

КАРТА НЕЗРИМОГО

ВОСЕМЬ ПУТЕШЕСТВИЙ
ПО ФИЗИКЕ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ
ЧАСТИЦ

Джон Баттерворт

Глава отделения физики и астрономии Университетского колледжа Лондона, участник эксперимента ATLAS на Большом адронном коллайдере, лауреат премии Королевского общества и фонда Вулфсона за выдающиеся исследовательские достижения, обладатель медали и премии Чедвика, автор научно-популярных книг и статей

«Перед нами карта незримого, на нее нанесены кварки и лептоны — фундаментальные частицы стандартной модели <...> они взаимодействуют, обмениваясь фотонами, глюонами, *W*- и *Z*-бозонами и образуя более сложные объекты — адроны, атомы и в конечном счете видимый мир вокруг нас».



Лекторий. Как устроен мир

Джон Баттерворт

**Карта незримого. Восемь
путешествий по физике
элементарных частиц**

«АСТ»

2018

УДК 539.123
ББК 22.386

Баттерворт Д.

Карта незримого. Восемь путешествий по физике элементарных частиц / Д. Баттерворт — «АСТ», 2018 — (Лекторий. Как устроен мир)

ISBN 978-5-17-107351-0

Из чего состоит Вселенная? Какой неделимый далее элемент лежит в ее основе? Последние 60 лет ученые со всего света силятся установить, какие частицы материи следует считать фундаментальными, и описать те силы, которые определяют их поведение. Общими усилиями удалось создать стандартную модель элементарных частиц, из которых и состоит все вокруг нас. В 2012 году был открыт бозон Хиггса, и карта стала более точной, хотя на ней и наметились новые загадочные просторы. «Карта незримого» — путеводитель по стандартной модели и туманным землям физики объектов, недоступных человеческому глазу. Читатель, сжавшись до размеров субатомной частицы, последовательно открывает атомы, кварки, электроны и нейтрино, а также законы, которым те подчиняются. Это путешествие в мир странного и одновременно удивительного — безграничного космоса, черных дыр, темной материи, и дальше — к границам человеческого познания.

УДК 539.123

ББК 22.386

ISBN 978-5-17-107351-0

© Баттерворт Д., 2018

© АСТ, 2018

Содержание

Как читать карты	6
Пролог. Путешествие начинается	7
Путешествие I	11
I. Ставим парус	13
II. Океанская волна...	15
III ...или частица?	19
IV. Рассекая квантовое поле	22
Путешествие II	25
V. Атомы	27
VI. В недрах атома. Электрон	29
VII. Ядерные свойства	31
VIII. Истоки химии	33
Путешествие III	36
IX. Электромагнетизм	38
X. Инвариантность и относительность	41
Конец ознакомительного фрагмента.	43

Джон Баттерворт
Карта незримого
Восемь путешествий по
физике элементарных частиц

Перевод оригинального издания:

John Butterworth

A MAP OF THE INVISIBLE

Journeys into Particle Physics

Серия «Лекторий. Как устроен мир»

© Литературное агентство *Diane Banks Associates*, 2018

© Перевод на русский язык, оформление. ООО «Издательство АСТ», 2018

* * *

Как читать карты

Все карты в этой книге следует рассматривать не как наглядные иллюстрации к физике элементарных частиц, а скорее, как заметки для памяти. Выдержано приблизительное направление от меньших энергий к большим (и уменьшения характерных масштабов) с запада на восток, а также рост «многокомпонентности» с юга на север. На картах есть промежуточные зоны и неопределенности. Энергетическая шкала показывает иногда изменение энергии, иногда – изменение массы, и даже при таком гибком подходе неизбежны несоответствия в общей картине. Так, например, фотон проживает в Бозонии на востоке, хотя его присутствие ощущается и далеко на западе. Тау-лептон и мюон должны быть, скорее, на востоке, а чтобы добраться до кварков, нужно пересечь земли Лямбда-КХД. Аллегии и аналогии помогают понять структуру мира частиц, но могут ввести и в заблуждение, если ими слишком увлечься. Одним словом, путешествуйте с удовольствием, но каждый шаг совершайте с осторожностью.

Пролог. Путешествие начинается

Проведем мысленный эксперимент. Возьмем яблоко и разрежем его пополам, потом разрежем пополам полученные половинки и продолжим делить каждый новый кусочек на две равные части. Чем завершится такой процесс?

Следующий мысленный эксперимент, менее деструктивный: попытаемся взглянуть в яблоко. Какая структура нам откроется? Состоит ли яблоко из небольшого набора элементов – назовем их атомами, – организованных разными способами? Если так, то что произойдет, если еще внимательнее присмотреться к этим элементам? Состоят ли они сами из еще более мелких частей?

В итоге нашего мысленного эксперимента перед нами откроется целый мир, населенный странными и удивительными частицами. В нем связаны между собой запутанными сетями острова сложности, погруженные в океан нашего незнания. Этот мир начинается у порога обычной жизни – например, с простого яблока, – и простирается до неизведанных границ бесконечно малых величин.

Путь от яблока к невероятно крошечным масштабам лежит через океан. Нам понадобится корабль, а еще искусство работы с микроскопами, ускорителями и другими приборами, которые смогут расширить возможности наших невооруженных глаз и позволят проникнуть в самое сердце атома – и даже еще глубже. Как далеко мы сможем уплыть? Есть ли граница у загадочного мира? Существуют ли неделимые частицы, фундаментальные кирпичики для всего остального, или наше путешествие в глубь вещества продлится вечно? Будем ли мы обнаживать все более крошечные элементы материи по мере нашего продвижения на восток?

Вопросы, которыми мы задаемся, обсуждались тысячелетиями, а ответы на них лежат в основе одного из краеугольных камней физики. Ответы – насколько они нам известны – живут в странном, невидимом мире. В нашей книге мы исследуем этот мир и составим его подробную карту.

Название игры

Наука, занятая изучением крошечных составляющих материи, называется физикой частиц. Это не самое подходящее название, потому что в ряде случаев оно приводит к недопониманию.

Слово «частица» может иногда вводить в заблуждение. Физики изучают частицы песка, пыли – в пространстве и атмосфере – или какие-то другие небольшие скопления вещества, которые не имеют ничего общего с микроскопическими базовыми составляющими материи.

Иногда физику частиц называют физикой элементарных частиц, чтобы разграничить область ее исследований и вотчину физики, которая изучает составные (композитные) части вещества. Однако и эта терминология не всегда помогает, потому что, к примеру, протоны и нейтроны – важнейшие крошечные «обитатели» мира частиц – не являются элементарными. Более того, в какой-то момент мы можем обнаружить, что фундаментальные частицы современных теорий тоже не элементарны, хотя ими определенно занимается именно физика частиц. Термин «физика элементарных частиц» отвергается как университетскими курсами, так и научно-исследовательскими коллективами, потому что он дает иллюзорное представление о легкости предмета изучения. Так, поступающий на одноименный курс студент может быть очень удивлен, столкнувшись с уравнениями, описывающими поиск новых частиц.

Другой раздел физики – физика высоких энергий – стал широко использоваться как альтернатива для понимания сущности предмета изучения. Действительно, непосредственный

метод изучения частиц заключается в том, чтобы дробить вещество в гигантских коллайдерах и смотреть, что получится, а подобные исследования требуют очень больших энергетических затрат. Однако некоторые ключевые эксперименты нацелены на поиски очень-очень редких частиц с очень-очень низкими энергиями. Для них ученые прячут детекторы глубоко под землей, чтобы избавиться от слабейших шумов. Даже малейшие дрожания со сверхнизкими энергиями служат причиной возмущений системы. Косвенно подобные эксперименты могут указать на свойства процессов, которые происходят при высоких энергиях, однако называть их физикой высоких энергий кажется мне неуместным.

Другая проблема с термином «физика высоких энергий» заключается в том, что физики-ядерщики, астрофизики, специалисты по физике плазмы и многие другие ученые в своих исследованиях имеют дело с энергиями гораздо большими, чем предельные энергии, достигаемые в физике частиц. Энергии столкновения [протонных пучков] в Большом адронном коллайдере (*LHC*, ЦЕРН), который на момент написания этой книги является самым высокоэнергетичным коллайдером из когда-либо созданных, очень незначительны по сравнению с энергией, высвобождаемой при работе ядерного реактора, чья энергия, в свою очередь, ничтожна в сравнении с энергиями взрывающихся звезд.

Как бы мы ни называли предмет нашего интереса, он все равно лежит в сфере практических исследований и, следовательно, свободен от каких бы то ни было форм спекулятивной философии. Исследования начинаются с того, что доступно человеческому глазу, затем – микроскопу и, наконец, мощным ускорителям частиц и другим точным инструментам. Каждое новое поколение экспериментов открывает для человека новые уголки таинственного мира сверхмалых масштабов и позволяет создавать карты, чтобы лучше ориентироваться на пути в глубины материи.

Но в конце концов закономерно возникает вечный вопрос: из чего в действительности состоит Вселенная, если пытаться добраться до ее основ?

Стандартная модель

Ответы на все вопросы – по крайней мере, в нашем текущем понимании того, что мы хотим спросить, – запрятаны в теорию со скромным названием «стандартная модель». Эта теория обобщает современное состояние наших знаний о фундаментальных силах и составляющих вещества – раздел науки, в общем виде известный как *физика частиц*. Эта теория (в действительности стандартная модель – больше теория, чем собственно модель, хотя сам термин для разных людей означает разное) есть результат многолетней работы и исследований, успешно описывающий широкий круг физических явлений.

Автор этой книги вырос в Рашхолме, районе южного Манчестера, в той его части, где находится *Curry Mile* с огромным количеством азиатских ресторанов и закусочных. Во времена моего детства в названиях индийских и пакистанских заведений часто встречалось слово «стандартный», что означало питание по стандарту тандури¹ или другим кулинарным стандартам, которые для *Curry Mile* были чрезвычайно высокими. К этим стандартам должен был стремиться любой хороший ресторан. Я думаю, что стандартная модель подразумевает что-то в этом роде. Другими словами, такое скромное название должно символизировать знак высокого качества. Любая новая теория должна иметь высокий стандарт.

Примером мощи стандартной модели может служить открытие в 2012 году бозона Хиггса, который давно предсказывала эта теория. Бозон Хиггса – новый вид объектов, беспрецедентный по своей природе. Он необходим для математической согласованности всей теории. Пока ограничимся тем, что открытие бозона Хиггса стало уникальным доказательством

¹ *Тандури* — смесь пряностей, используемая в индийской кулинарии. – Прим. перев.

фундаментальных идей, лежащих в основе стандартной модели. Важно то, что теперь ученые получили самосогласованную теорию, в которой самые маленькие объекты действительно бесконечно малы. Стандартная модель способна описывать физические явления, происходящие в огромном диапазоне энергий и расстояний, и этот диапазон был значительно расширен открытием бозона Хиггса.

Идеи, лежащие в основе стандартной модели, элегантны и математически строги. Кроме того, учитывая огромное количество наблюдений, которые может описать эта теория, она на удивление лаконична и проста. Каждая отдельная концепция, входящая в стандартную модель, может быть легко воспринята на понятийном уровне даже неспециалистами. Однако существует несколько важных и не очень очевидных идей, которые помогают в создании общей картины и объясняют, как все концепции связаны между собой. Создание общей картины – это сложная задача.

Стандартная модель неизбежно динамична. Она должна уметь подстраиваться под новые данные. Однако такая гибкость не меняет каркаса этой теории, не влияет на ее эффективность в описании широчайшего спектра данных. Эта теория, несомненно, содержит истину – просто пока еще не всю.

Эта книга – поиск истины. Или, во всяком случае, поиск такого количества истины, которое мы в состоянии постичь.

Поиск будет состоять из восьми (быть может, восьми с половиной) экспедиций в самое сердце материальной Вселенной. В результате этих взаимодополняющих экспедиций мы выявим и исследуем мельчайшие составляющие вещества, изучим их поведение (а часто они ведут себя, надо сказать, довольно странно), а еще определим силы, связывающие и разрушающие их. Это история нашего мира и нашей Вселенной. Именно из этих «строительных кирпичиков» состоит наша повседневная жизнь, а также звезды и галактики.

