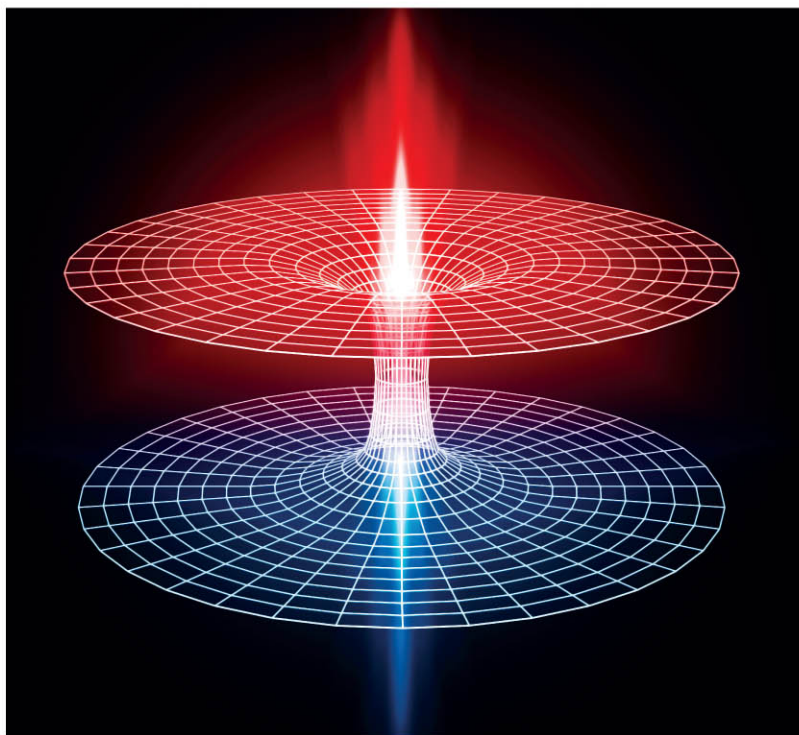


Энциклопедия быстрых знаний

# КВАНТОВАЯ ФИЗИКА

Для тех, кто хочет все успеть

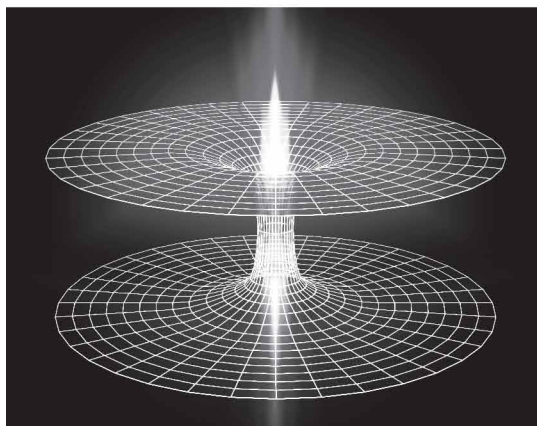


ВЕЛИЧАЙШИЕ НАУЧНЫЕ ОТКРЫТИЯ  
**ФАНТАСТИЧЕСКИЕ ГИПОТЕЗЫ**  
САМЫЕ ПОПУЛЯРНЫЕ ПАРАДОКСЫ  
**ЗНАМЕНИТЫЕ УЧЕНЫЕ-ФИЗИКИ**

Энциклопедия быстрых знаний

# КВАНТОВАЯ ФИЗИКА

Для тех, кто хочет все успеть



ВЕЛИЧАЙШИЕ НАУЧНЫЕ ОТКРЫТИЯ

ФАНТАСТИЧЕСКИЕ ГИПОТЕЗЫ

САМЫЕ ПОПУЛЯРНЫЕ ПАРАДОКСЫ

ЗНАМЕНИТЫЕ УЧЕНЫЕ-ФИЗИКИ



МОСКВА  
2017

УДК 530.1  
ББК 22.31  
К32

Оригинал-макет подготовлен издательским центром  
«НОУФАН»  
nofunpublishing.com  
valery@nofunpublishing.com  
+7 (903) 215-68-69

К32      **Квантовая физика:** для тех, кто хочет все успеть. —  
Москва : Эксмо, 2017. — 128 с. — (Энциклопедия бы-  
стрых знаний).

ISBN 978-5-699-95592-3

О том, что все в мире состоит из частиц, мы все знаем со школь-  
ной скамьи. Но о том, насколько широко квантовая физика вошла в нашу  
жизнь, большинство из нас не имеет четкого представления. А ведь мно-  
гими благами современной цивилизации мы обязаны именно ей, сколь-  
бы отвлеченной отраслью знания она ни казалась на первый взгляд. Весь  
XX век прошел под знаком открытий в области квантовой теории, а ее  
пока не решенные вопросы — увлекательнейший научный детектив. При-  
общиться к тайнам этого самого молодого раздела физики вам поможет  
эта книга.

**УДК 530.1  
ББК 22.31**

**ISBN 978-5-699-95592-3**

© ИП Сирота Э. Л. Текст  
и оформление, 2017  
© Оформление.

ООО «Издательство «Эксмо», 2017

# СОДЕРЖАНИЕ

<b>На какие вопросы отвечает эта книга.....</b>	<b>5</b>
<b>ПРЕДИСЛОВИЕ .....</b>	<b>7</b>
<b>Глава I. Как все начиналось.....</b>	<b>8</b>
<b>Глава II. Корпускулярно-волновой дуализм .....</b>	<b>11</b>
<b>Глава III. Высокая планка Планка.....</b>	<b>14</b>
<b>Глава IV. Деление неделимого.....</b>	<b>18</b>
<b>Глава V. На сцену выходят фотоны, или Понятый свет.....</b>	<b>21</b>
<b>Глава VI. Не верь глазам своим.....</b>	<b>27</b>
<b>Глава VII. Гениальная догадка Бора .....</b>	<b>32</b>
<b>Глава VIII. Запретить нельзя разрешить .....</b>	<b>35</b>
<b>Глава IX. Электронные волны де Бройля .....</b>	<b>38</b>
<b>Глава X. Уравнение Шредингера .....</b>	<b>41</b>
<b>Глава XI. Обретение неопределенности.....</b>	<b>47</b>
<b>Глава XII. Дополнительность Бора.....</b>	<b>51</b>
<b>Глава XIII. Спин .....</b>	<b>55</b>
<b>Глава XIV. Статистика Ферми — Дирака.....</b>	<b>59</b>
<b>Глава XV. Статистика Бозе — Эйнштейна.....</b>	<b>61</b>
<b>Глава XVI. Сверхпроводимость .....</b>	<b>66</b>
<b>Глава XVII. Квантовая теория поля .....</b>	<b>69</b>
<b>Глава XVIII. Релятивистская квантовая механика. Уравнение Дирака.....</b>	<b>72</b>
<b>Глава XIX. Квантовая электродинамика.....</b>	<b>75</b>
<b>Глава XX. Слабые взаимодействия. Энрико Ферми.....</b>	<b>78</b>

