть на моментальный снимок всего паттерна на каком-то участке. Частота — это время прохождения гребней, отмеченное в какой-то одной точке, через которую проходят волны. Поскольку свет распространяется с постоянной скоростью, частота и длина волны тесно связаны: волна перемещается

вперед на одну длину волны за одно колебание. Более короткие волны повторяются чаще за один и тот же период, поэтому они имеют более высокую частоту. Физики могут обсуждать свет в двух режимах, переключаясь то в один, то в другой, — либо в терминах частоты, либо в терминах длины волны, в зависимости от того, что будет наиболее удобным для решения конкретной задачи на данный момент. Мы тоже переключимся парочку раз на протяжении этой главы.

Определение «цвета» света, испускаемого горячим предметом, — вопрос измерения его спектра: интенсивности света, излучаемого на каждой частоте в широком диапазоне. Когда мы измерим этот спектр для света при определенной температуре, то обнаружим простую характерную форму, распределение меньшего количества света на более низких частотах, возрастание до максимума и затем резкое падение на высокочастотном конце. «Цвет» света определяется положением этого максимума — точной частотой, на которой излучение максимально, и зависит только от температуры, все вот так просто. По мере возрастания температуры частота, на которой количество излучаемого света достигает максимума, становится выше. При комнатной температуре пик интенсивности излучения находится далеко в инфракрасном диапазоне спектра, передвигаясь к красному отрезку видимого спектра, когда температура возрастает до «раскаленно-красной», и дальше к синему отрезку при дальнейшем повышении температуры.

Предмет, нагретый добела, имеет максимум спектра излучения, это будет соответствовать зеленому цвету<sup>1</sup>, но он излучает достаточно много света по всему видимому диапазону спектра и таким образом свет кажется белым.<sup>2</sup> Если вы удвоите температуру (измеряя ее

<sup>1</sup> Соотношение длины волны или частоты света по отношению к цвету, который ощущает при этом человек, считается непростой задачей, в частности, поскольку приходится иметь дело со светом множества разных частот. Смешения цветов, которые дети изучают в начальной школе, — пример этого: смесь красного света (с длиной волны около 650 нм) и синего цвета (около 490 нм) будет производить такое же впечатление на глаза и мозг, как фиолетовый цвет (около 405 нм), даже если фиолетового света там нет. — Прим. авт.

<sup>2</sup> Автор обрисовывает лишь часть проблемы, поскольку восприятие цвета зависит также от механизмов работы мозга, которые еще более сложные. В частности, свет одной и той же длины волны может восприниматься как разный цвет при различных условиях, поскольку шкала соотношения длины волны и воспринимаемого цвета сознанием может существенно изменяться от настроек мозга, определяемых так называемым «нуль-цветом», который примерно равен средней длине волны по сумме всех световых волн, попадающих на рецепторы сетчатки. — Прим. пер.

по шкале Кельвина, которая начинается с абсолютного нуля), частота для максимума также удвоится.

Спектр света от Солнца весьма напоминает спектр от горячего объекта, соответствуя температуре около 5600 К, при максимуме на частоте около 600 ТГц. В действительности именно так началось измерение температуры Солнца и других звезд. На другом конце температурного ряда находится микроволновое фоновое излучение космоса, так называемое реликтовое излучение, оставшееся после Большого взрыва. Оно пронизывает Вселенную и имеет спектр, соответствующий предмету с температурой 2.7 К и максимумом излучения около 290 ГГц.

## Тепло и энергия

В течение XIX века параллельно с развитием теорий электромагнетизма и волновой модели света были сделаны существенные шаги в физике термодинамики. Точно так же, как в начале века шли споры о двух моделях света – волновой и корпускулярной, первые десятилетия 1800-х были свидетелями споров по двум конкурирующим моделям тепла. Одна школа рассматривала тепло как физический объект сам по себе – «тонкая жидкость», называемая «теплородом»<sup>1</sup>, которая перетекала от одного объекта к другому. Конкурирующая модель – «кинетическая теория» рассматривала тепло как возникающее из случайного движения микроскопических частиц, создающих макроскопическую материю.