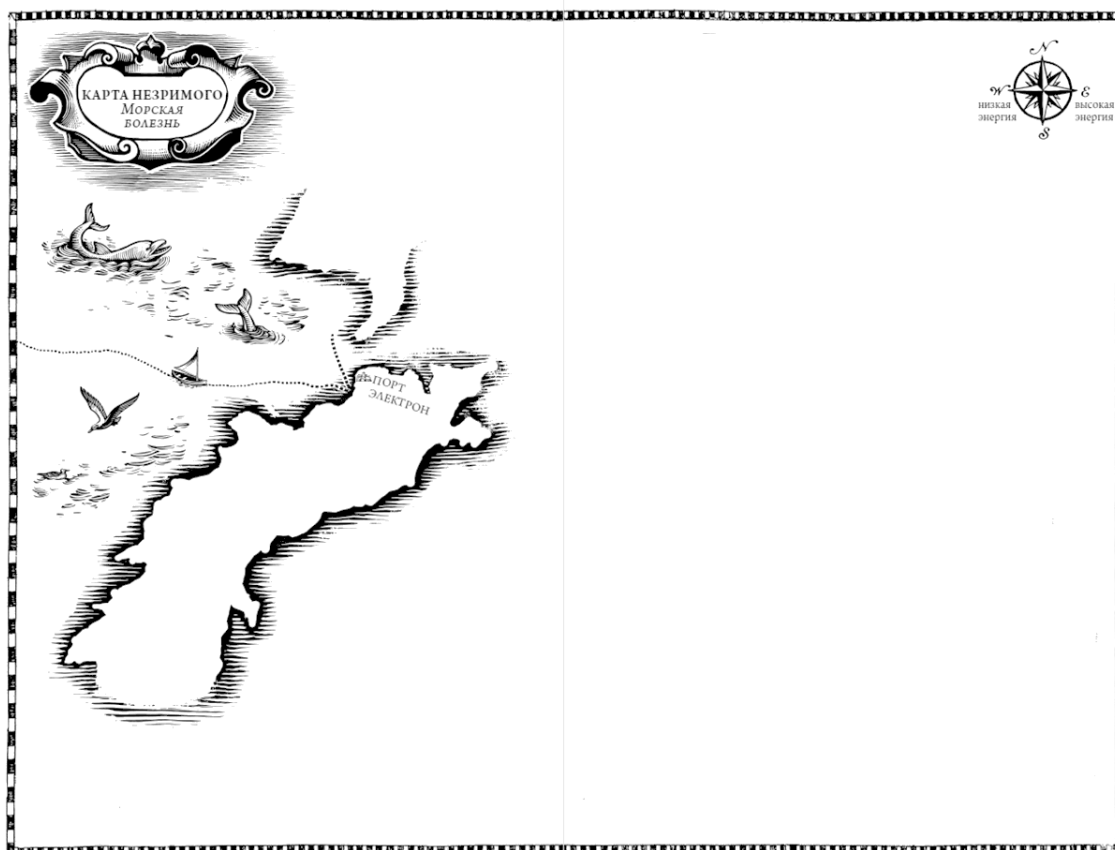
Исследуя новые территории, пограничные с известной нам физикой, мы дадим имена новым землям и изучим их взаимное расположение. Для кварков, бозонов, адронов и других частиц составим своего рода иллюстрированный глоссарий, что поможет лучше понять основополагающие идеи стандартной модели. Иногда может показаться, что свойства частиц, с которыми мы столкнемся, произвольны, но это лишь станет доказательством гибкости стандартной модели. Совокупность глубокой физической сущности одних свойств и произвола других и порождает теорию, по элегантности и лаконичности превосходящую все предыдущие модели элементарных частиц.

Прежде чем отправиться в путешествие, заметим, что оно – лишь один из возможных путей к границам научных познаний. Наш подход будет заключаться в упрощении, редукции, и мы хорошо понимаем, что он не раскроет нам до конца глубинную сущность вещества. Даже за кадром так называемой «теории всего» осталось бы много неизвестного. Какие бы крошечные компоненты ни выявила физика частиц, мы знаем, что их взаимодействия (и поведение больших ансамблей таких частиц) демонстрируют глубокие основополагающие принципы и сложное поведение, которые не являются очевидным следствием так называемых фундаментальных законов. Происходит рождение новой физики (не говоря уже о химии, биологии и других разделах науки). Важно исследовать структуру вещества на самых маленьких доступных нам масштабах – это, безусловно, одна из самых захватывающих перспектив при достижении научных рубежей. Именно к этим рубежам мы с вами и отправимся. Карты, которые мы начертим, укажут на некоторые поразительные и четкие принципы Природы, действующие повсюду, а не только в физике частиц.

Как у любой карты, у наших карт тоже будут границы. Быть может, стандартная модель и самодостаточна, но наше понимание физики не будет полным никогда. В конце концов, наше путешествие может завести нас в неизвестность, где в глубоководной бездне таятся подводные

монстры, от истины отвлекают сладкозвучные сирены, но где могут найтись ответы на возникающие у нас вопросы.

Путешествие I Морская болезнь



Лодка и то, из чего она сделана.

•

Чайки, дельфины и интерференция.

•

Урок лоцмана.

•

Нетерпеливый экипаж готов к бунту.

•

Лоцман продвигается дальше и дальше, используя лазеры.

•

Экипаж убеждается в правоте лоцмана.

•

Чужеродное поле.

•

Короткие расстояния, высокие энергии и связь между ними.

•

I. Ставим парус

Получив в свое распоряжение небольшое, но быстроходное судно, набрав команду профессиональных физиков и любознательных дилетантов, мы отчалили. Наши трюмы были наполнены провизией и научным оборудованием. Не забыли мы и гитару. Цель нашего плаванья – проверить некоторые теории, и поэтому нам нужны экспериментальные данные. На пути в далекие страны мы надеемся, как некогда надеялся и Чарльз Дарвин, отправляясь в кругосветное путешествие на небольшом бриге «Бигль», отыскать все, что нам потребуется.

Мы следуем с запада на восток. На нашей карте западные границы – это объекты привычного нам повседневного масштаба. Продвигаясь на восток, мы будем... уменьшаться, нацелив наше судно в самое сердце материи и нанося все увиденное, стремящееся к бесконечно малому, на карту.

Большинство предметов сделаны из более мелких вещей. Наша лодка изготовлена из дерева, металла и стеклопластика. Не составит труда обнаружить составляющие этих материалов: щепки, стекловолокно, пластик. Нити стекловолокна толщиной с хлопковую нить сделаны из кремнезема. Каждая из таких нитей состоит из атомов кремния, соединенных с атомами кислорода (два атома кислорода на один атом кремния – диоксид кремния). Атом кремния в миллиард раз меньше, чем толщина нити. Если каждый атом кремния сравнить с нашим корабельным коком, диаметр сечения нити был бы сравним с диаметром нашей планеты.

Атом кремния состоит из ядра, окруженного 14 электронами, каждый – с отрицательным электрическим зарядом. Ядро имеет положительный электрический заряд, величина которого в 14 раз больше, чем заряд одного электрона, и поэтому к ядру притягиваются 14 электронов. Это хорошо знакомая конфигурация. Действительно, Солнечная система состоит из восьми планет и некоторого количества камней и мусора на орбите вокруг центрального светила². Заманчиво представить атом кремния как крошечное подобие Солнечной системы с 14 маленькими планетками-электронами, вращающимися вокруг центрального ядра. Однако, как мы увидим, электроны не имеют ничего общего с маленькими планетками: они представляют собой нечто новое и совсем другое.

Наша лодка плывет на восток, мы сокращаемся в размерах, и мир вокруг нас тоже меняется. Большая часть физических законов, которым подчиняются земли, остающиеся позади, объясняют поведение вещества только в среднем. Электроны и другие объекты, которые начинают нам встречаться при движении на восток, кардинально отличаются своим поведением от вещества, оставшегося на западе.

По причинам, связанным с указанными изменениями, которые проявятся во время нашего путешествия, способность видеть все более мелкие части вещества потребует использования микроскопов с пучками частиц все больших и больших энергий. Последнее означает, что границы сверхмалого – это границы высоких энергий. Важное требование к высоким энергиям в физике частиц заключается в том, что энергия должна быть сконцентрирована в малом пространственном объеме или, что то же самое, в небольшом количестве частиц. Другими словами, карта высоких энергий и малых расстояний дает нам представление о физике очень ранней Вселенной, которая была горячей и плотной почти сразу после Большого взрыва. В те первые мгновения энергия в некотором фиксированном объеме пространства была настолько велика, что были вскрыты мельчайшие составные части вещества.

² В состав Солнечной системы входят также малые тела, включая пояс астероидов между Марсом и Юпитером и большое количество транснептуновых объектов, а также планетные квазиспутники, кометы, метеороиды, космическая пыль и др. – *Прим. перев.*

Но чтобы понять все это, необходимо выяснить, кто населяет этот странный новый мир. Что мы можем найти внутри атома? Пока нам наверняка известно только одно: что бы мы ни нашли – оно будет очень маленькое. Следовательно, нам нужно очень много энергии, чтобы это увидеть. Куда мы направляемся? Какие странные моря пересекаем? Какие физические законы (если они вообще здесь есть) применимы на этих территориях? Начало нашей первой экспедиции – это первая относительно безопасная гавань, порт Электрон. А расположен он на берегу неизвестного острова.

II. Океанская волна...

Из нашей гавани, где находится порт Электрон, мы намечаем курс к неизвестной земле, слабо очерченной на горизонте. Нанятый нами местный лоцман торопится вывести лодку из гавани по спокойной глади залива в обход пятен бурлящей воды, которые виднеются у входа в гавань. Но наши штурман и капитан осторожны. Осознавая важность предстоящих задач, они хотят знать наверняка, в чем причина такого бурления воды и насколько безопасно провести рядом с ними лодку. Местный лоцман в ответ на наш прямой вопрос только пожимает плечами и начинает рассуждать о частицах.

Корпускулярное поведение – то, с чем все мы хорошо знакомы. Так, если вы стреляете из пистолета, пуля будет двигаться по прямой линии, пока ее траекторию не изменят какие-нибудь силы. Другой пример – сухой песок, послушно струящийся сквозь пальцы и образующий аккуратные горки. Все частицеподобные объекты будут двигаться по прямым линиям и никак иначе, если только не отлетят рикошетом от чего-то или какие-то силы не изменят их траекторию. Не изменят объекты и своей формы во время перемещения. Чтобы правильно описать частицу и предсказать ее поведение, нужно знать ее размер, скорость и массу. Мы представляем себе молекулы газа частицами, ударяющими друг друга, и с помощью такой модели можем рассчитать температуру, давление и довольно много других полезных и интересных вещей, включая конвекционные потоки, переносящие тепловую энергию по каюте. Частицы также способны передавать информацию. Письма, которые члены экипажа отправили домой перед выходом в море, тоже состоят из частиц. В некотором смысле это дискретные пакеты некоторого материала, путешествующие от отправителя к адресату по определенному пути.

Волны обеспечивают совершенно другой способ передачи информации и энергии. Корабельное радио (для аварийного использования) посылает сигналы обратно на базу, а корабельная микроволновая печь разогревает суп. Большая часть того, что нам известно о мире вокруг нас, приходит в форме волн – в повседневной жизни преимущественно в форме световых и звуковых, но есть еще радио- и рентгеновские волны. При использовании соответствующих приборов набор волн становится более разнообразным. Волновая физика во многом интереснее и сложнее, чем физика частиц, и порождает более широкое сочетание всевозможных эффектов, – что мы и хотели показать, говоря о странных областях бурлящей воды.

Для правильного описания волны необходимо знать ее длину, частоту и амплитуду. У бегущих волн есть пики и впадины, и они перемещаются. Но что перемещается в волне на самом деле? Лоцман обращает наше внимание на чайку, сидящую на воде. Когда проходит волна, то чайка качается на ней, но при этом не совершает движений ни вперед, ни назад. Хотя сами волны перемещаются по заливу к берегу, но чайка – и сама вода, через которую передаются волны, – движутся только вверх и вниз, не перемещаясь при этом вдоль горизонтальной поверхности.

Высота «верха» или, что то же самое, глубина «низа» относительно невозмущенной, спокойной поверхности воды – это то, что называется *амплитудой* волны. У любой волны есть амплитуда – смещение, которое она производит от среднего уровня. Так, усилитель звуковой системы увеличивает амплитуду волны, и звук становится громче.