<b>Глава XXI.</b> Создание ускорителей заряженных частиц .....	84
<b>Глава XXII.</b> Кварки и глюоны.....	88
<b>Глава XXIII.</b> Ядерные реакции и термоядерный синтез .....	92
<b>Глава XXIV.</b> Парадоксы квантовой физики .....	95
<b>Глава XXV.</b> Квантовая теория конденсированных сред.....	99
<b>Глава XXVI.</b> Квантовая теория твердого тела.....	105
<b>Глава XXVII.</b> Квантовая оптика.....	108
<b>Глава XXVIII.</b> Квантовая криптография .....	113
<b>Глава XXIX.</b> Квантовый компьютер.....	116
<b>Глава XXX.</b> Теория струн.....	120
<b>Список источников .....</b>	<b>126</b>

# НА КАКИЕ ВОПРОСЫ ОТВЕЧАЕТ ЭТА КНИГА

## ЧТО ТАКОЕ СВЕТ — ЧАСТИЦА ИЛИ ВОЛНА?

На самом же деле квантовые объекты не являются ни классическими волнами, ни классическими частицами, приобретая свойства первых или вторых лишь в некотором приближении.

*См. главу II*

## КАК ТОМСОН ПРЕДСТАВЛЯЛ СЕБЕ АТОМ?

Модель напоминала пудинг, в котором находились изюминки, впоследствии она получила название «пудинговая модель атома». *См. главу IV*

## ПОЧЕМУ ЭЛЕКТРОН НЕ ПАДАЕТ НА ЯДРО АТОМА?

Электрон в атоме водорода может находиться только на орбитах, для которых значение момента импульса электрона равно целому числу постоянных Планка. *См. главу VII*

## ЧТО ТАКОЕ ЭЛЕКТРОН — ВОЛНА ИЛИ ЧАСТИЦА?

Впервые идею о корпускулярно-волновой природе электрона французский физик выдвинул еще в 1923 году. Позднее это оказалось справедливым и для других составляющих атома. Выдвинутая им гипотеза хорошо обосновала казавшийся загадочным принцип стационарных орбит в модели атома Бора. *См. главу IX*

## ЧТО ОЗНАЧАЕТ ПРИНЦИП ДОПОЛНИТЕЛЬНОСТИ БОРА?

Если мы возьмем отдельно понятия «состояние» и «наблюдение», то, согласно Бору, они будут дополнительные. Ведь взятые каждый в отдельности они неполны, а значит, могут быть определены только друг через друга. Фактически эти понятия не существуют отдельно. Мы всегда наблюдаем только конкретное состояние объекта! Само же состояние объекта остается вещью в себе, пока мы не найдем способ его «наблюдения». *См. главу XII*

## КАК ВОЗНИКАЕТ КВАНТОВОЕ ПОЛЕ?

В квантовых полях процесс передачи взаимодействия происходит порциями — квантами. В качестве квантов выступают

элементарные частицы, имеющие строго фиксированные характеристики массы, спина, заряда. Таким образом, с одной стороны, сами взаимодействующие частицы имеют квантованные характеристики, а с другой — взаимодействие между ними передается квантовым полем со своими квантованными характеристиками. *См. главу XVII*

## **ЧТО ТАКОЕ БОЗОН ХИГГСА, ИЛИ «ЧАСТИЦА БОГА»?**

Бозон Хиггса — это элементарная частица, играющая ключевую роль в понимании механизмов образования и развития нашей Вселенной после так называемого Большого взрыва. Сама частица имеет много почетных прозвищ: «Частица Бога», «Ангел Творения», «Кирпич, который построил Вселенную». Можно сказать, бозон Хиггса улавливает частицы, которые перемещаются вокруг, и превращает их в материю. *См. главу XXI*

## **ЭЛЕМЕНТАРЕН ЛИ ПРОТОН?**

Как можно протон называть элементарной частицей, если он состоит из кварков? Очень просто: протон элементарен, так как его невозможно расщепить на составные части — кварки. Все частицы, которые участвуют в сильном взаимодействии, состоят из кварков и при этом являются элементарными. *См. главу XXII*

## **КАК ПОНИМАТЬ КВАНТОВУЮ ЗАПУТАННОСТЬ?**

Если взять частицу из определенного множества частиц и повлиять на нее любым способом, то изменится состояние и остальных частиц, даже если они находятся в совершенно иных условиях. *См. главу XXIV*

## **ЧТО ТАКОЕ ТЕОРИЯ СТРУН?**

Согласно гипотезе, Вселенная возникла благодаря расширению микропространства размером в струну, соответствующую постоянной Планка. По мере увеличения этой области растягивались и ультрамикроскопические струны — теперь их длина соизмерима с размерами Вселенной. Но они точно так же взаимодействуют между собой и производят те же вибрации и колебания. Продольные колебания порождают гравитационное излучение. *См. главу XXX*

# ПРЕДИСЛОВИЕ

Многие века человеческие умы будоражили рассказы и проявления магических феноменов. И только в наши дни появилась наука, определившая качественные и количественные закономерности перехода энергетических структур в более или менее плотное состояние. Эта наука — квантовая физика.

Классическая физика, как известно, описывает поведение материальных объектов. В противоположность ей квантовая физика сосредоточена только на математическом описании процессов наблюдения и измерения. При этом элементом анализируемой картины мира становится сам наблюдатель.