В течение нескольких десятилетий эксперименты Бенджамин Томпсона<sup>2</sup> (также известного, как граф Румфорд) и Джеймс Джоуль<sup>3</sup> продемонстрировали связь между механической работой и выработкой тепла, что трудно было увязать с теорией теплорода. Томпсон показал, что трение при высверливании пушечного ствола может производить неисчерпаемое количество тепла, что было бы невозможным,

<sup>1</sup> В русской традиции вещество, передающее тепло, из истории физики называется термином «теплород». – *Прим. ред.*

<sup>2</sup> Т о м п с о н, Бенджамин (1783–1814) – англо-американский ученый, изобретатель, авантюрист, государственный и общественный деятель ряда стран. – *Прим. ред.*

<sup>3</sup> Д ж о у л ь, Джеймс Прескотт (1818–1889) – английский физик, внес значительный вклад в становление термодинамики. – *Прим. ред.*

если бы «теплород» был реальной жидкостью. Джоуль усилил эту связь, определив точное значение «механического эквивалента тепла», то есть сколько работы необходимо для повышения температуры определенного количества воды на один градус, если ее размешивать.

С более теоретическим подходом выступили в своих работах Рудольф Клаузиус<sup>1</sup> и Джеймс Клерк Максвелл<sup>2</sup>, связав математической зависимостью поток тепла между предметами с кинетической энергией атомов и молекул, из которых они состоят. Австрийский физик Людвиг Больцман, опираясь на работы Максвелла, разработал большую часть статистической модели тепловой энергии, которую мы используем сегодня.

Отдельные атомы и молекулы в газе или твердом теле беспорядочно колеблются или передвигаются с разными скоростями, но поскольку их очень много, мы можем применить статистические методы для точного предсказания вероятности нахождения атомов с определенной кинетической энергией в веществе при определенной температуре. (Получившаяся в результате формула известна как «Распределение Максвелла–Больцмана» в честь их инновационной работы.) Важнейшая часть кинетической модели – понятие «равно-распределения», введенное Максвеллом и уточненное Больцманом. Оно утверждает, что энергия распределяется одинаково среди всех типов движения, доступных частицам. Газ, состоящий из единственного атома, содержит всю свою кинетическую энергию в линейном движении этого атома, в то время как газ простых молекул будет содержать энергию, распределенную в равных долях между линейным движением молекул в целом, вибрацией атомов внутри молекул и вращением каждой молекулы вокруг ее центра масс.

Кинетическая теория и такой статистический подход успешно объяснял термические свойства многих материалов<sup>3</sup>, и в конце

<sup>1</sup> К л а у з и у с, Рудольф Юлиус Эммануил (1822–1888) – немецкий физик, механик, математик. – *Прим. ред.*

<sup>2</sup> Да, тот самый Максвелл, который работал над электромагнетизмом. Физики в Европе в 1800-х гг. составляли небольшое сообщество, а Максвелл был реально умным ученым. – *Прим. авт.*

<sup>3</sup> При высоких температурах, во всяком случае. При очень низких температурах и для некоторых очень твердых материалов кинетическая теория Максвелла–Больцмана перестает быть верной. Эти аномалии были еще одной подсказкой для физиков и сыграют роль в расцвете квантовой механики в начале 1900-х гг. – *Прим. авт.*

1800-х годов теория теплорода была окончательно отвергнута. Поскольку излучение света требует тепловой энергии и свет играет значительную роль в передаче тепла, именно поэтому повара покрывают некоторые блюда фольгой, чтобы загородить путь свету и уменьшить нагрев. Физики, естественно, начали исследовать связь между электромагнитными волнами и тепловой энергией. Эта задача требовала эмпирических данных, поэтому в 1800-х спектроскописты в Германии проводили эксперименты для измерения спектра света, излучаемого горячими предметами в широком диапазоне температур и длин волн. Экспериментальные результаты были высокого качества, но объяснение этих результатов в терминах кинетической модели физики никак не давалось.

В 1890 году две конкурирующие модели Вильгельма Вина<sup>1</sup> из Германии и Лорда Рэйли<sup>2</sup> из Британии дали возможность сделать практические предсказания количества света, излученного на данной длине волны при данной температуре. При этом формула была основана на общих принципах и экспериментальных данных из одного диапазона длин волн, и ученые надеялись покрыть ею и другие диапазоны. Предсказания Вина совпадали с данными на высоких частотах, но не работали для низких частот, в то время как выводы Рэйли были верны лишь для низких частот. В 1900 году Макс Планк нашел математическую функцию, объединявшую оба вывода и согласовавшуюся, наконец, с данными наблюдений. Планк вывел эту функцию после одной вечеринки, которую он устроил, где спектроскопист Генрих Рубенс рассказал ему о предсказаниях Рэйли и последних экспериментальных результатах. Когда гости ушли, Планк погрузился в свое исследование, и через некоторое время появился с точной формулой, что он и послал на открытке в тот же вечер. Но если формула Планка и была огромным успехом с практической точки зрения, никто не мог объяснить, почему она работает, по крайней мере, при использовании принятых фундаментальных принципов физики.