Рябь на воде залива не исчезает – наверное, там плещется дельфин. Значит, чайка будет продолжать качаться на волнах, подпрыгивать вверх и вниз. Количество подпрыгиваний чайки за некоторый промежуток времени называется частотой волны. Другими словами, частота волны – это число пиков и впадин, проходящих через заданную точку в определенном интервале времени. Частота обычно измеряется в герцах (Гц) и равна количеству колебаний за одну

секунду. Так, если волна в заливе имеет частоту 2 Гц, то чайка подпрыгнет вверх-вниз два раза за одну секунду.

С другой стороны, длина волны – это просто расстояние между двумя соседними пиками рассматриваемой ряби. Поскольку смещение должно проходить расстояние в одну и ту же длину волны в каждый момент, когда чайка подпрыгивает, то скорость распространения волны легко вычисляется умножением частоты на длину волны.

Таким образом, если нам известны амплитуда, длина и частота волны, то мы можем вычислить ее скорость, а скорость определяет все самые важные свойства волны. Чем же поведение волн интереснее поведения частиц? Давайте подумаем об этом.

Пусть два дельфина плещутся в разных местах залива, создавая волны с одной и той же амплитудой, частотой и длиной волны, но распространяющиеся в разных направлениях. Чайке вода покажется более бурной. А может, и нет.

Если пики двух волн прибывают к чайке одновременно, то чайка начнет подпрыгивать сильнее. Амплитуды волн будут складываться, и чайка подпрыгнет вверх в два раза выше и опустится в два раза ниже. Однако в зависимости от того, насколько далеко от чайки плещутся дельфины, может случиться так, что пик одной волны прибудет одновременно со впадиной другой волны. В этом случае впадина «отменит» пик. Что же произойдет с водой под чайкой? Сила одной волны велит чайке двигаться вверх, а сила второй волны (равная и противоположно направленная относительно первой силы) велит чайке двигаться вниз. В результате чайка вообще не будет двигаться. Волны будут проходить мимо, а чайка будет отдыхать на неподвижной воде.

Вот такие спокойные зоны и видны, когда всевозможные волны встречаются друг друга. Радиоволны и микроволны, которые переносят, например, сигналы *Wi-Fi*, тоже производят такие зоны³. Указанные эффекты при совместном прохождении волн называют *интерференцией*. Когда две волны приходят так, что одна из них в пике, а другая – во впадине, то они, как говорят, находятся «в фазе». *Фаза* – это еще одна важная характеристика волны, но она может быть определена только тогда, когда есть две волны. Фазовые отличия (т. е. находятся две волны в одной фазе или нет) приводят к реальному физическому эффекту. В нашем примере с чайкой птица качается вверх и вниз или совсем не качается в зависимости от относительной фазы двух набегающих на нее волн. Фаза должна быть определена относительно чего-то. Если есть только одна волна, мы можем определить фазу относительно некоторого произвольного момента времени, скажем, в тот момент, когда мы впервые заметили дельфина. Если есть только один дельфин, производящий только один набор волн, то чайка будет подпрыгивать вверх-вниз независимо от фазы волны. Только когда у нас есть несколько волн, обладающих разностью фаз, мы сможем увидеть другое поведение чайки. Этот довольно простой факт имеет далеко идущие последствия.

Такое интерференционное поведение волны сильно отличается от более привычного поведения частиц. Пули, выпущенные с разных сторон любителями пострелять по чайкам, могут столкнуться. Однако нельзя уменьшить количество пуль, сделав больше выстрелов⁴. Создав же большее количество волн, можно сделать часть водной поверхности спокойнее.

Есть и другие интересные эффекты, на которые не способны частицы и способны волны. В заливе расположена гавань, соединенная с заливом узким каналом. Дельфин и чайка – в заливе, и некоторые волны ударяют по этому узкому каналу. Что будет происходить?

³ Мне кажется, что одним из таких тихих мест является мой кабинет в ЦЕРНе, потому что здесь, в месте рождения Всемирной интернет-паутины, я все еще борюсь за доступ в Интернет; слишком много здесь волн, не вовремя приходящих, и они, видимо, гасят друг друга в непосредственной близости от моего стола.

⁴ Я извиняюсь перед чайкой, но такой уж кроважадный пример пришел мне в голову.

Если бы волны вели себя как частицы, то любые из них, направленные точно вдоль канала, могли бы пройти через него и продолжить путь по прямой линии через гавань, оставляя большую часть водной поверхности гавани незатронутой.

Однако происходит совсем по-другому. Волны попадают в канал, и канал действует на гавань уже сам как источник волн – как будто дельфин попал в канал. (Такая схема наиболее эффективна, если ширина канала сравнима с длиной попавшей в него волны, потому что в этом случае канал становится источником только одного типа волн, а не серией источников с разными волнами.) Волны будут распространяться из канала концентрически, через всю гавань (в которой точно нет никакого дельфина). Это распространение волн называется *дифракцией*. Благодаря такому свойству волны легко проходят повороты. Это еще одно основополагающее свойство квантово-волнового мира стандартной модели физики частиц.

Одно из важнейших практических следствий такого волнового поведения – существование предела для наименьших структур вещества, которые в принципе могут поддаваться изучению. Грубо говоря, такие эффекты, как дифракция и интерференция, указывают на то, что волна не может предоставить нам удовлетворительную информацию об объектах меньше длины этой волны. Меньший объект видится размытым, неясным. В нашем примере с ведущим в гавань каналом волны, длины которых гораздо короче сечения канала, будут представлять собой сфокусированный луч. Волны, длиной равные ширине канала, распространятся из него и заполнят гавань. Те же волны, которые окажутся длиннее ширины канала, даже не смогут в него зайти.

Любая система, которая может поддерживать существование волны, описывается волновым уравнением, объясняющим, как будет «работать» эта волна. Так, водная поверхность залива, по которой мы движемся, представляет собой одну из таких систем. Другой пример – воздух. Небольшая область плотного воздуха под высоким давлением будет распространяться, сжимая соседние области, которые, в свою очередь, будут сжимать соседние с ними области и т. д. Импульс высокого давления, который распространяется по воздушной среде, называется *звуковой волной*, создаваемой при сжатии воздуха каким-либо способом, например вибрационным барабаном или вашей гортанью.

Электрические и магнитные поля образуют другую систему, которая описывает, как перемещаются световые лучи, радиоволны и другие электромагнитные волны. Здесь важно отметить, что в силу схожести волновых уравнений, лежащих в основе описания всех этих систем, их общее поведение в некотором смысле аналогично по ключевым позициям (включая свойства дифракции и интерференции). Поскольку эти системы окажут важнейшую навигационную помощь в наших дальнейших путешествиях, уделим время объяснению того, почему волновые уравнения так важны в физике.

Нам нет нужды приводить математические выкладки и выписывать уравнения. Однако иногда какое-то уравнение окажется настолько важным для нашего дальнейшего пути по физическому миру, что придется его обсудить. В математике уравнение связывает между собой разные понятия абстрактным, но совершенно определенным образом. Уравнения, используемые в физике, в каждой своей части описывают физические объекты. Связи, получаемые с помощью уравнений, дают представление о поведении этих объектов и, что особенно важно, указывают, как изменение одного физического объекта влияет на изменение другого физического объекта.

Волновое уравнение дает описание изменений некоторой физической величины – высоты воды, давления воздуха, силы электрического поля. Другими словами, это уравнение дает связь изменения указанных величин с течением времени и их местоположением. В частности, волновое уравнение для вод нашего залива говорит о том, что если высота уровня воды различна в различных точках, то поверхность воды будет меняться и в зависимости от времени.

Представьте изгиб на воде, идущий от хвоста плывущего по заливу дельфина, поднимающего некоторую область воды чуть выше, чем окрестные слои. Такая система неустойчива.

Небольшой «водяной холмик», созданный движением дельфина, будет разглажен гравитационными силами, и это распространит рябь по поверхности воды. Эта рябь будет подобна бегущей волне.

Волновое уравнение – это просто математическая запись того, как происходит рассмотренный выше процесс. Это уравнение рассказывает нам, как различия в высоте воды в разных областях приводят к изменению высоты воды в разные моменты времени. Уравнение может быть использовано, чтобы предсказать, как волны будут распространяться и взаимодействовать друг с другом, причем это в равной степени относится к волнам на воде, к звуковым волнам, радиоволнам и квантовым волнам.

Наша лодка выходит из гавани и начинает двигаться по прямой, «частицеподобной» линии. Экипаж, проинструктированный местным лоцманом, размещает буи на воде. Теперь мы знаем и, надеюсь, понимаем различия в поведении волн и частиц. Они кардинально отличаются друг от друга, и очень трудно себе представить, как это они постоянно бывают смешаны друг с другом. Но мы идем по неизведанным и опасным морям, и мы должны быть готовы ко всяким сюрпризам. К возможному разочарованию некоторых особо нетерпеливых членов команды, наш лоцман еще не натолкнулся ни на один из этих сюрпризов.

III ...или частица?

Прежде чем продолжить путешествие, нам необходимо понять, в какой среде мы движемся. Если мы этого не сделаем, то, по словам лоцмана, сможем мало понять из увиденного, и земли Атома, которые есть цель нашего следующего путешествия, окажутся для нас непроходимыми джунглями. Береговая линия все ближе, хотя мы совсем недавно покинули порт. То, что нам хочет сказать лоцман, настолько странно, что он и сам понимает, что мы ему вряд ли поверим. Готовясь заранее к нашей реакции, лоцман призывает капитана бросить якорь и собрать в трюме весь экипаж. После нескольких минут подготовки в кромешной тьме нашего трюма лоцман пускает лазерный луч на экран, снабженный двумя небольшими прорезями. По другую сторону экрана расположен детектор для регистрации света, проходящего через щели в экране.

Первое, что нужно отметить, – свет ведет себя как волна. Если щели достаточно узкие, то они сами начинают действовать как источники волн. Другими словами, при прохождении через щель свет испытывает дифракцию – точно так же, как волны воды ведут себя в узком проходе в гавань. Это указывает на то, что длина волны света равна размеру каждой щели – точно так же, как испытывали дифракцию только те волны, которые обладали длиной волны, равной ширине входа в гавань.

Кроме того, на детекторе мы увидим серию светлых и темных полос. В каждую точку нашего детектора свет поступает из двух источников – двух щелей, или, снова используя нашу аналогию с волнами залива, от двух дельфинов, плещущихся возле гавани. До точек, расположенных в точности на полпути между щелями, свет проходит одинаковое расстояние от каждой щели, и поэтому пики волн от каждой щели будут прибывать одновременно, т. е. в фазе. Пики усиливают друг друга, как и впадины. В результате получается сильная волна и, таким образом, яркий свет. До любой другой точки свет будет проходить разные расстояния от щелей, и сложение волн вовсе не гарантируется. Если разность расстояний, пройденных лучами света, есть целое число длин волн, то один пик от первого источника придется на другой пик от второго источника, и волны все равно будут складываться. Но если разность будет целым числом плюс половина, то пик одной волны прибывает одновременно с провалом другой волны. В последнем случае волны будут находиться в *противофазе*. (Это темные полосы, которые образуются, когда вершины и впадины нивелируют друг друга.) Детектор останется темным – по той же причине, по которой останется неподвижной чайка на поверхности бухты.

Такая картина выглядит довольно убедительно. Дифракция и интерференция продолжаются, и эти явления происходят только с волнами. Мы не увидели бы такого поведения у частиц. Мы даже можем ввести понятие *длины волны* – то, что не имеет смысла для классической частицы. Свет – это волна. Финал истории.

Однако это еще не финал. Существует разворот. Очень важный разворот.

Лоцман призывает нас более внимательно посмотреть на детектор, который принимает свет после того, как он прошел сквозь щели, создавая темные и светлые интерференционные полосы. В нашем эксперименте детектор «полагается» на «фотоэлектрический эффект». Другими словами, детектор устроен таким образом, что когда свет «ударяет» по детектору, он испускает электроны, создающие электрический ток. Объяснение такого поведения лежит на побережье земли Атома, но теперь мы видим, что если увеличить электрическое напряжение детектора, мы можем породить ток и обнаружить рождающиеся электроны. Таким образом мы узнаем, когда свет попадает на детектор, и, следовательно, где будут яркие полосы, а где – темные.