Эта наука является относительно молодой, что не мешает, а может, и способствует появлению в ней множества фантастических гипотез.

Перед учеными стоит все еще много задач и вопросов, которые пока кажутся неразрешимыми. Однако интенсивное развитие прикладного направления квантовой физики с каждым годом снимает все большее количество вопросов, при этом порождая новые, ранее непредвиденные. При этом перспективы, которые открывают современные прикладные разделы квантовой теории, способны поразить любое воображение.

Нас окружает удивительный и замечательный мир. Многие проявления реальности до сих пор кажутся нам магическими и необъяснимыми. Любой прочитавший эту книгу станет немного магом, сможет приоткрыть завесу мироздания, взглянуть на эзотерику и физику иначе.



Герб города Обнинска с геральдическим (несколько упрощенным) изображением атома Бора — Резерфорда. Изображение атома используется в геральдике с 1955 года



# КАК ВСЕ НАЧИНАЛОСЬ

*Наука нуждается в воображении, но воображение находится в ужасной смиренной рубашке знания.*

Ричард Фейнман

Квантовая физика уже давно вошла в нашу жизнь. Но пользоваться благами, созданными с ее помощью, еще не значит понимать, что это такое. У многих знания физики заканчиваются на уровне средней школы, и далеко не все изучали легендарный третий том «Теоретической физики» Л. Д. Ландау и Е. М. Лифшица, и для многих такие понятия, как волновая функция и уравнение Шредингера, — это что-то из потустороннего мира. Специфический же математический аппарат квантовой механики — это сложные формулы и малопонятные слова. Поэтому в данной книге мы постараемся придерживаться общедоступного уровня изложения, избегая элементов тензорного анализа и прочей специфики квантовой механики, и изложить отдельные аспекты этого постоянно развивающегося и самого молодого раздела физики.

Квант — это неделимая порция какой-либо величины, в частности энергии. В основе этого понятия лежит представление о том, что некоторые физические величины могут принимать только определенные значения (говоря научным языком, физическая величина квантуется)

## ТОЧКА ОТСЧЕТА

Для подавляющего большинства людей квантовая механика находится за гранью понимания. И дело тут даже не столько в сложном математическом аппарате, сколько в том, что законы квантовой механики не имеют подсознательной ассоциации — их невозможно себе представить.

История квантовой физики началась 14 декабря 1900 года. Именно в этот день немецкий физик и будущий нобелевский лауреат Макс Планк доложил на заседании Берлинского физического общества о фундаментальном открытии квантовых свойств теплового излучения. Так в физике появилось понятие кванта энергии, а среди других

фундаментальных постоянных — постоянная Планка.

Открытие Планка и появившаяся затем, в 1905 году, теория фотоэлектрического эффекта Альберта Эйнштейна, а также создание в 1913 году Нильсом Бором первой квантовой теории атомных спектров стимулировали создание и дальнейшее бурное развитие квантовой теории и экспериментальных исследований квантовых явлений.

## ВСЕ ПОЗНАЕТСЯ... В РАЗВИТИИ

Уже в 1926 году Эрвин Шредингер сформулировал свое знаменитое волновое уравнение, а Энрико Ферми и Поль Дирак получили квантово-статистическое распределение для электронного газа, учитывающее заполнение отдельных квантовых состояний.

В 1928 году Феликс Блох произвел анализ квантово-механической задачи о движении электрона во внешнем периодическом поле кристаллической решетки и показал, что электронный энергетический спектр в кристаллическом твердом теле имеет зонную структуру. Фактически это стало началом нового направления в физике — теории твердого тела.

Весь XX век — это период интенсивного развития всех тех разделов физики, для которых квантовая теория стала прародителем.

Данная книга представляет собой краткий экскурс в квантовую физику и охватывает далеко не все ее тонкости и нюансы, а только дает общее представление о том, о чем еще и сегодня спорят ученые. И кто знает, может быть, пройдет время и появится знаменитая единая теория поля, родится

## АНЕКДОТ ОТ МАКСА ПЛАНКА

Обычная чайная чашка имеет две ручки, а не одну, как нам кажется. Просто они развернуты друг относительно друга не на 180 градусов (как, скажем, у кастрюли), а на 360...

Студенты перед сессией:

— Что читаешь?

— Квантовую механику.

— А чего книга вверх ногами?

— А какая разница...

*(Анекдот)*

новый Ньютон или Эйнштейн, который, провозгласив сакраментальное «элементарно», просто и доступно объяснит природу вещей. Но это еще впереди. А пока попытаемся разобраться, что же кроется за вызывающими трепет у многих читателей словами «квантовая физика» и что, собственно, о ней известно на сегодняшний день.

## КОРПУСКУЛЯРНО-ВОЛНОВОЙ ДУАЛИЗМ

*Был этот мир глубокой тьмой окутан.  
Да будет свет! И вот явился Ньютон.*  
Эпиграмма XVIII века

*Но сатана недолго ждал реванша.  
Пришел Эйнштейн — и стало все, как раньше.*  
Эпиграмма XX века. Самуил Маршак

Свет всегда оставался самой загадочной областью изучения физики. Около четырехсот лет ученые спорили, что же он собой представляет. В одних случаях он ведет себя как частица, в других — как волна. Необходим был новый подход, чтобы как-то объяснить создавшееся положение.

Первым, кто предположил, что свет — это частица, был гениальный английский ученый Исаак Ньютон. Он создал стройную для своего времени теорию света на корпускулах. Вместе с тем оставались загадочные на тот момент явления, такие как дифракция и интерференция, которые явно не вписывались в корпускулярную теорию. Тогда англичанин Роберт Гук и нидерландский ученый Христиан Гюйгенс предположили, что свет — это все-таки волна. Но авторитет Ньютона был настолько силен, что весь научный мир продолжал считать свет частицами.