<sup>1</sup> В и н, Вильгельм Карл Вернер (1864–1928) – немецкий физик. Лауреат Нобелевской премии (1911) «за открытие в области законов, управляющих тепловым излучением». – *Прим. ред.*

<sup>2</sup> С т р е т, Джон Уильям, более известный как Лорд Рэйли (1841–1919) – британский физик и механик, открывший (с У. Рамзаем) газ аргон и получивший за это Нобелевскую премию (1904). – *Прим. ред.*

## Ультрафиолетовая катастрофа

Итак, как должна выглядеть модель, основанная на этих принципах? Общий подход наиболее ярко иллюстрируется методом, принятым британскими физиками Лордом Рэйли и Джеймсом Джинсом, который в действительности был проделан чуть позже успешной квантовой модели Планка. Модель Рэйли–Джинса оказалась неверной, но выявила причины этого провала и показала, что решение может быть построено в рамках базовой терминологии.

Идея Рэйли–Джинса для решения проблемы теплового излучения очень проста и опирается на понятие равномерности, использованное Максвеллом и Больцманом<sup>1</sup> при описании термических свойств газов: вы просто берете энергию, полученную от нагревания, и делите ее в равных долях между всеми возможными частотами света. Принцип «распределить ее поровну» требует, однако, конечного набора возможных частот, а это означает, что физики должны иметь упрощенную теоретическую модель, чтобы разбить на части непрерывный спектр света.

Трюк, позволяющий сосчитать частоты, следует из универсальности наблюдаемого излучения: мы помним, что спектр света от горячего предмета не зависит от каких-либо его материальных свойств. Теоретическая модель должна была принять это во внимание, это привело физиков к тому, чтобы рассмотреть свет, испускаемый идеальным «черным телом»<sup>2</sup>, то есть объектом, который поглощает любой свет, падающий на него, и не отражает ничего. Это не означает, что «черное тело» действительно черного цвета и не излучает света. Если бы это было так, оно быстро бы нагрелось и распалось. Здесь важно понимать, как и со свечением нагревательного элемента, что излучаемый свет никоим образом не зависит от поглощаемого света.

Далее обнаружилось, что есть прекрасный практический способ создать такое черное тело в лаборатории: коробка с маленькой

<sup>1</sup> Б о л ь ц м а н, Людвиг (1844–1906) – австрийский физик-теоретик, основатель статистической механики и молекулярно-кинетической теории. – *Прим. ред.*

<sup>2</sup> Бессмертные слова рок-музыканта Найджела Тафнеля в его шуточном фильме «Это Позвоночник»:

– Ну, разве это может быть еще чернее?

– Нет. Чернее некуда. – *Прим. авт.*

дырочкой в ней. До тех пор, пока дырочка мала по сравнению с размерами коробки, входящему свету будет почти невозможно выйти обратно, вместо этого он будет отражаться много раз от стенок коробки внутри, до того момента, как найдет выход (если полностью не поглотится ранее). Это примерно и есть сущность «черноты» черного тела: падающий на него свет поглощается и не отражается независимо от частоты.

Физики, делающие измерения теплового излучения<sup>1</sup>, использовали именно такую технику для своих экспериментов. Модель коробки с маленькой дырочкой помогла физикам, поскольку волны внутри нее оказывались ограниченными по набору частот. Волны, которые хорошо совпадали с границами коробки, продолжали свой путь достаточно долго, а волны «неправильных» частот накладывались друг на друга и уничтожались. Свет все-таки сумел вырваться через дырочку, обладал ограниченным набором частот, какие были внутри, и не имели ничего общего с происходившим вне коробки<sup>2</sup>.

Как только физики научились выполнять этот трюк для определения ограниченного набора допущенных частот, появилась надежда, что они смогут подсчитать допущенные частоты внутри коробки и разделить всю доступную энергию между ними. При этом полученный в результате спектр будет напоминать то, что наблюдалось в экспериментах и описывалось формулой Планка. К сожалению, этот простой и прямой подход потерпел провал. Мы сможем понять, почему это произошло, если пройдем по процессу подсчета допустимых частот.