Волны несут энергию, перемещаясь в пространстве. Эта энергия заставляет чайку двигаться, и именно эта энергия волн порождает электроны в нашем детекторе. С помощью волн

можно увеличивать энергию двумя способами: вы можете увеличить амплитуду волны, что заставит чайку выше подпрыгивать; или же вы можете увеличить частоту волны, и тогда чайка начнет подпрыгивать вверх-вниз быстрее. Точно так же происходит и со светом; Мощность лазера может быть увеличена путем как усиления его яркости, интенсивности, так и увеличения его частоты. Частота света соответствует его цвету, поэтому увеличение частоты может означать, к примеру, переход от красного света к синему.

В нашем эксперименте, однако, эти два различных способа увеличения энергии совсем по-разному воздействуют на световой детектор⁵. Можно было бы ожидать, что при увеличении количества света на фотоэлектрическом материале детектора соответствующий электрический ток также увеличится. Это так, но только при некоторых условиях, а в общем случае работает не всегда. К примеру, пусть используемый нами свет – синий. Это означает, что его длина волны составляет 475 нанометров ($1 \text{ нм} = 10^9 \text{ м}$)⁶, что соответствует частоте 650 терагерц⁷ ($1 \text{ ТГц} = 10^{12} \text{ Гц}$), или 650 тысячам миллиардов колебаний в секунду. Световой детектор регистрирует излучение, в результате чего появляется уже известная нам интерференционная картина, состоящая из ярких и темных полос, наглядно демонстрирующая волновую природу света. Если увеличить мощность синего лазера, то интенсивность излучения, получаемого детектором, тоже возрастет. Одним словом, пока все складывается отлично.

Однако давайте теперь настроим частоту лазера. Будем уменьшать ее, сделав свет сначала зеленым, потом красным. Для нашего конкретного детектора при уменьшении частоты (до становления волны красной) электрический ток в какой-то момент внезапно пропадет, и мы станем лишены возможности регистрировать излучение. Уменьшая частоту, мы уменьшаем мощность лазера. Если рассматривать этот процесс в контексте знакомых нам волн в заливе, то чайка стала бы подпрыгивать реже. Следовательно, нет ничего удивительного в том, что ток будет меньше, хотя все-таки странно, что он исчезает так внезапно.

Но ничего, мы же можем компенсировать уменьшение частоты увеличением интенсивности (это соответствует тому, что чайка подпрыгивала бы выше, даже если бы она подпрыгивала реже). Однако результат нас разочаровывает, потому что при увеличении интенсивности ничего не происходит.

После того как частота света падает ниже определенного значения (это значение зависит от имеющегося у нас детектора и материала, из которого он сделан), электрического тока нет независимо от того, насколько сильно мы будем повышать интенсивность света. Это невозможно объяснить, если мы рассматриваем свет как непрерывные волны. Энергия есть – так почему же она не высвобождает электроны?

Такой результат можно объяснить, только если свет приходит не в виде непрерывной волны, а небольшими порциями – квантами – энергии (что больше похоже на отправляемые нашим экипажем письма домой, а не на радиоволны, которыми пользуются в экстренных ситуациях). Световые «порции» называются *фотонами*. Одиночный фотон – это квант света. Такое объяснение А. Эйнштейн опубликовал в 1905 году⁸. Энергия индивидуального фотона зависит от его частоты. Так, синие фотоны более «энергичны», чем красные. Общее количество энергии лазерного луча – это число фотонов, умноженное на энергию индивидуального фотона. Когда мы увеличиваем мощность красного лазера, мы увеличиваем темп испускания фотонов, но энергия каждого фотона остается той же самой, потому что частота света не меняется.

⁵ Это различие стимулировало развитие квантовой механики и вдохновило Альберта Эйнштейна на прорывной результат: ученый реанимировал идею света как частицы.

⁶ Обычно указывают не одно значение, а диапазон: для синего цвета – 440–485 нм. – *Прим. перев.*

⁷ Более точно, 632 ТГц. – *Прим. перев.*

⁸ *Annalen der Physik*, 17 (1905), p. 132–148; см.: <http://einsteinpapers.press.princeton.edu>.

И наоборот, если мы будем уменьшать мощность синего лазера, то тем самым мы будем сокращать число фотонов, но не энергию каждого индивидуального фотона. Таким образом, как заключил в своей статье Эйнштейн, действительно «нет нижнего предела... для интенсивности возбуждаемого света, ниже которого свет оказался бы не в состоянии действовать как возбудитель». В нашем случае слова «действовать как возбудитель» означают, что свет порождает электроны и таким образом регистрируется нашим детектором. По-видимому, это положение звучит на немецком языке более элегантно, но в любом случае этот результат согласуется с экспериментом. Другими словами, даже если интенсивность лазера уменьшена настолько, что он испускает всего один фотон в год, то интерференционная картина светлых и темных полос все равно проявится: одно пятно в каждый момент времени. Свет приходит в форме дискретных пакетов, как если бы он состоял из частиц, но демонстрирует свойство интерференции, как если бы он был волной.

Соберем воедино все вышесказанное. С одной стороны, есть свидетельства того, что свет проявляет свойства волны, такие как интерференция. С другой стороны, свет приходит дискретными пакетами с энергией, зависящей от частоты света, а это означает, что в рамках наших обыденных представлений свет – и не волна, и не частица. Свет есть нечто совершенно иное. При низких интенсивностях и высоких частотах мы проникаем в новую область физики, и нам требуется набор понятий для ее описания. Фотоны есть возбуждения в квантовом поле. Квантовое поле – это море, по которому идет наша лодка.

Лоцман на этом этапе разъяснений остался чрезвычайно собой довольным, сумев пленить своими доводами всю команду. Его демонстрация привлекла наше внимание и приблизила нас к пониманию того, что такое квантовое поле и как оно работает. Но нам надо знать больше. И лоцман очень рад нам все рассказать.

IV. Рассекая квантовое поле

В физике «поле» – это произвольное число, поставленное в соответствие с любой точкой пространства. Например, магнитное поле обладает напряженностью во всех точках вблизи магнита, и это можно продемонстрировать, поместив поблизости мелкую железную стружку. У Земли есть гравитационное поле, определенное в любой точке, и это поле можно измерить, наблюдая эффект воздействия этого поля на помещаемые в эти точки материальные объекты. Гравитационные силы удерживают нашу лодку на поверхности воды, они же заставляют дождь падать вниз с плывущих в вышине облаков. Без гравитационного поля нет понятий «верх» и «низ». Квантовое же поле переносит эту идею на исследование малых объектов.

Вернемся к эксперименту с лазером, двумя щелями и детектором и посмотрим, как с помощью квантового поля можно описать все происходящее. Величина электрического и магнитного поля в их квантовой версии говорит нам, какова вероятность обнаружения фотона. Квантовое поле распространяется и движется как волна, оно обладает частотой и длиной волны и может проявлять интерференционные и другие свойства, характерные для волн. С другой стороны, квантовое поле характеризует вероятность обнаружить фотон в некоторой точке пространства. Энергия и импульс фотонов определяются частотой и длиной волны квантового поля. Таким образом, детектор может регистрировать индивидуальные фотоны по одному за один раз, но их распределение со временем будет создавать интерференционную картину ярких и темных полос, которые мы наблюдаем.

Рассматриваемая нами сейчас квантовая теория поля носит название «*квантовая электродинамика*» (КЭД). Ее основы были разработаны Ричардом Фейнманом, Джулианом Швингером и Син-Итиро Томонагой в 1940-х годах. Название этой теории характеризует ее суть: она трактует свет как переносимый фотонами (поэтому «квантовая») и описывает движение электрических и магнитных полей (поэтому «электродинамика»). Квантовая электродинамика – это один из столпов так называемой стандартной модели физики частиц, и мы познакомимся с ней в наших путешествиях.

Наряду с описанием кажущихся противоречий в нашем эксперименте концепция квантового поля может предложить и нечто большее. Электроны также являются возбуждениями квантового поля. Другими словами, электроны тоже обладают свойствами волны, и эти свойства действительно наблюдаются в экспериментах с интерференцией, подобно тем, что мы проводили для фотонов. Таким образом, эти свойства – как раз то, что нам нужно для понимания внутренней части земли Атома, когда мы там окажемся, а также для понимания химических свойств элементов.

Кроме того, квантовая теория поля объясняет двойной смысл долготы на той карте, которую мы принялись рисовать, начав наше путешествие. Так, при движении слева направо, с запада на восток, мы повышаем энергию и уменьшаем размеры. На первый взгляд это выглядит странным, потому что высокие энергии – это большие массы, а последнее, в свою очередь, обычно означает увеличение размера. В повседневной жизни так и есть: тяжелые предметы часто (хотя и не всегда) оказываются больше, чем легкие⁹. Но для фундаментальных частиц в квантовой теории все как раз наоборот. Высокая энергия соответствует высокой частоте, т. е. короткой длине волны. Как мы видели в гавани, длина волны определяет размер самого маленького объекта, который в принципе поддается наблюдениям. Таким образом, чтобы наблюдать более мелкие объекты, необходима большая энергия. Объекты, которые мы

⁹ Именно по этой причине на некоторых наглядных физических схемах тяжелые частицы изображаются большими шариками в сравнении с более мелкими шариками, обозначающими более легкие частицы, – например, электрон.

обнаруживаем, путешествуя на восток, обладают все большими и большими массами, но тем не менее они становятся все меньше и меньше в размерах по сравнению с объектами на западе.

Достижение квантовой теории поля заключается в построении необходимого для описания природы нового объекта, обладающего как свойствами частицы, так и свойствами волны.

Лецман закончил свой рассказ и возвращается в рулевую рубку, а команда поднимает якорь и готовится к отплытию. Мы все еще под впечатлением того, что услышали. Квантовая теория поля сильно противоречит нашим интуитивным представлениям о том, как должны себя вести физические объекты. Существует еще один метод, который может пригодиться для объяснения происходящего. Ричард Фейнман, один из создателей КЭД, помимо всего прочего, обладал большим талантом популяризатора. Он создал концепцию, которая называется «интеграл по траекториям», и она стала не только частью математического аппарата его теории, но и помогла ее объяснить неспециалистам¹⁰. Фейнман говорит о частицах, которые путешествуют по всем возможным путям между двумя точками, перенося с собой так называемую *вращательную фазу*. Он изображал эту фазу маленькой стрелкой. Стрелки вращаются при движении частицы, и число вращений в секунду определяет частоту, ассоциированную с этой частицей. По аналогии с этой картиной наша лодка плывет одним из множества путей, пролегающих от порта Электрон до земли Атома. Корабельные часы лодки отсчитывают секунды и минуты нашего путешествия. В отличие от нашей лодки, описываемые Фейнманом частицы – это квантовые частицы, и поэтому каждая из них может потенциально проходить все возможные пути, случайным образом и в любых направлениях. Для расчета вероятности того, что частица действительно попадет из точки А в точку Б, в квантовой теории необходимо учесть все возможные маршруты этой частицы. Для получения фактической вероятности того, что частица окажется в точке Б, необходимо просуммировать все возможные пути, выходящие из А и приходящие в Б. Если вам это кажется странным, то потерпите. Дело в том, что именно на этом этапе проявляет себя квантовая неопределенность поведения очень маленьких объектов. Такое «суммирование по всем путям» называется *интегралом по траекториям*.

Ключевая идея заключается в том, что нужно учитывать направления введенных стрелок. Вспомним, что стрелки при движении частиц вращаются, как и стрелки часов на нашей лодке. Очевидно, что для путей разной длины стрелки, в общем случае, будут указывать в разном направлении, когда частица доберется в точку Б (потому что у стрелок будет больше или меньше времени для вращения). Направление стрелки во многом аналогично такой характеристике волны, как ее высота в гавани. Так, если две стрелки указывают в одном направлении, то они складываются в одну, более длинную стрелку. Если же они указывают в противоположных направлениях, то их совместный вклад отсутствует, потому что их сумма равна нулю. С помощью стрелок удалось отразить уже известное нам волновое свойство: уравнивание вклада двух стрелок аналогично встрече в некоторый момент времени пика и провала двух волн, которые взаимно уничтожают друг друга (и чайка сидит на спокойной воде).