### ФИГАРО ЗДЕСЬ, ФИГАРО ТАМ!

Споры продолжались до начала XIX века, когда Томас Юнг поставил свой знаменитый опыт: свет проходит через две щели и падает на экран, где появляются темные и светлые интерференционные полосы. Это можно объяснить тем, что в некоторых местах световые волны взаимно усиливаются, а в других — гасятся. Напрашивался однозначный вывод: свет — это все-таки электромагнитная волна! Волновая теория электромагнитного

Корпускулярно-волновой дуализм — свойство любой микрочастицы обнаруживать признаки частицы или корпускулы и волны

Ультрафиолетовая катастрофа — физический термин, описывающий парадокс классической физики, состоящий в том, что полная мощность теплового излучения любого нагретого тела должна быть бесконечной

излучения нашла свое теоретическое описание в работах Джеймса Максвелла. Использование представления о свете как волне позволяет объяснить явления, связанные с интерференцией и дифракцией, в том числе структуру светового поля, а именно объяснить построение изображений и метод голографии.

Прошло еще почти сто лет, и Макс Планк, чтобы решить проблему ультрафиолетовой катастрофы, ввел понятие фотона. Научный мир снова обратился к проблеме света, и вот тут опять возник вопрос. Что же он такое: частица или все же волна? И как все это описать? Свет в одних случаях ведет себя как поток частиц, в других — обладает волновыми свойствами. То есть обладает корпускулярно-волновым дуализмом.

Дальше — больше. В 1923 году Луи де Бройль предположил, что не только свет есть одновременно и волна, и частица, но и электрон, и вообще — все!

Наиболее ярко корпускулярно-волновой дуализм проявляется у элементарных частиц. Электрон, нейтрон, фотон в одних условиях ведут себя как локализованные в пространстве материальные объекты — частицы, обладающие определенными энергиями и импульсами, а в других — как волны, что проявляется в их способности к интерференции и дифракции.

## И НИ ТО, И НИ ДРУГОЕ

Явления интерференции и дифракции света убедительно свидетельствуют о волновой природе света. Закономерности теплового излучения, фотоэффекта можно успешно

объяснить с классической точки зрения только на основе представлений о свете как о потоке отдельных фотонов. Однако волновой и корпускулярный способы описания света не противоречат, а взаимно дополняют друг друга, так как свет одновременно обладает и волновыми, и корпускулярными свойствами.

Волновые свойства света играют определяющую роль в закономерностях его интерференции, дифракции, поляризации, а корпускулярные — в процессах взаимодействия света с веществом.

Сейчас концепция корпускулярно-волнового дуализма представляет лишь исторический интерес, так как, во-первых, некорректно сравнивать и противопоставлять материальный объект, например электромагнитное излучение, и способ его описания — корпускулярный или волновой; и, во-вторых, число способов описания материального объекта может быть больше двух — корпускулярный, волновой, термодинамический и так далее, так что сам термин «дуализм» становится по сути неверным. На момент своего возникновения концепция корпускулярно-волнового дуализма служила способом описания поведения квантовых объектов путем подбора аналогий из классической физики. На самом же деле квантовые объекты не являются ни классическими волнами, ни классическими частицами, приобретая свойства первых или вторых лишь в некотором приближении.

И тем не менее именно споры о теории света и привели в конце концов к созданию квантовой физики, о которой и пойдет речь дальше.

*«Нет особой физической разницы между радиоволнами и видимым светом с точки зрения физики — Вы будете описывать их одними и теми же уравнениями и математикой. Только наше повседневное восприятие различает их»*

(Элефтериос Гулильмакис)

Свет ведет себя как волна и как частица, по сути не являясь ни тем ни другим, в то же время являясь и тем и другим одновременно. Другими словами, свет — это парадокс

## ВЫСОКАЯ ПЛАНКА ПЛАНКА

*Физика теперь снова зашла в тупик.  
Во всяком случае, для меня она слишком сложна,  
и я предпочел бы быть комиком в кино...  
и не слышать ничего о физике.*  
Вольфганг Паули

Почему тела, нагретые до высоких температур, светятся? Как кванты Планка приоткрыли занавес над загадкой излучения абсолютно черного тела? В поисках ответов на подобные вопросы зарождалась квантовая физика.

Ученые отличаются от обычных людей прежде всего тем, что могут задавать себе вопросы о тривиальных вещах, о которых мы с вами и не задумываемся. Почему нагретое тело — назовем это тепловым излучением — светится? Какова причина этого явления и почему с увеличением температуры цвет нагретого тела смещается к более высокочастотной части спектра? Напомним, что длина электромагнитной волны, а именно такой волной является свет, обратно пропорционально зависит от частоты, то есть чем больше длина волны, тем короче ее частота и наоборот. Эти рассуждения нам пригодятся в дальнейшем еще не раз.

Абсолютно черное тело — физическое тело, которое при любой температуре поглощает все падающее на него электромагнитное излучение во всех диапазонах

### А ПОЧЕМУ ЖЕ ОНО СВЕТИТСЯ?

В конце XIX века сразу несколько ученых — австрийцы Людвиг Больцман и Йозеф Стефан, немцы Густав Кирхгоф и Вильгельм Вин — задались именно этим вопросом и занялись изучением количественной и качественной характеристики теплового излучения.

При изучении физических явлений возникает очень много побочных факторов, влияющих на конечный результат, поэтому физики часто

абстрагируются и строят идеальную модель с отсутствием каких-либо помех. Сразу скажем, что это только допущения и в природе подобных ситуаций просто не существует.

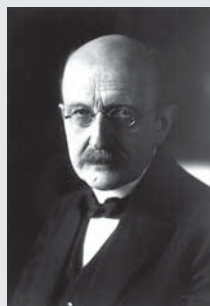
Для изучения теплового излучения ученые ввели понятие абсолютно черного тела, которое поглощает все падающее на него электромагнитное излучение во всех диапазонах. Заметьте, что, несмотря на название, само абсолютно черное тело может испускать электромагнитное излучение любой частоты и может иметь цвет! Излучение его определяется только температурой.

## ДОЛОЙ НЕПРЕРЫВНОСТЬ!

С одной стороны, абсолютно черное тело поглощает энергию, с другой — способно излучать. Считается, что система находится в тепловом равновесии, если с течением времени тело в единицу времени будет поглощать столько же энергии, сколько и излучать.

Первым обосновал зависимость частоты излучения от температуры абсолютно черного тела немецкий ученый Густав Кирхгоф. Он же, собственно, и ввел этот термин.