Допустимые частоты внутри коробки называются «моды стоячих волн» и определяются размером коробки и ограничением, что ни одна из волн не должна ее покидать (если дырочка в коробке достаточно мала, и часть света, покидающая коробку так невелика, что ее можно смело проигнорировать). Для наглядности, чтобы понять происхождение и характеристики этих мод стоячих волн, мы можем упростить еще больше, представив «коробку», у которой только одно измере-

<sup>1</sup> Известные немецкие экспериментаторы Отто Люммер и Фердинанд Курльбаум. – *Прим. авт.*

<sup>2</sup> Может показаться, что это присуще только конкретной «коробке», но если коробка очень велика по сравнению с длиной волн, попадающих внутрь, есть хорошо разработанные математические техники для выравнивания всего этого, чтобы получить ответ, который не зависит от размера конкретной коробки. – *Прим. авт.*

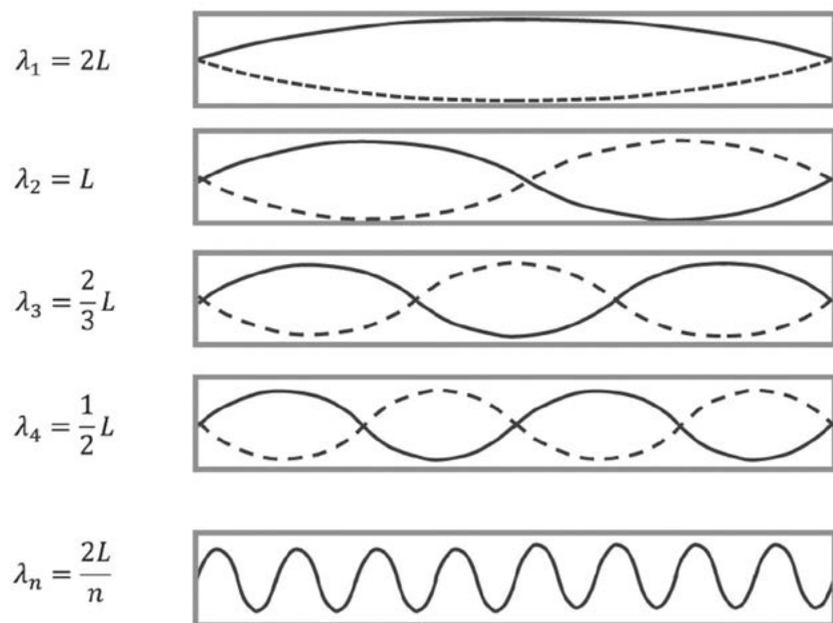
ние: волны могут путешествовать только вправо, влево и ни в каких других направлениях. Этому есть простой и часто встречающийся в повседневной жизни аналог – струна музыкального инструмента.

Гитарист извлекает звук, дергая за струну и создавая возмущение, которое распространяется в форме волны и колеблет струну вверх и вниз. Два конца струны зафиксированы, поэтому когда бегущая по ней волна достигает пальца гитариста, прижимающего струну к ладу, она отражается обратно, изменяя направление движения вниз по грифу. Не требуется много времени, пока волна, путешествующая в противоположном направлении, окажется на том же участке струны, где они интерферируют (накладываются) друг с другом, как свет от двух щелей в знаменитом эксперименте Юнга. Если вы сложите вместе все эти волны, то обнаружите, что большинство длин волн в результате полностью были уничтожены за счет интерференции. Каждая волна старается приподнять струну своим максимумом (пиком), а другая старается опустить ее своим минимумом (долиной), и они взаимно уничтожают друг друга. Для очень ограниченного набора длин волн, однако, возникает конструктивная интерференция: все возможные отраженные волны поднимаются своими гребнями точно в одном и том же месте. Эти длины создают стабильную картинку (паттерн) волн вдоль струны, где некоторые ее части слегка колеблются, а другие остаются на одном месте.

Наиболее простой из этих паттернов – «основная мода» с единственным колеблющимся узлом между зафиксированными концами. Мы обычно рисуем ее как выступающий горб, но в действительности он изменяется во времени: часть струны в середине то поднимается вверх, то падает вниз до плоского состояния, то опускается вниз, создавая отрицательный пик, затем обратно до нуля, вверх до максимума и так далее. Время, требующееся для выполнения одного колебания, определяется частотой, связанной с длиной рассматриваемой волны.