В общем случае имеется огромное количество возможных путей из А в Б (включая и такие, на которых частица изменяет массу, и даже такие, где частица движется назад во времени!). Причем для любого маршрута обычно найдется такой, который заканчивается стрелкой, ориентированной в противоположном направлении, – другими словами, оба пути «отменяют» друг друга. Рассуждая таким образом, можно распределить все пути попарно и показать, что они не дадут почти никакого вклада в итоговую вероятность прибытия частицы в точку Б. Единственное место, где такая процедура не будет работать, – это область вблизи кратчайшего пути между точками А и Б. Кратчайший путь частицы – это такой, проходя по которому стрелка поворачивается наименьшее количество раз, и для всех подобных маршрутов стрелки

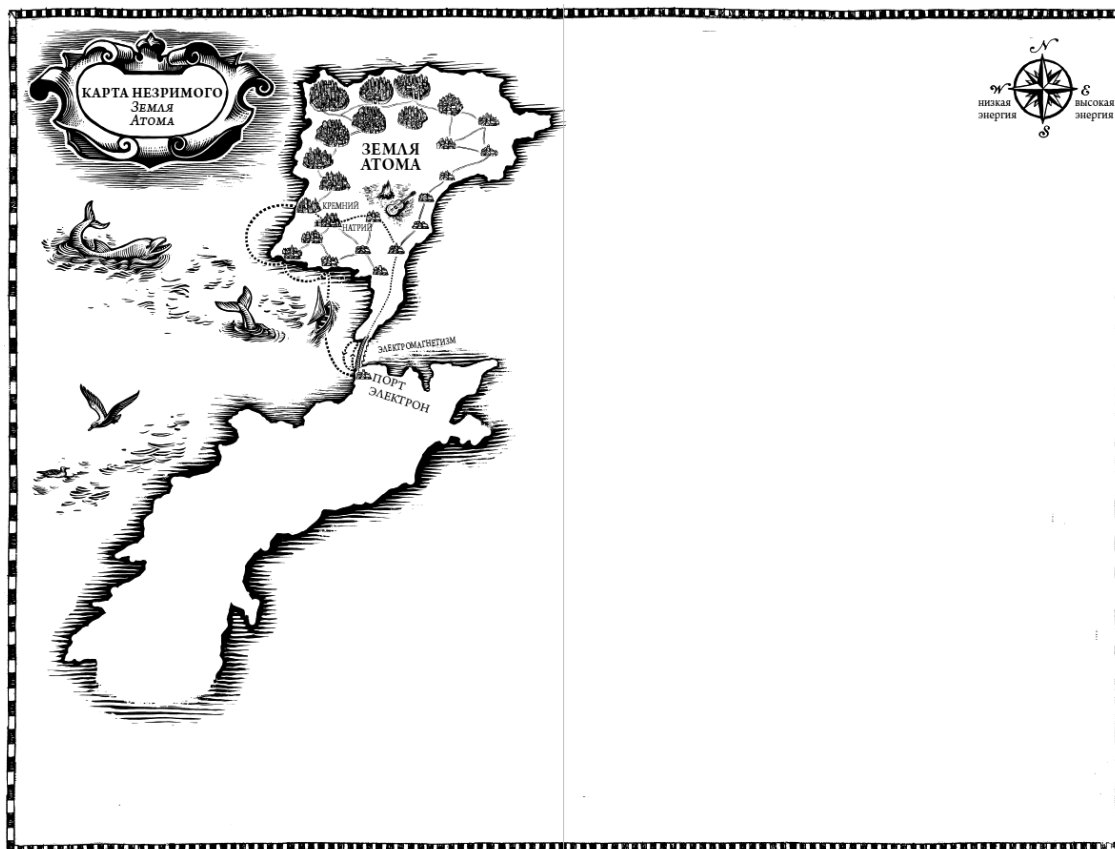
¹⁰ QED: The Strange Theory of Light and Matter (1985).

будут указывать в одном и том же направлении¹¹. Поскольку стрелки ориентированы почти одинаково, они складываются, и итоговый результат суммирования по всем путям определяется именно их вкладом. Вклад же от почти уравнивающих друг друга остальных стрелок пренебрежимо мал. Таким образом, мы можем определить наиболее вероятное поведение частицы и вычислить соответствующую вероятность ее попадания из пункта А в пункт Б. Если мы установим какое-нибудь препятствие, преграждающее кратчайший путь, например экран со щелями (см. выше), то придется пересчитать сумму по траекториям (т. е. интеграл по траекториям). При этом частица будет вести себя по-другому, подвергаясь интерференции, дифракции и другим волновым эффектам, – в точности так, как мы наблюдали в нашем эксперименте. Выполнив математические вычисления, мы получим результат, согласующийся с экспериментом, и этот результат включает в себя не только волновые, но и корпускулярные характеристики частицы, например явление фотоэффекта.

Все это трудно сразу усвоить, и как только лоцман покидает нас, члены команды возвращаются к своим привычным занятиям с задумчивыми лицами. В землях, которые мы будем исследовать, мы столкнемся с объектами, которые противоречат нашим обыденным представлениям о волнах и частицах. Но тогда что представляют собой в действительности эти объекты? Нас ждет неизведанная область. Мы будем продолжать использовать слова «частица» и «физика частиц», но при этом будем помнить, что встреченные нами частицы будут сильно отличаться от тех, которые мы раньше себе представляли. Ведь теперь мы знаем, что частицы – это возбуждения энергии квантовых полей. Концепция квантового поля широко распространена в современной физике и очень полезна для той карты, которую мы хотим начертить. Мы будем плыть по океану, в котором разбросаны материки и континенты, представляющие собой разные физические теории, которые мы будем исследовать в нашем путешествии. Лодка – это, конечно, просто лодка, и она ведет себя как большая частица, а не как квантовое возбуждение. Если ее маршрут и покажется кому-то странным, то он не исчезнет, складываясь с другой квантовой версией движения этой же лодки, в которой часы будут показывать другое время. Тем не менее, штурман очень постарается избрать кратчайший путь, который приведет нас к земле Атома.

¹¹ Этот эффект можно сравнить с топографией местности, где рельеф представляет собой долину среди гор. По обеим сторонам долины примыкающие к ней области обладают разными высотами из-за наклона, но у основания долины – области, где высота минимальна, – поверхность почти плоская, и смежные области имеют почти одинаковую высоту. Точно так же все пути вблизи пути с минимальным числом поворотов стрелки обладают примерно одинаковым числом поворотов стрелки и поэтому складываются.

Путешествие II Земля Атома



Подходим к берегу, населенному атомами.

•

Мертвые мыши, Солнце и стандартная модель в химии.

•

(Не говоря уже о молекулах).

•

Короткое путешествие назад.

•

Внимание, электрон! А лоцману лучше помолчать.

•

К земле Атома.

•

Планеты или пудинги?

•

Музыка земли Атома.

•

V. АТОМЫ

Будем готовы к тому, что объекты, с которыми мы столкнемся, будут странной смесью волны и частицы. И с этой мыслью мы подходим к берегам земли Атома с уверенностью, но не без волнения; мы полны жажды познания и, как нам кажется, вполне подготовлены для исследования этой земли. Мы высаживаемся на берег и далее продолжаем путь пешком.

Атом – это мельчайшая неделимая частичка химического элемента. Вспомните стекло-волокно нашей лодки и кремний, из которого сделаны эти волокна. Мы уже мельком заглянули внутрь атома кремния, понаблюдали за ядром и особенно за электронами вокруг ядра. Если бы мы глубже проникли в атом кремния, то увидели бы много интересного¹². Однако это был бы уже не кремний. Материалы, с которыми мы встречаемся в быту, состоят из разных химических элементов, каждый из которых представляет собой атомы разного вида, связанные между собой в молекулы. Идея о существовании неделимых «строительных кирпичиков» вещества восходит еще к древним грекам, но подтвердить, что атомы действительно существуют, удалось только в результате тщательных исследований на протяжении двух последних столетий. Большая часть этих исследований была сделана не напрямую, с помощью инструментов с высокой разрешающей способностью, способных зондировать микроскопические структуры при изучении свойств разных веществ и определении того, как они сочетаются и взаимодействуют друг с другом, а также используя метод их точного взвешивания. Большая часть химических элементов была открыта в период с 1745 по 1869 год. Исследователи пользовались самыми разными методами: пробовали их на вкус, нюхали, взвешивали или просто наблюдали за разными веществами и продуктами всевозможных реакций между ними.

Например, несколько ученых, независимо работавшие в 60-е годы XVIII века, выяснили, что воздух содержит две основные компоненты, одна из которых способствует горению и делает мышей более активными и здоровыми, а вторая гасит огонь и душит мышей. В 70-е годы того же века «мышедружественный» газ, который также оказалось возможным получать путем нагревания окиси ртути, был идентифицирован как элемент кислород. Шотландский студент Даниэль Резерфорд¹³ догадался, что «мышеубивающий» газ – это еще один элемент, азот, что и нашло отражение в его диссертации в 1772 году.

С помощью астрономических наблюдений было установлено, что в составе Солнца есть новый элемент, ранее на Земле не известный, выявленный благодаря особым частотам излучаемого света. Этот элемент был назван гелием в честь Гелиоса – греческого бога Солнца. Позже этот элемент был замечен в газах, испускаемых Везувием.

В 1895 году шведские химики Пер Теодор Клеве и Нильс Абрахам Ланглет отметили, что такой же газ выделяется в результате растворения некоторых минералов в кислоте, и смогли достаточно хорошо изолировать этот газ, чтобы измерить его атомную массу.

Джон Дальтон – химик, физик и метеоролог, который жил и работал в XIX веке в Манчестере, провел серию чрезвычайно точных экспериментов¹⁴. Эти эксперименты состояли в комбинировании, взаимодействии и взвешивании разных газов и других веществ. В результате было установлено, что некоторые материалы, вовлеченные в разные химические реакции, всегда сочетаются в некоторых фиксированных пропорциях. Предположение ученого состояло в том, что реакции взаимодействия на самом деле происходят между крошечными составляющими каждого вещества. Эти крошечные «кирпичики» обладали, по его мнению, способ-

¹² И это действительно так!

¹³ Будущий врач, химик и ботаник. – *Прим. перев.*

¹⁴ Сложно удержаться от мысли о том, что таким образом он пытался отвлечься от изучения хмурой манчестерской погоды.

ностью объединяться и распадаться вполне определенным способом для образования новых устойчивых «кирпичиков» уже какого-то нового вещества.

Так, двуокись углерода состоит из комбинации двух частей кислорода и одной части углерода. Вода может быть сделана из двух частей водорода и одной части кислорода. Если использовать правильное соотношение, то исходные вещества полностью превратятся в новое вещество. Если вы ошибетесь, то обнаружите какой-то остаток после процессов взаимодействия.

В 1869 году русский химик Дмитрий Иванович Менделеев упорядочил все известные элементы в соответствии с их химическими свойствами и поместил их в периодическую таблицу. Эта таблица представляла собой нечто гораздо большее, чем просто удобный способ перечислить элементы. Дело в том, что группировка элементов по их способности взаимодействовать с другими элементами и по их массам, как это сделал Менделеев, помогла выявить глубокую закономерность, отражающую внутреннюю структуру атомов. Более того, периодическая система Менделеева обладала предсказательной силой, т. е. могла предсказывать существование новых, еще не открытых элементов и заранее описывать их свойства: пробелы в первоначальной таблице указывали на «недостающие» элементы, которые были обнаружены позже. Эта таблица есть «стандартная модель» химии – в том смысле, что она служит истоком стандартной модели физики элементарных частиц.

Наше исследование земли Атома показало, что вещества, окружающие нас в обыденной жизни, на самом деле обладают сложной и красивой структурой, подчиняющейся определенным закономерностям. Они демонстрируют нам чрезвычайно интересное поведение, которое хотелось бы понять лучше. Но в какую сторону бы мы ни пошли по земле Атома, кого бы мы там ни спросили – все подтвердят, что для глубокого понимания сути вещей (экономики, экологии, взаимоотношений между обитателями) мы обязательно должны вернуться морем в порт Электрон.

VI. В недрах атома. Электрон

Позже, совершив небольшое морское путешествие назад и повторив наш прежний путь, мы снова швартуемся в порту Электрон. Мы пренебрегли уроком, данным нам лоцманом, но наш краткий визит в землю Атома показал, что нужно искать ответы здесь, в этом порту, прежде, чем углубляться в дебри земли Атома. Мы высаживаемся, надеясь избежать встречи со знакомым нам лоцманом, и рассредотачиваемся для получения дополнительной информации.

