

# 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**

«Издательство АСТ»

2018

УДК 539.123  
ББК 22.386

**Баттерворт Д.**

Карта незримого. Восемь путешествий по физике элементарных частиц / Д. Баттерворт — «Издательство 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 селятся 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  
© Издательство 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
Конец ознакомительного фрагмента.	21

**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 «многосоставности» 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 закусовых. Во времена моего детства в названиях индийских и пакистанских заведений часто встречалось слово «стандартный», что означало питание по стандарту тандури<sup>1</sup> 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

---

<sup>1</sup> *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, элегантно 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.

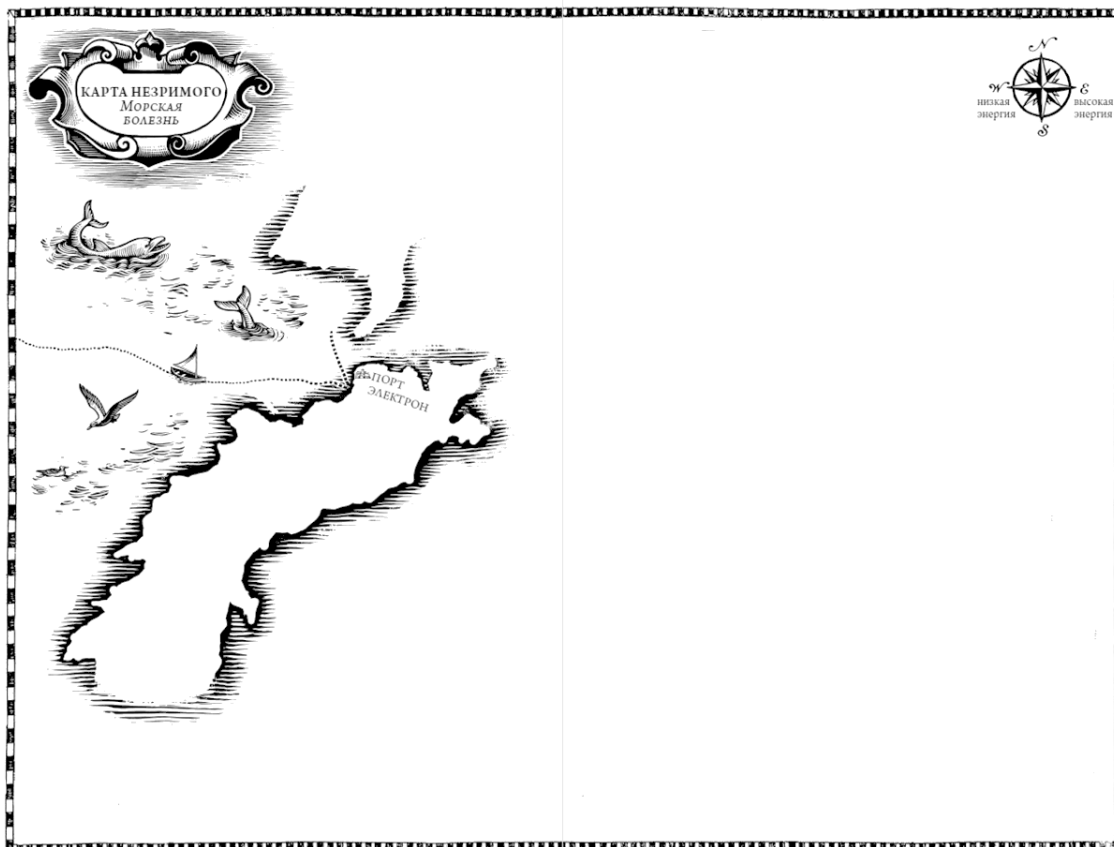
Исследуя новые территории, пограничные с известной нам физикой, мы дадим имена новым землям и изучим их взаимное расположение. Для кварков, бозонов, адронов и других частиц составим своего рода иллюстрированный глоссарий, что поможет лучше понять основополагающие идеи стандартной модели. Иногда может 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 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 светила<sup>2</sup>. 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 прояснятся 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.

---

<sup>2</sup> 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, ударяющимися 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 зоны<sup>3</sup>. 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 выстрелов<sup>4</sup>. 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?

---

<sup>3</sup> 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.

<sup>4</sup> Я извиняюсь перед чайкой, но такой уж кровожадный 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 детектор<sup>5</sup>. 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 ( $1 \text{ нм} = 10^9 \text{ м}$ )<sup>6</sup>, что соответствует частоте 650 терагерц<sup>7</sup> ( $1 \text{ ТГц} = 10^{12} \text{ Гц}$ ), 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*

---

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

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

<sup>7</sup> Более точно, 632 ТГц. – *Прим. перев.*

## **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.