Длина волны определяется расстоянием, которое надо пройти от пика до долины и снова обратно на пик. Единичное «вверх-назад к нулю» движение составляет половину волны, так что длина волны, связанная с основной модой, – дважды длина струны. Следующим простейшим паттерном будет полная волна между зафиксированными концами, поднимающаяся вверх (или опускающаяся вниз) и затем назад вниз (или вверх) с зафиксированным «узлом» в центре, где

струна не движется; длина волны второй «гармоники<sup>1</sup>» точно равна длине струны. Следующая гармоника имеет одну с половиной волны (три колеблющихся горба и два узла) для длины волны в две трети длины струны; следующий имеет две волны с длиной волны в половину длины струны и так далее.



Некоторые из мод стоячих волн в одномерной «коробке» длины  $L$  с длиной волны (лямбда) для каждой моды

Если мы внимательно посмотрим на допустимые моды, то найдем очень простую зависимость: в каждой из допустимых мод стоячих волн целое число половин длин волны должно укладываться в длину струны. Существует дискретный набор этих допустимых мод, и мы можем каждой из них присвоить номер по количеству колеблющихся горбов в соответствующей картинке.

<sup>1</sup> Термин «гармоника» также имеет соответствующий аналог «тон» в русском варианте. – Прим. пер.

Звук, что мы слышим от гитары, представляет прекрасную аналогию спектра, который мы видим в модели черного тела. Начальный щипок за струну будет возбуждать волны с огромным количеством различных частот, как свет, входивший в коробку нашего черного тела. После очень короткого времени, однако, деструктивная интерференция между множественными отражениями от концов струны или стенок коробки уничтожает большинство этих длин волн, оставляя только те, которые соответствуют модам стоячих волн.

В случае с гитарной струной большинство энергии волны поступает в основную (первую) моду, что в первую очередь определяет звук, который мы слышим. Чем больше частота гармоник, тем меньше на их долю остается энергии, но они все-таки присутствуют и ответственны за богатый звук настоящего инструмента по сравнению, скажем, с компьютерным звуком, сгенерированным в одном единственном тоне. Множественные различные настройки и эффекты, используемые гитаристами, производят отчетливо различные тона за счет усиления некоторых из этих гармоник и подавления других, чтобы создать особый звук, скажем, у гитары Джерри Гарсии<sup>1</sup> или Джими Хендрикса<sup>2</sup>.

Для световых волн в нашей коробке, изображающей черное тело, распределение энергии формируется не только эстетическими вкусами конкретного игрока, но и с помощью простого правила из физики тепла: равное распределение. Процесс определения мод стоячих волн считается несколько более сложным для света в трех измерениях, чем звука в одном измерении, но приводит к тому же результату – можно насчитать ограниченный набор пронумерованных мод. Раз уж мы знаем эти моды, закон равного распределения энергии говорит нам присвоить каждой моде равную часть общей энергии, полученной от теплового движения частиц, из которых состоят стены коробки<sup>3</sup>.

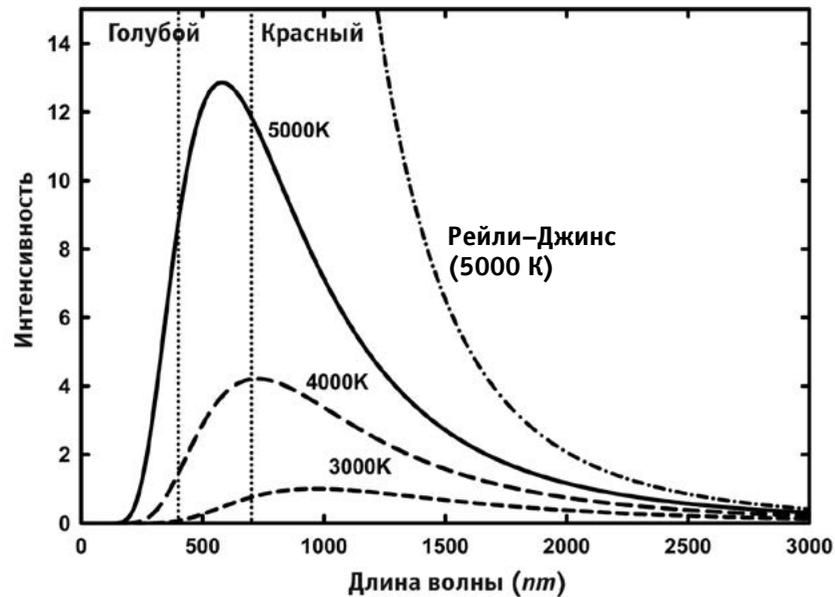
<sup>1</sup> Гарсия, Джерри Джон (1942–1995) – американский музыкант, гитарист, вокалист группы Grateful Dead, основоположник психоделического рока на западном побережье США. – Прим. ред.