И вот что мы узнаем. Электрон – первая обнаруженная субатомная частица. Эти крошечные объекты впервые наблюдались как пучки так называемых *катодных лучей* – странного излучения, испускаемого металлами при нагреве. Некоторые исследователи считали, что эти лучи состоят из частиц, другие же полагали, что речь идет о распространении волн в эфире. Спустя два десятилетия после открытия этих частиц Дж. Дж. Томсон, работавший в Кембридже, в 1897 году утвердил статус электронов именно как частиц. Дело в том, что частицы имеют определенные массу и электрический заряд, из чего, в частности, следует, что отношение массы и заряда тоже имеет определенное значение. Чтобы доказать, что катодные лучи состоят из частиц, Томсон должен был показать, что отношение массы к заряду всегда одинаково, независимо от того, какой материал был использован в качестве источника катодных лучей. Положительный ответ послужил бы критерием того, что электрон – действительно частица. Первым ключевым доказательством стал тот факт, что катодные лучи отклонялись в электрическом и магнитном полях именно таким образом, как это ожидалось для пучка заряженных частиц. Ни одна волна, известная в то время, не являлась переносчиком заряда, и поэтому это могло считаться хоть и косвенным, но сильным доказательством в пользу трактовки электрона как частицы. Вторую часть доказательства Томсон получил, изучив, как ведет себя в вакууме траектория пучка катодных лучей под действием электрического и магнитного полей. Томсон смог настроить поля таким образом, что они взаимно компенсировали друг друга. Путем такого регулирования можно было получить на выходе скорость пучка¹⁵.

Наконец, поскольку скорость известна, магнитное поле можно отключить, и степень отклонения пучка в электрическом поле поможет определить отношение заряда к массе¹⁶. Как отметил Томсон, для электрона отношение заряда к массе примерно в две тысячи раз больше, чем соответствующее соотношение для иона водорода, который представляет собой одиночный протон – легчайшую частицу из известных на тот момент. Сказанное означает, что или заряд электрона сильно превышает заряд протона, или масса электрона гораздо меньше массы протона.

Существует много способов выяснить, какое из двух предположений верно. Вероятно, наш старый друг лоцман, попадись мы ему снова, захотел бы нас подразнить и предложил бы подвешивать в электрическом поле маленькие заряженные сферы. Электростатическая сила, действующая на заряженную сферу, зависит как от напряженности электрического поля, так и от наведенного электрического заряда сферы. Если сфера неподвижна (не падает и не поднимается), то электростатическая сила должна в точности компенсировать гравитационную силу, зависящую от массы сферы. Таким образом, если напряженность поля и масса сферы

¹⁵ Действующая на частицу магнитная сила зависит как от скорости этой частицы, так и от ее заряда, тогда как электрическая сила зависит только от заряда частицы. Следовательно, если добиться равенства магнитной и электрической сил, неизвестное значение заряда может быть удалено из соответствующих уравнений путем алгебраических преобразований – таким образом можно вычислить скорость частицы.

¹⁶ Знать скорость чрезвычайно важно, поскольку ее величина расскажет, как долго действовала на электроны электрическая сила при прохождении пучка между двумя пластинами. Степень отклонения пучков прямо пропорциональна величине заряда (большой заряд означает более продолжительное действие силы и, следовательно, большее отклонение пучка) и обратно пропорциональна массе (большая масса означает большую инертность и, следовательно, меньшее отклонение пучка). Таким образом, отклонение пучка определяется отношением заряда к массе.

известны, то заряд может быть вычислен. Производя такие измерения и расчеты много раз, можно увидеть, что заряд сферы всегда кратен небольшой величине, которую будем называть e . Сферы могут нести заряд e , или $2e$, или $3e$, или сотни e , но никогда не половину e или еще какую-то дробную часть этой величины, называемой «заряд электрона»¹⁷.

Результатом всех этих доказательств стало утверждение о существовании крошечной частицы электрона, обладающей определенными массой и зарядом. Поскольку электроны намного меньше атомов, то разумно предположить, что прежде чем сформировать катодные лучи, они обитают где-то внутри атомов. Вот теперь мы действительно готовы вернуться на землю Атома и начать исследование ее внутренних областей.

¹⁷ Это очень кропотливый эксперимент, тем более что для него берут капли масла, а не сферы, которые первоначально были в распоряжении американского физика Роберта Милликана в 1910 году. Эксперимент проводится до сих пор, в основном безуспешно, во многих лабораториях – силами щурящихся и нетерпеливых аспирантов.

VII. Ядерные свойства

Знания, добытые нами в порту Электрон, позволяют нам уверенно ступить на землю Атома с готовностью понять некоторые особенности, которые мы там обнаружим. Но внутри атома должно ведь быть и что-то еще, помимо электронов. Электроны очень легкие по сравнению с целым атомом, и что-то должно отвечать за оставшуюся большую часть массы. Кроме того, атомы электрически нейтральны и, следовательно, в атоме должно быть что-то, несущее положительный заряд, чтобы компенсировать отрицательный заряд электронов. Что же это может быть за дополнительная составляющая атома и как по отношению к ней распределены электроны?

Первые инструменты, необходимые для дальнейшего исследования атома, были получены при открытии явления *радиоактивности*. Земля Атома лежит восточнее, а значит, для похода туда нам нужны более высокие энергии, чем те, что могут обеспечить нежные катодные лучи. К счастью, по причинам, которые станут ясны позднее, некоторые элементы испускают естественное радиоактивное излучение, и его энергия может быть весьма высока. Это и будет нашим средством передвижения, который поможет проникнуть в земли Атома.

Одна из наиболее распространенных естественных форм радиоактивного излучения – это *альфа-частицы*¹⁸. «Ударный десантный отряд» в составе Ганса Гейгера, Вальтера Мюллера и Эрнеста Резерфорда (снова в Манчестере) в результате решительных действий добился значительных – для того времени – успехов при разведке земель Атома. Ученые использовали пучок альфа-частиц, полученных в результате радиоактивного распада недавно обнаруженного тогда химического элемента радона, для бомбардировки атомов золота. Относительно высокая энергия альфа-частиц означает, что они в принципе пригодны для исследования мельчайших особенностей внутри атома. Идея заключалась в том, что альфа-частицы должны были отклоняться этими «субатомными особенностями», которые находились внутри атомов золота. Анализируя углы рассеяния и отмечая, насколько часто происходят такие рассеяния, можно изучить детали внутренней структуры атома.

Раньше никто не мог заглянуть внутрь атома, и было множество гипотез о том, что же там может происходить. Согласно одной из моделей внутренней структуры атомов (ее, по-видимому, предпочитал сам Резерфорд), электроны распределены в атоме, как изюм в сливовом пудинге. Кстати, как ни удивительно, в сливовом пудинге совсем нет слив (скорее всего, для объяснения этого курьеза существует какая-нибудь историческая «изюминка»). Представьте теперь то удивление, которое испытали Гейгер, Мюллер и Резерфорд, когда выстрелили пучком альфа-частиц в золотую фольгу. Если бы атом действительно обладал структурой сливового пудинга, то альфа-частицы прошли бы сквозь него с незначительными отклонениями. Но оказалось совсем иначе. В то время как большинство альфа-частиц проходили, почти не отклоняясь, некоторые из них отскочили назад, а другие были отклонены на гораздо большие углы, чем это ожидалось в простой модели диффузного – «пудингоподобного» – распределения вещества внутри атома.

Резерфорд красочно описал проведенный эксперимент: результат был подобен стрельбе 15-дюймовым снарядом по клочку салфетки с его последующим сногшибательным – в буквальном смысле слова – отскоком. Такой результат можно объяснить только одним образом: основная часть положительно заряженной массы атома сосредоточена в объеме, который в тысячи раз меньше размера всего атома.

Теперь мы знаем, что это – атомное ядро. Преобладающая часть массы любого ядра сосредоточена в объеме, который примерно в 10^{-15} раз меньше объема всего атома. Именно

¹⁸ Другая форма – это *бета-частицы*, то есть электроны, и *гамма-лучи*, то есть фотоны.

такая огромная концентрация вещества и приводит к тому, что альфа-частица отскакивает в сторону, противоположную той, откуда она прилетела.

Основная структура каждого атома такова: очень тяжелое ядро, окруженное облаком более легких электронов. Следующая часть нашего путешествия будет посвящена исследованию того, как эти электроны связаны с ядром; мы рассмотрим также далеко идущие последствия их связи.

VIII. Истоки химии

Все наши предыдущие исследования говорили нам, что большая часть массы атома сосредоточена в ядре. Существенно более легкие электроны «жужжат» вокруг ядра. Благодаря электромагнитным силам притяжения отрицательно заряженные электроны вынуждены оставаться поблизости от ядра, имеющего положительный заряд. Такая картина на первый взгляд напоминает миниатюрную Солнечную систему, в которой более легкие по сравнению с Солнцем планеты вращаются вокруг массивной центральной звезды. Но это только кажущаяся аналогия. Как мы уже знаем, электроны – это не классические частицы, и в рассматриваемом случае их квантово-механическая природа проявляет себя в огромной степени. Так, именно квантово-механические свойства электрона диктуют способ связи и реакции атомов при формировании молекул и более сложных соединений, а также объясняют структуру самой периодической таблицы Менделеева.

У разных элементов способность к взаимодействию зависит от того, насколько сильно электроны связаны с ядром атома. Когда мы исследуем землю Атома, посещаем атомы разных элементов, мы обнаруживаем, что эти атомы содержат разное количество электронов – такое количество, которое нужно, чтобы скомпенсировать положительный заряд разных ядер. Обнаруживаем мы и тот факт, что электроны не могут обладать произвольной энергией. Их энергии принимают значения строго из определенного набора, характерного для атомов определенного элемента. Именно этот набор энергий и определяет способность атома формировать молекулы и другие соединения с соседними атомами, а это, в свою очередь, лежит в основе всей химии и всего того, что следует из химических свойств элементов. Будучи от природы любопытными исследователями, мы горим желанием узнать, как все это работает и, прежде всего, какой механизм создает определенные энергетические уровни.

Обладающий определенной энергией электрон обладает и определенной длиной волны, связанной с энергией, как мы выяснили в нашем предыдущем путешествии. Электроны, свободно передвигающиеся по океанам, отмеченным на нашей карте, могут иметь любую длину волны и, следовательно, любую энергию. Ограничений нет. Однако, будучи ограниченными территорией земли Атома, плененные вблизи атомного ядра электроны утрачивают свободу в выборе возможных значений длины волны.

Тот факт, что для электрона разрешены только определенные значения энергий, приводит к ограничению длины волны. Осознав это, мы начинаем понимать, что же происходит с электронами.

Мы знаем по опыту, что существуют и другие ситуации, когда бывают доступны только некоторые определенные длины волн, например колебания гитарной струны. К счастью, на нашей лодке есть гитарист, который поможет нам наглядно это понять.

В гуще лесов, покрывающих землю Атома, мы находим полянку и разбиваем лагерь. Разжигаем костер, садимся вокруг него и замираем в ожидании, о чем поведаст нам гитара в тот час, когда стусятся сумерки и в тишине до нас донесется жужжащая песенка крошечных электронов, парящих в древесных кронах высоко над нашими головами.

Каждая нота музыкального инструмента соответствует определенной звуковой волне. Гитарная струна некоторой фиксированной длины порождает звучащую ноту. Эта нота определяется тем фактом, что точное число соответствующих ей полутонов должно вписаться в отведенное для струны пространство. Концы струны закреплены на струнодержателе и колках грифа и, следовательно, не могут вибрировать, как все остальные участки этой струны. Таким образом, волна на струне должна иметь неподвижные точки, расположенные на концах этой струны, и в них амплитуда колебаний равна нулю.

Как следствие из всего сказанного, не все длины волн могут реализоваться при таких колебаниях. Длины волн, равные длине струны, не запрещены: они обладают двумя фиксированными точками на каждом конце и одной фиксированной точкой в середине. Пики и провалы приходится на первую и третью четверти пути соответственно.

Теперь рассмотрим ситуацию, когда длина волны в два раза превышает длину гитарной струны, причем средняя часть струны колеблется вверх-вниз. Это будет самое низкое колебание струны, открытая нота гитары. Важный момент здесь – то, что запрещена волна любой длины, которая не допускает стационарную точку на каком-либо конце струны.