Идеи Кирхгофа подхватили немецкий ученый Вильгельм Вин и британцы Джон Рэлей и Джеймс Джинс. В процессе изучения теплового излучения они сформулировали более точные законы зависимости частоты излучаемого телом электромагнитного излучения от температуры, впоследствии



Макс Карл Эрнст  
Людвиг Планк  
(1858–1947) —  
немецкий физик-  
теоретик, основопо-  
ложник квантовой  
физики. Лауреат Но-  
белевской премии  
по физике 1918 года

Количественной характеристикой теплового излучения служит спектральная плотность энергетической светимости тела, иными словами, мощность излучения с единицы площади поверхности тела в интервале единичной ширины частот



*«Мои тщетные попытки как-то ввести квант действия в классическую теорию продолжались в течение ряда лет и стоили мне немалых трудов. Некоторые из моих коллег усматривали в этом своего рода трагедию. Но я был другого мнения об этом, потому что польза, которую я извлекал из этого углубленного анализа, была весьма значительной. Ведь теперь я точно знаю, что квант действия играет в физике гораздо большую роль, чем я вначале был склонен считать...»*

(Макс Планк)

получившие соответствующие названия: законы излучения Вина и закон Рэлея — Джинса. Проблема, однако, состояла в том, что закон Рэлея — Джинса хорошо согласовался с экспериментом в низкочастотной области, но при повышении частоты он показывал бесконечные данные. А формула Вина, которая также неплохо сходилась с экспериментом, явно не объясняла зависимость при низких частотах. На том этапе ученые называли образовавшуюся проблему ультрафиолетовой катастрофой. А значит, до истины было еще очень далеко.

## ДЕНЬ РОЖДЕНИЯ КВАНТА

В 1900 году немецкий физик Макс Планк, несколько лет параллельно занимавшийся этой же проблемой, в противоречие классической физике предположил, что энергия электромагнитной волны может излучаться и поглощаться только целыми порциями — квантами, или, как говорят физики, дискретно, в отличие от считавшегося до этого незыблемым понятия непрерывного изменения параметров физических характеристик. Формула зависимости была до изящества проста:  $e = hn$ , где  $e$  — энергия излучения,  $n$  — его частота, а  $h$  — постоянная величина, получившая впоследствии название постоянной Планка.

В этом, пожалуй, и заключается гениальность Макса Планка: в отличие от коллег, выводивших огромные формулы

нахождения энергии излучения в зависимости от температуры и частоты излучения, смог свести расчеты к трем простым величинам, одна из которых — постоянная.

Теория Планка поначалу не вызвала у коллег особенного интереса, и только спустя несколько лет, когда всплыла проблема фотоэффекта, на нее наконец обратили должное внимание. Тем не менее 14 декабря 1900 года, день, когда Макс Планк предложил теоретический вывод о соотношении между температурой тела и испускаемым этим телом излучением, считается днем рождения квантовой механики и квантовой физики в целом.

*«Молодой человек! Зачем вы хотите испортить себе жизнь, ведь теоретическая физика в основном закончена... Стоит ли браться за такое бесперспективное дело?!»*

(Филипп Жолли —  
юному  
Максу Планку)

## ДЕЛЕНИЕ НЕДЕЛИМОГО

*Существование атомов невозможно доказать. Их нельзя увидеть, нельзя потрогать, они существуют только в нашем воображении. Это абстракция.*  
Эрнст Мах

Со времен Демокрита атом считался элементарной структурной единицей вещества. А так ли это? Оказывается, нет. И первым, кто это доказал, был английский физик Джозеф Томсон.

В середине XIX века в физике активно исследовались различные электрические явления. Открытия вырастали одно за другим, как грибы после хорошего осеннего дождика. Одним из исследователей электрических явлений был немецкий физик и математик Юлиус Плюккер.



Сэр Джозеф Джон Томсон (1856–1940) — английский физик, лауреат Нобелевской премии по физике 1906 года

### ПРЕДДВЕРИЕ ОТКРЫТИЯ

Плюккер поставил довольно простой эксперимент. В герметичную стеклянную трубку с разреженным газом были помещены два электрода. Катод подключался к отрицательному полюсу батареи, анод — к положительному. При подаче высокого напряжения газ в трубке начинал светиться. Откачивая газ из трубки, Плюккер наблюдал постепенное исчезновение свечения, и лишь слегка оно оставалось в области анода. Так в 1859 году было открыто новое излучение.

Немецкий физик Ойген Гольдштейн продолжил работу Плюккера, он высказал идею о волновой природе открытого излучения и назвал его катодными лучами. Англичанин Уильям Крукс не согласился с ним и предположил, что катодные лучи являются потоками частичек вещества. Его правоту уже 1895 году подтвердил французский

физик Жан Перрен, который экспериментально доказал, что этот поток движется прямолинейно, но может отклоняться магнитным полем.

Можно сказать, что подготовительные работы к раскрытию тайны атома были уже проведены. В этом же году к исследованию катодных лучей в Кавендишской лаборатории Кембриджского университета приступает ее директор Джозеф Томсон. Изучая отклонение лучей в магнитном поле, он приходит к выводу, что все частицы, образующие катодные лучи, одинаковы, или, говоря языком физики, тождественны, и являются составляющими вещества. Измерив скорость их движения, которая была значительно ниже скорости света, Томсон понял, что они обладают массой и находятся в составе атомов. А значит, атом не такой уж и неделимый.

## **АТОМ-ПУДИНГ. КАК ЭТО ПО-АНГЛИЙСКИ!**

После открытия электрона неделимость атома уже стала доказанным фактом, и пришла пора построить модель атома. К построению этой модели и приступил Джозеф Томсон. И лишь спустя семь лет, в 1904 году, он предложил один из ее вариантов.