<sup>2</sup> Хендрикс, Джими (1942–1970) – американский гитарист-виртуоз, певец и композитор. – Прим. ред.

<sup>3</sup> Надо признать, что существует бесконечное количество этих мод, поэтому физики и изобрели исчисление (дифференцирование и интегрирование). – Прим. авт.

Проблема в том, что по мере того как длины волн становятся все короче, длины волн допустимых мод становятся все ближе и ближе друг к другу. Если мы подсчитаем количество мод внутри некоторого заданного диапазона длин волн, мы обнаружим что оно возрастает бесконечно на коротких волнах (мы помним, они соответствуют высоким частотам). Если мы вообразим струну длиной в полметра с основной волной длиной в один метр, допустимы две моды с длиной в пять миллиметров между 0.1 метра и 0.095 метра, то есть две длины волны, которые могут уложить целое количество своих полуволн в длину струны. В диапазоне пятимиллиметровой длины волны между 0.02 метра и 0.015 метра существует тридцать четыре моды.

В терминах спектра эта модель не дает хорошего, простого пика (максимума) на промежуточных длинах волны, найденных в экспериментах. Наоборот, модель утверждает, что любой объект, независимо от температуры, должен излучать бесконечное число коротковолнового (высокочастотного) излучения. Это не совсем то, что мы хотели бы иметь в своем тостере.



Спектр теплового излучения при разных температурах плюс предсказания модели Рэйли-Джинса, т.е. «ультрафиолетовая катастрофа».

Провал прямолинейного подсчета мод был настолько тяжелым, что приобрел название «ультрафиолетовой катастрофы»<sup>1</sup>. Объяснение максимума, наблюдаемого в спектре реального черного тела, и успешное описание Планком в 1900 году в его формуле потребовало фундаментальных сдвигов в нашем понимании того, как распределяется энергия.

## Квантовая гипотеза

К счастью, тот же самый Макс Планк, который нашел математическую функцию, точно описывающую спектр излучаемого света, также обнаружил способ объяснения причины такого спектра. В терминах описанной выше модели Планк связал каждую из мод стоячих световых волн с «осциллятором» внутри материала, когда каждая колеблющаяся частица, или осциллятор<sup>2</sup>, испускает только одну частоту света. Потом он присвоил каждому из этих осцилляторов характерную энергию, равную его частоте, умноженной на некоторую небольшую константу. Затем ученый установил, что количество энергии, испускаемой конкретным отдельным осциллятором, должно быть целым множителем этой характеристики энергии, которую он назвал «квантом» по латинскому выражению «сколько надо». Таким образом, осциллятор может иметь один квант энергии, два или три, но никогда половину кванта или «пи» кванта.

Эта «квантовая гипотеза» совершила необходимый трюк, отрезав высокочастотное излучение как раз в тех областях, где и свершилась ультрафиолетовая катастрофа. Когда мы приписываем каждому «осциллятору» равную порцию имеющейся тепловой энергии, низкочастотные осцилляторы получают много раз умноженную характерную энергию и таким образом излучают много квантов света. По мере увеличения частоты, количество излучаемого каждым отдельным осциллятором света падает, потому что доля тепловой энергии каждого из них составляет меньшее кратное его характерной энергии. Когда

<sup>1</sup> Эта фраза была придумана австрийским физиком Паулем Эренфестом в 1911-м по отношению к модели Рэйли-Джинса 1905 года и составило бы отличное название для рок-группы. — Прим. авт.

<sup>2</sup> Совместно с термином «осциллятор», что означает «колеблющаяся частица», в российской науке может употребляться также термин «резонатор». — Прим. пер.



фотонов, посылаемых через оптоволокно, было продемонстрировано на расстояниях в несколько сотен километров, и надежность этого процесса позволила создать доступные коммерческие системы.

Китайская команда, упомянутая ранее в главе, также продемонстрировала распределение квантовых ключей между находящейся на Земле лабораторией и спутником на орбите. Осенью 2017 года они провели этот первый «защищенный квантовой шифрацией» международный разговор между Китаем и Австрией через китайский спутник (названный «Микиус<sup>1</sup>» по латинизированному имени китайского ученого V века до нашей эры). По мере прохождения Микиуса над лабораторией в Пекине, они направили лазерные импульсы на спутник для генерации ключа. Через небольшое время, когда спутник проходил над Веной, они повторили этот процесс в венской лаборатории. Получившийся в результате совместный ключ потом использовался для кодировки и декодирования видеосвязи между двумя городами, чтобы открыть конференцию по квантовым исследованиям видеозвонком между Бай Чунли, президентом Китайской академии наук, и Антоном Цайлингером, президентом Австрийской академии наук.