Именно так происходит и с электронами, когда их положение ограничено некоторой областью вблизи атомного ядра. Расстояние от электронов до ядра подобно расстоянию от струнодержателя до грифа на гитаре: оно тоже определяет фиксированные точки, за пределы которых электрон не может выйти и где волна, ассоциированная с электроном, стационарна. Вышесказанное означает, что для электрона допустимы только определенные длины волн, а из этого, в свою очередь, следует, что для электронов допустимы только определенные значения энергии. Наконец, последний факт объясняет своеобразие структур связности электронов с ядрами атомов, с чем мы столкнулись в земле Атома¹⁹.

Мы получили недостающую часть необходимой нам информации для понимания внутренних механизмов земли Атома. Существует строго определенный список допустимых энергетических уровней для электронов, находящихся в связанном состоянии внутри атома, – гармоник их орбит вокруг центрального массивного ядра. Разумно ожидать, что наиболее устойчивое состояние атома – это когда все электроны «сажаются» на уровень с наименьшей энергией. Другими словами, все электроны «дружно поют басом». Однако такого мы не наблюдаем. Каждый энергетический уровень позволяет, чтобы его занимали только два электрона, после чего он становится полностью заполненным: для всех остальных желающих вывешивается табличка «Нет свободных мест». Таким образом, другие электроны, стремящиеся занять места с минимальной энергией, вынуждены довольствоваться уже только оставшимися энергетическими уровнями, где ситуация снова повторится: будут взяты только два электрона, а остальным опять придется искать себе места на более высокоэнергетических уровнях²⁰. У атома в состоянии с самой низкой энергией все электроны занимают самые нижние допустимые энергетические уровни, а все уровни с более высокой энергией пусты. К примеру, у кремния 14 электронов находятся на семи нижайших энергетических уровнях, по два на каждом. Натрий имеет 11 электронов, которые заполняют нижайшие пять энергетических уровней, а шестой уровень заполнен наполовину: на нем один электрон и одно свободное место.

Таким образом, атомы создают «оболочки» из электронов. Энергетические уровни внутри таких электронных оболочек заполнены, снаружи – пусты, а посередине иногда бывают свободные места. Эта сложная структура из электронов и энергетических уровней определяет размер атома и его способность вступать в реакции и образовывать молекулы. Здесь сразу возникает множество вопросов. Например, почему именно два электрона приходится на один энергетический уровень? Почему не один или столько, сколько мы захотим? Этого мы еще не знаем. Но трудно переоценить важность сути самого открытия: энергетические уровни различны для одного атома, различны для разных атомов и даже для разных молекул, которые образуются при связи атомов друг с другом. Все это означает, что у нас есть способ определять составные части вещества по косвенным признакам, даже не дотрагиваясь непосредственно до них.

¹⁹ Уравнение, описывающее эти волны, называется *уравнением Шрёдингера*. Оно менее известно, чем одноименный кот, но фактически куда более полезно.

²⁰ Такое враждебное поведение носит название «принцип запрета»; его открыл Вольфганг Паули, один из первых исследователей земли Атома. С ним мы еще встретимся, хотя и не очень скоро.

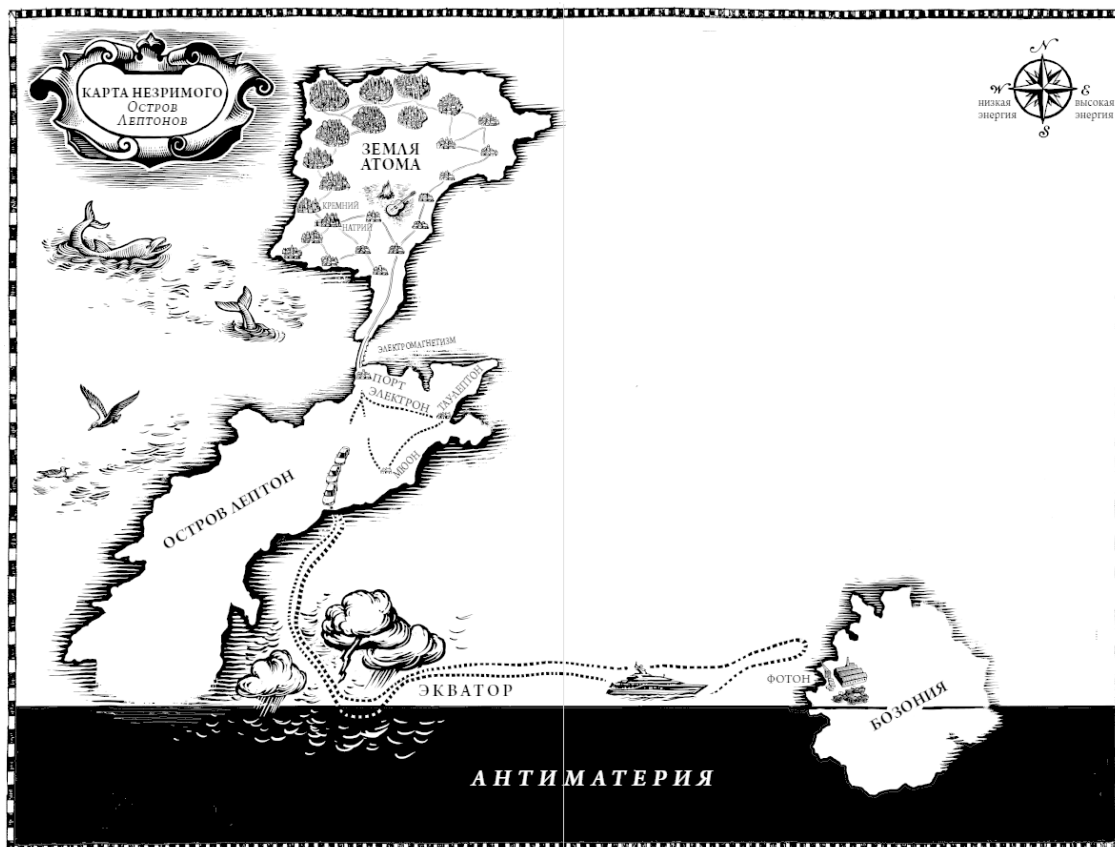
Когда электроны перепрыгивают с одного энергетического уровня на другой, они испускают или поглощают характерное количество энергии в виде фотонов света. Измерением величины этого излучения и определением, для каких атомов характерно то или иное излучение, занимается наука *спектроскопия*, и именно благодаря этой науке мы знаем, из чего сделаны Солнце, другие звезды и межзвездная пыль. Поскольку допускается существование только нескольких определенных энергетических уровней, могут существовать только вполне определенные скачки энергии. Таким образом, лишь некоторые определенные порции энергии фотона могут быть поглощены или испущены. Из-за этого в спектре появляются либо темные полосы (свет определенной длины проходит сквозь вещество, и эти длины волн фотонов поглощаются), либо светлые (свет испускается веществом при нагревании; например, свет натриевой лампы имеет желтую окраску). Желтый цвет, зафиксированный спектрометром, указывает на то, что основным компонентом таких ламп является натрий. Точно так же линии в спектре других веществ позволяют определить, из атомов каких видов состоит исследуемое вещество. Это обстоятельство объясняет характерные частоты света, ответственные за открытие гелия на Солнце.

Электронная структура атомов и молекул – детальная картография земли Атома – была открыта с помощью энергий порядка нескольких сотен или даже тысяч электронвольт (эВ)²¹. Понимание этой структуры имело решающее значение для того, чтобы подтвердить квантовую природу электронов и фотонов, а также выявить, какие элементы присутствуют в звездах и пыли далеких галактик. Это понимание воодушевляет нас и дает информацию для дальнейших исследований. Теория взаимодействия электронов и фотонов – *квантовая электродинамика* (КЭД) – стала первой частью разрабатываемой стандартной модели физики частиц. Как мы увидим в дальнейшем, точные атомные измерения сыграли важнейшую роль в становлении КЭД.

Земля Атома – отправная точка для нашего путешествия в дальние области физики элементарных частиц. Преодолеть тяготы пути нам поможет квантовая теория, которой мы попутно обзавелись. Следующим этапом нашего путешествия станет уже вошедшее в привычку возвращение в порт Электрон, но на этот раз мы вернемся туда по суше. Если сказать точнее, то мы вернемся даже не в сам порт, а в земли все еще неизвестного нам острова, на побережье которого этот порт расположен. Итак, достигнув южной оконечности земли Атома, мы обнаружили некий мост, а сразу за ним – что оказалось очень кстати – пункт проката автомобилей. Мы тут же пересекли мост, взяли машину и отправились по берегу острова, чтобы исследовать территорию вдали от порта Электрон.

²¹ 1 эВ – это энергия электрона, который ускоряется в электрическом потенциале в 1 вольт. Так, батарея в 12 вольт может ускорить электрон до энергии в 12 эВ. Чтобы достичь миллионов эВ, нужна энергия от нескольких сотен тысяч таких батарей или ядерная энергия, образующаяся в результате ядерного распада.

Путешествие III Остров Лептонов и дороги, уходящие в даль



Мы тронулись в путь.

•

Максвелл.

•

Объединим силы и двинемся дальше.

•

Plus ça change, plus c'est la même chose²².

•

*Относительность, квантовая механика
и новый корабль, который плывет на юг.*

•

Решение старой задачи и новые миры.

•

На восток!

²² «Чем больше все меняется, тем больше все остается по-старому (фр.)» – крылатая фраза французского писателя и журналиста Альфонса Карра. – Прим. изд.

IX. Электромагнетизм

Сила, соединяющая электрон, атомное ядро и многие другие объекты на нашей карте – это *электромагнетизм*. Электромагнетизм описывается КЭД – квантовой теорией, разработанной Фейнманом, Швингером и Томонагой. Об этой теории мы уже кратко говорили выше. КЭД играет ключевую роль в устойчивости земли Атома и обеспечивает существование не только того моста, через который мы недавно проходили, но и всех дорог, которые теперь открываются перед нашим взором. Электромагнитная сила переносится фотоном – квантом света, с которым мы уже сталкивались в наших предыдущих путешествиях. Теперь мы исследуем остров, на котором порт Электрон был отправной точкой нашего первого путешествия, и подробно изучим, как здесь все устроено. Это будет поразительное исследование – оно изменит привычное видение пространства и времени.

Путешествуя по земле Атома, мы увидели, что электроны связаны с ядром сложной серией энергетических уровней, потому что они представляют собой квантовые частицы с отрицательным зарядом, а ядро обладает положительным зарядом. Чтобы попасть достаточно далеко на восток и увидеть само ядро, нам понадобится энергия альфа-частиц, которая составляет несколько миллионов эВ. Чтобы увидеть электроны вокруг ядра, нужно меньше энергии: нескольких тысяч эВ будет достаточно; это так называемая *энергия связи* электронов в типичном атоме²³.

Энергия связи – это важная концепция, которая будет часто находить отображение на нашей карте. Энергия частиц, входящих в один объект, не равна сумме энергий отдельных частиц в составе этого объекта. Это означает, что необходимо добавить энергию, чтобы разорвать объект.

Рассмотрим в качестве аналогии запуск космического корабля с поверхности планеты. Космический корабль и планета представляют собой связанную систему. Чтобы разъединить их, вам придется вложить много энергии в виде высвобождаемого ракетного топлива, чтобы достичь так называемой *скорости убегания*. Точно так же, чтобы удалить электрон от атома, то есть ионизировать его или, в конечном итоге, создать плазму, в которой электроны и ионы будут летать свободно, нужно добавить энергию. Если вы хотите высвободить один из самых сильно связанных с ядром электронов, вам нужно приложить достаточно много энергии, иначе ядро не отпустит электрон.

Энергия связи определяет долготу земли Атома на нашей карте. Притягивающая сила электромагнетизма – это и есть сила, ответственная за энергию связи. Фактически, взаимодействие, которое мы называем электромагнетизмом, – это объединение двух сил, которые изначально считались самостоятельными. Так, существует электростатическая сила, благодаря которой два электрически заряженных объекта притягиваются или отталкиваются друг от друга. Если есть два объекта и они оба заряжены либо отрицательно, либо положительно, то они будут отталкивать друг друга. Если один заряжен отрицательно, а другой – положительно, то они будут притягивать друг друга. Большинство объектов электрически нейтральны, потому что положительный заряд атомных ядер в них в точности уравнивается и, следовательно, компенсирует отрицательный заряд электронов. Однако если потереть воздушным шариком волосы на голове, можно добиться того, что часть электронов перейдут с одной стороны шара на другую, что приведет к разбалансировке заряда и, следовательно, электростатическому отталкиванию²⁴.