Согласно его модели, атом состоит из отрицательно заряженных электронов (хотя сам Томсон называл их «корпускулами»), обладающих наименьшим квантованным зарядом — то есть не может быть заряда меньше, чем у электрона, и не может быть заряда в полтора электрона, — и положительно заряженного «шара» (или облака), компенсирующего отрицательные заряды

## **ПЛОДЫ ПРОСВЕЩЕНИЯ**

Еще в V веке до нашей эры Демокрит рассуждал так: «Если разделить, например, яблоко на две половины, затем одну из них еще на две части и продолжать деление таким образом до тех пор, пока результат деления перестанет быть яблоком, то мельчайшая частица, которая все еще сохраняет свойство яблока, является атомом яблока, то есть неделимой частью яблока»

*«Каша в голове — так поделись с ближним!»*

(Джозеф Джон  
Томсон)

## ЯБЛОКО ОТ ЯБЛОНИ...

Электрон как частица был обнаружен в 1897 году английским физиком Джо-зефом Джоном Томсоном. Через 9 лет ученому присудили Нобелевскую премию с формулировкой «за исследования проводимости электричества газами». Его сын, Джордж Паджет Томсон, в 1927 году обнаружил волновые свойства электрона и впоследствии тоже удостоился Нобелевки «за экспериментальное открытие дифракции электронов на кристаллах»

электронов. Так что в целом атом электронейтрален.

Модель напоминала пудинг, в котором находились изюминки, впоследствии она получила название «пудинговая модель атома». Справедливости ради следует заметить, что сам ученый никогда не давал ей такое название.

В соответствии с этой моделью электроны могли свободно вращаться в капле или облаке такой положительно заряженной субстанции. Их орбиты стабилизировались тем, что при удалении электрона от центра положительно заряженного облака он испытывал увеличение силы притяжения, возвращающей его обратно, поскольку внутри его орбиты было больше вещества противоположного заряда, чем снаружи. В модели Томсона электроны могли свободно вращаться по кольцам, которые стабилизировались взаимодействиями между электронами, а наличие спектров объясняло энергетические различия между различными кольцевыми орбитами.

Модель Томсона была способна объяснить излучение атомом электромагнитных волн определенной частоты колеблющимися электронами, выведенными из положения равновесия, но она не смогла объяснить излучение большого числа спектральных линий. Также модель Томсона не давала возможности понять, что определяет размеры атомов. Но это был только первый шаг в познании структуры атома. Поскольку выяснилось, что электрон обладает наименьшим квантованным зарядом, открытие Томсона еще раз доказало существование квантовой природы физических процессов в микромире.

## НА СЦЕНУ ВЫХОДЯТ ФОТОНЫ, ИЛИ ПОНЯТЫЙ СВЕТ

*В физике часто случалось, что существенный успех был достигнут проведением последовательной аналогии между несвязанными по виду явлениями.*

Альберт Эйнштейн

Что происходит с телом, когда на него падает свет? А если тело освещать светом разной частоты? А если при этом тело включить в электрическую цепь? Всеми этими вопросами задался русский физик Столетов.

В 1887 году Генрих Герц, тот самый, чьим именем названа единица частоты, проводил электрические опыты с газовыми разрядами. Все было просто до тех пор, пока он не подействовал на отрицательный электрод ультрафиолетовым излучением от ртутной лампы. Вот тут и выяснилось, что при этом напряжение, необходимое для разряда, уменьшилось.

Мы-то с вами теперь понимаем, что в данном случае появились дополнительные носители электрического разряда — электроны. Герц же этого попросту знать не мог. Поэтому он и не смог дать правильного объяснения полученному эффекту, ведь до открытия электрона оставалось еще около десяти лет.

### УЛЬТРАФИОЛЕТОВАЯ ЗАВИСИМОСТЬ

Эта проблема заинтересовала русского физика Александра Григорьевича Столетова. Он тщательно повторял опыты Герца, заменив разрядник конденсатором, и вскоре пришел к правильному выводу: явление обусловлено выбиванием под действием света из катода (а это отрицательно заряженный электрод) дополнительных отрицательных зарядов. В случае облучения анода — положительного электрода подобного эффекта

*«Все должно быть изложено так просто, как только возможно, но не проще»*

(Альберт  
Эйнштейн)

Явление вырывания частиц, несущих отрицательный заряд (электронов), из твердых и жидких тел под действием света называют фотоэлектрическим эффектом, или просто фотоэффектом. Фотоэффект широко применяется в технике. На нем основано действие фотоэлементов, с помощью которых можно получать электричество из солнечного света. Комбинируя фотоэлементы с реле, можно создавать различные автоматы, которые могут автоматически открывать и закрывать дверь, сортировать предметы, включать и выключать освещение

не наблюдалось. В дальнейшем измерение этих зарядов показало, что они являются не чем иным, как электронами. Но напомним, что о понятии «электрон» человечество тогда еще не знало.

Чтобы не было путаницы, внесем ясность: явление фотоэффекта открыл Герц, а вот выводы принадлежат Столетову. Тщательные исследования и пылливый ум ученого помогли сделать из серии экспериментов следующие выводы, названные впоследствии законами фотоэффекта:

1. Сила фототока прямо пропорциональна плотности светового потока.

2. Максимальная кинетическая энергия вырываемых светом частиц, а следовательно, и фототок, линейно возрастает с частотой света и не зависит от его интенсивности.

3. Для каждого вещества при определенном состоянии его поверхности существует граничная частота света, ниже которой фотоэффект не наблюдается. Эта частота и соответствующая ей длина волны называются красной границей фотоэффекта.

Полученные законы хорошо согласовались с экспериментальными данными. Но объяснить их на основе электромагнитной волновой теории света оказалось невозможно. На тот момент в мире физики еще не существовало надлежащей научной базы.

## КВАНТОВАННАЯ ВОЛНА ЭЙНШТЕЙНА

Объяснение и научное обоснование фотоэффекту только в 1905 году дал великий немецкий физик Альберт Эйнштейн, опираясь на работы своего соотечественника Планка.

Эйнштейн отошел от классической волновой оптики и предположил, что сама электромагнитная волна, коей считали свет, состоит из отдельных порций — корпускул, или световых квантов, впоследствии названных в 1926 году американским физиком Гилбертом Ньютоном Льюисом фотонами.

Поглощение света заключается в том, что фотоны отдают свою энергию атомам вещества. Причем и поглощение, и распространение света происходят непрерывно отдельными квантами.

Из этой квантовой точки зрения на природу света следует, что для выхода электрона из металла ему следует преодолеть энергетический барьер на границе вещество — вакуум. Для этого он должен совершить определенную работу  $A_0$ . Если полученная им энергия от фотона, а она поглощается целиком, больше работы выхода  $A_0$  — выхода электрона из вещества, то он сможет совершить работу по выходу из вещества и приобрести некую начальную скорость.