Пока еще системы квантового распределения ключей не используются широко, но нетрудно представить, учитывая все возрастающую важность онлайн-торговли, что банки и розница однажды будут пользоваться квантовой запутанностью для защиты своих покупок. Конечно, это не гарантирует полную безопасность, есть ведь также и исследовательские группы, которые изучают «квантовый хакинг», изучая хитрости, с помощью них будущие перехватчики информации смогут замаскировать себя и похищать квантовые ключи. Квантовая механика не остановит гонку вооружений между теми, кто стремится сохранить секреты, и теми, кто стремится их украсть; это будет лишь перенос битвы на новую территорию.

### Блистательная ошибка

Что Эйнштейн отвернулся от квантовой физики после своей ведущей роли в ее изобретении, долгое время считалось неудачным моментом

<sup>1</sup> Несмотря на то, что по правилам латинского языка надо читать «Микиус», в российской прессе чаще встречается под названием «Микус», однако, наиболее часто как спутник «Мо-цзы», т.к. это устоявшееся в русской китаеведческой истории имя этого философа. — *Прим. пер.*

в его блистательной карьере. Абрахам Пайс<sup>1</sup> в своей магистерской научной биографии Эйнштейна, начинавшейся словами «Неуловим Господь...», лишь слегка затрагивает ЭПР статью, рассматривая ее как краткий и неудачный эпизод из поздних лет карьеры Эйнштейна.

Ирония в том, что книга Пайса была опубликована в 1982 году, именно в том году, когда третий эксперимент Алена Аспе с использованием запутанных фотонов был опубликован, что рассматривается всеми как одна из лучших реализаций сценария ЭПР. Этот эксперимент показал весьма убедительно, благодаря работе Джона Белла, что квантовые запутанные частицы связаны таким образом, что он просто не может быть объяснен теориями типа скрытых локальных переменных, которые бы удовлетворили Эйнштейна. С того времени значение статьи ЭПР невероятно выросло. Анализ 2005 года показал, что статья ЭПР цитировалась всего 36 раз до 1980 года, но 456 раз между 1980-м и 2005-м. В конце 2017 года онлайн-статьи цитировали ее более чем 5900 раз.

В конце концов представленные Эйнштейном, Подольским и Розеном аргументы оказались неверными, но нетривиальными. В действительности, это была блистательная ошибка, она пролила свет на странный и тревожащий аспект квантовой физики, который ранее не рассматривался. Выяснение, как и почему такой очевидный подход с точки зрения здравого смысла к физике терпит неудачу, породило огромный прогресс как в философии физики, так и в технологии, которая использовалась для исследования фундаментальной странности квантовой запутанности.

В этом смысле статья ЭПР не является неудачным моментом в карьере Эйнштейна и в квантовой физике, но подходящим для нее окончанием. Он помог запустить это направление в 1905 году смелым заявлением, что свет может быть частицей, и впечатляющее введение запутанности тридцатью годами позже было таким же смелым ударом, хотя и в противоположном направлении. Каждая из этих статей своим собственным путем трансформировала наше понимание Вселенной, показывая глубокую странность, которая существует в основании нашей обычной, повседневной реальности.

<sup>1</sup> П а й с, Абрахам (1918–2000) – американский физик-теоретик и историк науки голландского происхождения. Научные работы по квантовой физике, физике элементарных частиц, квантовой теории поля и т.п. Автор биографий Эйнштейна, Бора и Оппенгеймера. — *Прим. ред.*

## Заключение

Мы начали книгу с наблюдения того, что большинство людей связывают с физикой экстремальных и экзотических явлений: странных частиц, которые ведут мимолетное существование в гигантских ускорителях частиц; неожиданное создание материи и самого пространства-времени в Большом взрыве; загадочной судьбе гигантских звезд, что коллапсируют, создавая черные дыры. Они происходят в масштабах, воспламеняющих воображение с такими результатами, какими отрицают наше повседневное понимание, как должен быть устроен мир.