²³ Энергия связи для разных атомов меняется в очень широких пределах, начиная с нескольких эВ. – *Прим. перев.*

²⁴ Более реалистичный пример наведения сильного электростатического заряда – это катание с детской пластиковой горки. – *Прим. перев.*

В дополнение к электростатической силе, если два электрически заряженных объекта движутся друг относительно друга, – например, электроны переносят ток в разных направлениях по двум проводникам, – они будут испытывать действие магнитной силы, которая зависит не только от заряда этих объектов, но и от их скорости²⁵. Магнитное поле Земли будет искривлять электрические токи, а само магнитное поле вызвано наличием токов внутри земного ядра.

Однако с этими двумя силами для нас пока остается много неясного. И электрические, и магнитные силы зависят от электрического заряда, поэтому они должны быть связаны друг с другом. Но как? Другой вопрос: а мгновенна ли связь между заряженными частицами, или что-то переносит ее с конечной скоростью? Если верно последнее, то что это может быть и как быстро оно путешествует? Как ведет себя эта сила, когда расстояние между зарядами меняется, или когда заряды движутся, или когда заряды вращаются? Это вовсе не какие-то малозначительные детали. Ответы на все эти вопросы уходят глубоко, в самое сердце физики. Правильное понимание ответов заключается не только в том, что мы – как обычно! – просто хотим знать, как все происходит. Детальное поведение электронов при действии этой силы важно понимать еще и потому, что оно есть ключ к большинству процессов в реальном мире, в том числе в мире наших технологий, не говоря уж о биологических процессах. Даже трюмные насосы нашей маленькой лодки работают с помощью электрического двигателя.

В нашем путешествии мы ориентируемся на показания стрелки компаса. Каждый раз, когда мы сверяемся с ее показаниями, я делаю заметки на своем ноутбуке, напичканном всевозможными электронными технологическими элементами. Закончив очередную запись, я отправляю ее моему издателю при помощи хорошо всем известного беспроводного интернета *Wi-Fi* или, возможно, при помощи серии сигналов с мобильного телефона. Любой, кто придет после меня в будущем, сможет прочесть мои слова при помощи света, даже если у него не будет фонетического шрифта или аудиоверсии моего послания. Информация, которую я посылаю, воспринимается на универсальном языке уравнений, связывающих между собой электрические заряды, а также электрические и магнитные поля.

Все это – электромагнетизм. Исходные уравнения, которые объединяют электрические и магнитные силы и ведут к созданию и КЭД, и оптики, и радио, и *Wi-Fi*, – это уравнения Максвелла. Они были опубликованы шотландским физиком Джеймсом Клерком Максвеллом в «Философских трудах Королевского общества» в 1865 году²⁶.

Уравнения Максвелла связывают магнитное и электрическое поля друг с другом, а также с электрическим зарядом и током. Из этих уравнений, в частности, следует, что электрическое и магнитное поля заставляют электрические заряды двигаться. Кроме того, электрические заряды создают электрические поля, а магнитных зарядов не существует. И, наконец, уравнения Максвелла указывают на то, что изменения магнитных полей приводят к появлению электрических полей и наоборот. Уравнения дают точное описание, как происходит все вышеописанное. В них содержится тот факт, что единственный способ изменения величины электрического заряда в заданном объеме – это наличие электрического тока, который забирает или вводит заряд. Заряд не может просто исчезнуть или появиться из ниоткуда: он сохраняется.

Уравнения выглядели очень многообещающими. В них Максвелл собрал вместе ряд уже известных законов, которые использовались для описания разных экспериментальных результатов. К примеру, Майкл Фарадей, работавший в Королевском институте Лондона в 1831 году, открыл, что перемещение магнита сквозь петлю заряженного проводника приводит к появлению электрического тока – эффект, называемый *электромагнитной индукцией*. Максвелл

²⁵ Вспомните, что именно благодаря балансу этих двух сил Дж. Дж. Томсон обнаружил электрон.

²⁶ Оригинальная рукопись была представлена в 1854 году, но проходила долгое рецензирование, что хорошо знакомо ученым во всем мире. Сохранилось письмо Уильяма Томсона (впоследствии лорда Кельвина), датированное мартом 1865 года, в котором он извиняется за медлительность своей рецензии и пишет, что прочитал большую часть работы и что она представляется ему довольно неплохой или, по его словам, «определенно пригодной для публикации».

встроил закон электромагнитной индукции Фарадея в то, что может считаться «великой теорией объединения» электричества и магнетизма, включив в нее и описание того, каким образом заряды притягивают друг друга и каким образом магнитное поле генерируется электрическим током.

Собирая вместе и объединяя существующие законы, такие как закон индукции Фарадея, Максвелл также вывел, каким образом изменение электрического поля порождает магнитное поле, даже в отсутствие зарядов и токов. Удивительно то, насколько полно и глубоко эти уравнения смогли раскрыть физические принципы и богатство реальных физических явлений.

Важно отметить: уравнения Максвелла показывают, что электрическое и магнитное поля могут существовать даже при отсутствии электрических зарядов. Изменение электрического поля ведет к изменению магнитного поля, что, в свою очередь, приводит к еще большему изменению электрического поля и т. д. Математически это выражается в том факте, что уравнения могут быть переписаны в виде волнового уравнения, описывающего бегущую волну (с которой мы встречались раньше, наблюдая за чайкой на поверхности залива). В силу того, что электрическое и магнитное поля могут поддерживать бегущую волну, эти поля могут переносить энергию и информацию. Скорость этих волн можно вычислить из уравнения, и она составит 300 тысяч км в секунду – скорость света! Эти волны, фактически, и есть свет – электромагнитное излучение. На языке квантовой теории это – фотоны. Они встречаются во многих формах: видимый свет, радиоволны, *Wi-Fi*, рентгеновское излучение и др. Все эти волны по-разному взаимодействуют с веществом, по-разному поглощаясь и отражаясь разными материалами. Однако все эти различия полностью обусловлены различием в длинах волн.

Фотоны будут сопровождать нас на всем пути от самых низких энергий на западе к самым высоким на юге. Фотоны – это сеть наших дорог на карте, которые соединяют все, что несет электрический заряд. Иногда эти наши «знакомые» будут менять свой облик – видимый свет так непохож на гамма-лучи. Но с точки зрения уравнений Максвелла – и КЭД – все фотоны есть волны электромагнитного поля.

Х. Инвариантность и относительность

Ключевую роль в нашем исследовании земель незримого играют уравнения. Они связывают различные объекты этих земель друг с другом и дают новое представление о том, как эти объекты себя ведут, – это мы видели, говоря о смысле волновых уравнений. Пожалуй, еще нигде так не проявлялась суть этих уравнений, как на тех дорогах, на которые мы теперь ступили. Уравнения Максвелла содержат настолько мощный ресурс познания окружающих нас территорий, что они с избытком вознаградят нас за то пристальное внимание, которое мы им уделили.

Уравнения Максвелла «работают» в трех измерениях, и они связывают поля, которые влияют друг на друга в разных направлениях. К примеру, электрическое поле в направлении с севера на юг зависит от поведения магнитного поля в направлении с востока на запад. Максвелл выписал все компоненты полей во всех возможных направлениях, получив 20 отдельных уравнений. Быть может, именно поэтому лорду Кельвину потребовалось много времени, чтобы прочесть соответствующую статью.

Существует более элегантный способ записи той же информации, и он укажет на новые важные особенности, которые весьма пригодятся нам в путешествии по физическим просторам. Итак, уравнения могут быть записаны всего в четыре строки²⁷ с использованием математических объектов, называемых *векторами*. Поговорим об этом подробнее. Число – это базовая математическая концепция, которая может быть использована для описания разных физических параметров, размера или величины чего-либо, например веса машины, на которой мы сейчас путешествуем, или температуры двигателя, когда машина преодолевает крутой склон. Вектор же – это математическое понятие, которое может описывать объекты, обладающие как величиной, так и направлением, подобно стрелке-указателю. К примеру, скорость – это вектор. Вместо того, чтобы рассуждать, насколько быстро едет наша машина при движении с севера на юг и с востока на запад, мы можем рассматривать ее вектор. Длина вектора – это скорость машины, а угол указывает направление движения. Аналогично электрическое поле имеет величину и направление и поэтому может быть описано вектором.

Векторная форма записи уравнений Максвелла оказалась полезной не только с точки зрения экономии чернил. Такое лаконичное представление помогло выявить интересную математическую симметрию в этих уравнениях: они не меняются при изменении угла и ведут себя аналогично поведению сферы при вращении. Другими словами, если я поворачиваю все векторы так, что указывавшие прежде на север станут теперь указывать на восток, или на юго-запад, или еще куда-нибудь, ничего не изменится: те же уравнения будут верны. Говоря языком физики и математики, в этом случае уравнения «инвариантны» относительно вращений²⁸. Если мы повернем нашу машину и сменим направление движения с востока на север, то уравнения Максвелла останутся теми же.

Поиск инвариантностей и симметрий, подобных обнаруженным нами для уравнений Максвелла, представляет собой одно из вернейших руководств в поисках разумного маршрута при путешествии по землям незримого. В дополнение к вращательной инвариантности, в уравнениях Максвелла есть и еще одна, скрытая, инвариантность, а именно: уравнения не меняются при изменении скорости. Такая инвариантность относительно изменения скорости далеко не очевидна. Действительно, есть уравнения, дающие связь движущегося электрического заряда

²⁷ Именно в таком виде они представлены на постаменте статуи Максвелла возле Королевского общества в Эдинбурге.

²⁸ Именно поэтому, кстати, мы смогли сэкономить на чернилах: когда мы объединяем вместе все компоненты в векторную форму и выписываем уравнения с помощью этих векторов, то никакие направления векторов в эти уравнения не входят. Течение физических процессов не зависит от их направления.

(или, что то же самое, электрического тока) и порождаемого этим движением магнитного поля. Если я меняю свою собственную скорость, то, получается, я меняю и видимую скорость тока. Кажется логичным и то, что в принципе я могу даже догнать ток, что с моей точки зрения станет эквивалентно его отсутствию. И что же, в таком случае, мне скажут о магнитном поле уравнения Максвелла?

На нашей карте местности, которую мы продолжаем дорисовывать в процессе путешествия, дорожная сеть олицетворяет электромагнетизм. Давайте проведем один мысленный эксперимент. Пусть мимо нас одна за другой проезжают машины, каждая со скоростью 50 км/час, и пусть каждая из них перевозит большой ящик электронов (следовательно, отрицательный заряд). Этот поток машин моделирует электрический ток. Следовательно, уравнения Максвелла говорят нам, что из-за этого тока должно появиться магнитное поле (точно так же, как электрическое поле появляется из-за наличия заряда у электронов). Так и происходит, и мы можем измерить оба поля. Теперь давайте представим, что мы сами ускоряемся до скорости 50 км/час в том же направлении, что и машины. Итак, мы движемся с ними в едином потоке. По отношению к нам все эти машины неподвижны, поэтому электрического тока больше нет. Следовательно, не должно быть и магнитного поля. Что же, действительно ли физические процессы вокруг нас изменились только потому, что мы теперь движемся? С точки зрения наблюдателя, стоящего на обочине дороги, ток есть, и согласно уравнениям Максвелла ничего не изменилось. Значит, есть и магнитное поле. Что же получается с точки зрения нашего эксперимента: каждому нужна своя «версия» уравнений Максвелла? Продолжая эту мысль, зададимся вопросом: а как насчет любого другого наблюдателя, который может двигаться с любой скоростью, в том числе и со скоростью 50 км/час в направлении, противоположном потоку машин? Должен ли он тогда увидеть более сильный электрический ток?

Конец ознакомительного фрагмента.

Текст предоставлен ООО «ЛитРес».

Прочитайте эту книгу целиком, [купив полную легальную версию](#) на ЛитРес.

Безопасно оплатить книгу можно банковской картой Visa, MasterCard, Maestro, со счета мобильного телефона, с платежного терминала, в салоне МТС или Связной, через PayPal, WebMoney, Яндекс.Деньги, QIWI Кошелек, бонусными картами или другим удобным Вам способом.