Анализируя это положение и воспользовавшись, как было сказано выше, идеей Планка, Эйнштейн формулирует уравнение для внешнего фотоэффекта.

Энергия одного кванта света  $E = h\nu$ . Если предположить, что один квант света вырывает один электрон, то энергия кванта  $E$  идет на совершение работы выхода электрона  $A$  и на сообщение ему кинетической энергии  $mv^2/2$ . То есть

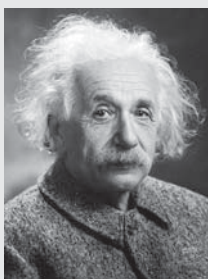
$$h\nu = A_0 + mv^2/2,$$

где  $\nu$  — частота света,  $A_0$  — работа выхода электрона из вещества,  $mv^2/2$  — кинетическая энергия вышедшего из вещества электрона,  $h$  — постоянная Планка.

## ИРОНИЯ СУДЬБЫ

Как-то в Германии Эйнштейн принял участие в благотворительном концерте. Местный журналист, восхищенный его исполнением, спросил у соседки: «Кто это играет?» — и получил ответ: «Как, вы не узнали? Это же сам Эйнштейн!» — «Ах, да, конечно!» На следующий день в газете появилась заметка о выступлении великого музыканта, несравненного виртуоза-скрипача, Альберта Эйнштейна. «Великий музыкант» пришел в восторг, вырезал заметку и с гордостью показывал знакомым: «Вы думаете, я ученый? Я знаменитый скрипач, вот кто я на самом деле!»





Альберт Эйнштейн (1879–1955) — физик-теоретик, один из основателей современной теоретической физики, лауреат Нобелевской премии по физике 1921 года

С помощью этого уравнения можно объяснить все законы внешнего фотоэффекта.

Максимальная кинетическая энергия фотоэлектрона и, как следствие, его максимальная начальная скорость зависят от частоты света  $\nu$  и работы выхода  $A_0$ , но не зависят от интенсивности света. Это первый закон внешнего фотоэффекта.

Энергии фотона должно хватить на то, чтобы вырвать электрон из вещества. Обозначив через  $\nu_{\min}$  наименьшую частоту света, при которой возможен фотоэффект, имеем  $h\nu_{\min} = A_0$ , следовательно, можем найти граничную частоту и длину волны. То есть красная граница фотоэффекта зависит только от работы выхода, а значит, и от химической природы вещества, и состояния его поверхности. Это второй закон фотоэффекта. Красной эта граница названа потому, что при сдвиге волны в сторону меньшей частоты, то есть в сторону «более красного» света, фотоэффект не происходит.

Суммарное число фотоэлектронов, покидающих за 1 секунду поверхность вещества, должно быть пропорционально числу фотонов, попадающих за это же время на поверхность.

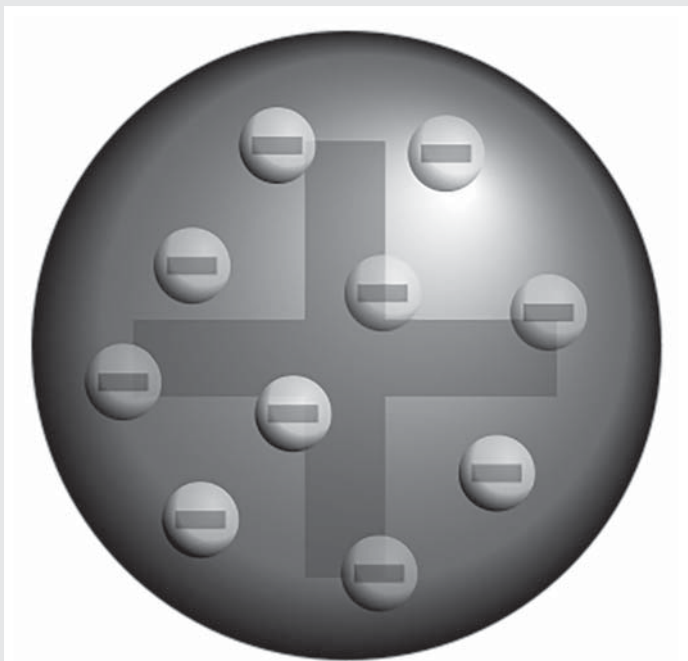
Открытие и исследование явления фотоэффекта привело к пересмотру теоретических представлений о природе света и еще раз подтвердило квантовую природу микромира.



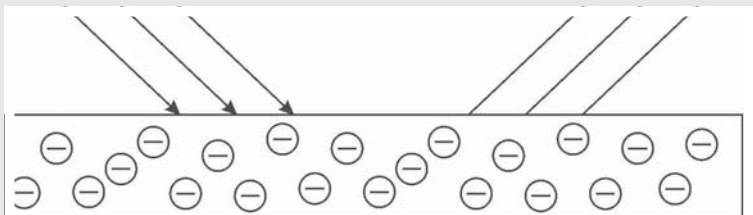
Что вы видите на этом рисунке: «белую фигурную вазу на черном фоне» или «два лица, сближающихся в поцелуе»? Этот пример наглядно демонстрирует возможность дуальных свойств у одного объекта



Модель абсолютно черного тела



Схематическое представление модели Томсона (кекс). В математической модели Томсона «корпускулы» (электроны) были расположены случайно, а не во вращающихся кольцах



Внешний фотоэффект. Фотоны, попадающие на поверхность тела, «выбивают» из него электроны, делая тело положительно заряженным

# НЕ ВЕРЬ ГЛАЗАМ СВОИМ

*Каждый, кто надеется, что преобразования атомных ядер станут источником энергии, исповедует вздор.*

Эрнест Резерфорд

Модель Томсона была первым пробным шагом в познании микромира. Однако она не отвечала на многие вопросы. Требовался новый нестандартный взгляд для создания модели, способной разрешить возникшие противоречия.

Модель атома, предложенная Томсоном, давала только общее представление о строении атома и не согласовывалась со все новыми данными экспериментов и теоретических вычислений. Настало время создания другой модели, способной согласовать теорию и эксперимент.