Мы увидели в этой книге те же физические принципы, что действуют в этих экстраординарных сценариях, но они влияют и на нашу обычную, повседневную жизнь, начиная с подъема с кровати и приготовления завтрака перед уходом на работу. Даже основной факт нашего существования как стабильных твердых объектов требует квантовой теории для своего объяснения: если бы не спины электронов и принцип запрета Паули, любая попытка создать макроскопический объект заканчивалась бы катастрофическим обрушением материи внутрь себя самой. Все, что мы делаем, независимо от того, насколько это тривиально и обыденно, в конце концов берет свое начало в квантовой физике.

Я надеюсь, что эта книга сделала понятным, что эта связь двусторонняя: экзотическая квантовая физика, в конце концов, скрыта в весьма обыденных явлениях, влияющих на поведение повседневных предметов. Все это началось с обманчиво простого вопроса: «Почему горячие предметы светятся именно таким цветом?» Изменение света, исходящего от нагретого предмета, настолько обычно, будь это электрический тостер, накалившаяся лампочка или само Солнце, и мы почти забываем, что это явление вообще требует объяснения. Благодаря любопытству спектроскопистов XIX века, которые решили тщательно изучить цвет, и смелому и отважному трюку Макса Планка, мы были выведены на путь к самым странным и наиболее влиятельным теориям в физике.

Однако физики не перескакивали на странные, противоречащие нашей интуиции теории в один прыжок; скорее, нас неизбежно влек-

ло туда цепочкой рассуждений, каждый шаг начинался с явления, которое было легко наблюдать в относительно ничем не примечательных обстоятельствах. Планк ввел квантовую гипотезу для объяснения излучения черного тела, затем Альберт Эйнштейн использовал эту идею для объяснения фотоэлектрического эффекта, что привело к статистике фотонов и затем к лазерам. Мария Кюри углубилась в радиоактивность, а Эрнест Резерфорд использовал это для обнаружения ядер атомов, что привело Нильса Бора к введению дискретных атомных состояний, а это уже – к сверхточному измерению атомного времени. Дмитрий Менделеев ввел Периодическую таблицу, что привело к идее электронных оболочек, после чего Вольфганг Паули ввел принцип запрета, это оказалось ключевым практически для всего.

История квантовой физики – это не история людей, витавших в фантастических идеях, которые могут быть применимы лишь в мало-правдоподобных ситуациях; в ее основе лежит любопытство, ведущее вперед с целеустремленностью и жесткой логикой, а также немалым количеством смелости. Ключевые шаги в этой истории включают смелые и ошеломляющие предположения Планка, Эйнштейна, Бора, Луи де Бройля и других. Их идеи легко могли бы быть (а иногда так и случалось) отвергнуты как просто безумные, но они выдерживали невероятно точные экспериментальные проверки.

Итак, связь между квантовой физикой и повседневной жизнью взаимна. Мирный завтрак в будний день был бы невозможен без квантовой физики, и квантовая физика была бы невозможна без ученых, которые смотрели на свечение горячего предмета или притяжение двух магнитов и говорили: «Я удивляюсь, почему так происходит?»

Я надеюсь, что в итоге вы вынесли урок из обеих сторон этой связи. Я надеюсь, что обсуждение физики, что лежит в основе обычной реальности, вдохновит вас взглянуть чуть более внимательно на повседневную жизнь и ценить ее корни, уходящие в ошеломляющую и экзотическую физику. Я надеюсь, что истории о развитии квантовой теории вдохновят вас проследовать за вашим любопытством, задавать вопросы о мире вокруг вас, относиться к этим вопросам серьезно и следовать им, куда бы они вас ни привели. В большинстве случаев это оказывается где-то в совершенно захватывающем месте.

*Научно–популярное издание  
Серия «Физика – это интересно!»*

**ОРЦЕЛЬ ЧАД**

# **ЗАВТРАК С ЭЙНШТЕЙНОМ**

***Экзотическая физика повседневных предметов***

Перевод с английского А.С. Дмитриева

Редактор *Н.В. Комарова*  
Дизайн серии: *А.Б. Архутик*  
Компьютерная верстка и оформление обложки: *А.П. Зарубин*  
Корректоры *В.А. Нэй, О.В. Круподер*

Подписано в печать 10.02.2020 г.  
Формат 70х90/16. Гарнитура Оффсина  
Печать офсетная. Бумага офсетная.  
Печ.л. 17. Тираж 1 000 экз.

ООО «Издательство «Этерна»  
115477, Москва, Кантемировская ул. 59а  
Тел.: 8(495)755-81-23

E-mail: [info@eterna-izdat.ru](mailto:info@eterna-izdat.ru)  
[www.eterna-izdat.ru](http://www.eterna-izdat.ru)