## ЭТОГО НЕ МОЖЕТ БЫТЬ... ИЛИ ФАКТЫ — УПРЯМАЯ ВЕЩЬ

К 1904 году японский физик Хантаро Нагаока разработал раннюю «планетарную модель» атома — так называемый «атом типа Сатурна». Модель была разработана по аналогии с расчетами устойчивости колец Сатурна. И хотя впоследствии модель и оказалась ошибочной, два следствия из нее все-таки оказались пророческими:

- ядро атома действительно очень массивно;
- электроны удерживаются на орбите электростатическими силами.

Годом раньше немецкий физик Филипп фон Ленард попытался создать модель, которая не предполагала раздельное существование в атоме противоположных зарядов. Атом, согласно модели Ленарда, состоит из нейтральных частиц — динамид, каждая из которых является электрическим дуплетом. Расчеты, выполненные

Альфа-частица ( $\alpha$ -частица) — положительно заряженная частица, образованная двумя протонами и двумя нейтронами, по сути это ядро атома гелия. Поток альфа-частиц называют альфа-лучами, или альфа-излучением

Из воспоминаний Резерфорда, об отклонении частиц на углы, близкие к  $180^\circ$ : «Это было самым невероятным событием в моей жизни. Оно было столь же невероятным, как если бы 15-дюймовый снаряд, выпущенный в кусок папиросной бумаги, отскочил от нее и ударил бы в стреляющего»

## ЯЗЫКОМ ОБРАЗОВ

Если представить атом в виде сферы диаметром один километр — его ядро будет размером с мелкую монету

Ленардом, показали, что эти частицы должны иметь очень маленькие размеры, то есть большая часть объема атома представляет собой пустоту.

В 1909 году Ганс Гейгер и Эрнест Марсден под руководством Эрнеста Резерфорда решили попытаться найти экспериментальное подтверждение модели Томсона и провели ставшие классическими опыты по рассеиванию альфа-частиц на тонкой золотой фольге. Альфа-частицы были выбраны благодаря своей большей массе (в 7350 раз больше массы электрона), поэтому они не должны претерпевать сколь-нибудь заметного отклонения при взаимодействии с электронами. Это позволяет исследовать только положительную составляющую атома. Источником альфа-частиц послужил радий. Частицы, проходящие через золотую фольгу, рассеивались, и это рассеяние регистрировалось по сцинтилляционным вспышкам на экране из сульфида цинка.

В начале эксперимента исследовались только малые углы отклонения альфа-частицы. И тут выяснилось, что подавляющее большинство частиц проходили сквозь фольгу, как раскаленная дробинка через кусок масла, словно мишень была прозрачна для бомбардирующих ее частиц. Наблюдалось лишь весьма незначительное отклонение порядка одного градуса.

Затем Резерфорд поручил молодому сотруднику Марсдену выяснить, могут ли частицы рассеиваться на большие углы. В частности, до  $180^\circ$ . И вот зимним днем 1909 года Марсден остановил на университетской лестнице Резерфорда и сказал: «Вы были правы, профессор:

они возвращаются». Это было невероятно и противоречило существующей модели атома. Таким образом, вместо доказательства правоты Томсона эксперименты Резерфорда доказали ее несостоятельность.

Тот факт, что альфа-частицы возвращались, говорил о том, что они столкнулись с преградой — очень массивной положительно заряженной частицей, но эти столкновения происходили очень редко, в среднем — одно на восемь тысяч. А это уже свидетельство о том, что... Впрочем, именно над этим и задумался Резерфорд.

## И ВСЕ-ТАКИ ОН ВЕРТИТСЯ!

И задумался он на целых два года. К 1911 году результатом его раздумий явилась новая модель строения атома. Однако обо всем по порядку.

Альфа-частицы, проходя через фольгу, проходят сквозь атомы золота в большинстве случаев без отклонений.

Из этого следуют два вывода. Первый: легкие электроны практически не влияют на движение тяжелой альфа-частицы. Вывод второй: так как альфа-частицы в большинстве случаев отклоняются на малые углы, атом в большей части своего объема пустой.

Небольшая часть альфа-частиц все же отклоняется на значительные углы. А значит, вывод третий такой: центральная часть атома очень маленьких размеров, но в ней сосредоточена почти вся масса атома, и эта центральная часть имеет положительный заряд. Она и получила название ядра атома.

## ФИЗИК ИЛИ ХИМИК?

Эрнест Резерфорд занимался исследованиями в основном в области физики и однажды заявил, что «все науки можно разделить на две группы — на физику и коллекционирование марок». Однако Нобелевскую премию ему вручили по химии, что стало неожиданностью как для него, так и для других ученых. Впоследствии он замечал, что из всех превращений, которые ему удалось наблюдать, «самым неожиданным стало собственное превращение из физика в химика»

## МУДРОСТЬ УЧЕНОГО

Однажды вечером Резерфорд зашел в лабораторию. Хотя время было позднее, в лаборатории склонился над приборами один из его многочисленных учеников.

— Что вы делаете так поздно? — спросил Резерфорд.

— Работаю, — последовал ответ.

— А что вы делаете днем?

— Работаю, разумеется, — отвечал ученик.

— И рано утром тоже работаете?

— Да, профессор, и утром работаю, — подтвердил ученик, рассчитывая на похвалу из уст знаменитого ученого. Резерфорд помрачнел и раздраженно спросил:

— Послушайте, а когда же вы думаете?

Согласно Резерфорду, атом состоит из массивного положительного ядра и вращающихся по определенным орбитам вокруг него электронов, что само по себе напомнило Солнечную систему, поэтому модель и получила название планетарной.

По соотношению между общим числом альфа-частиц и количеством отклонившихся на определенные углы можно рассчитать размер ядра и его заряд. Оказалось, что радиус ядра имеет порядок  $10^{-14}$  м. Заряд же ядра, как было сказано выше, положителен и определяется формулой  $q = Z * e$ , где  $Z$  — порядковый номер элемента в периодической системе элементов Менделеева, а  $e$  — модуль заряда электрона. Но эту связь установил Генри Мозли в экспериментах, выполненных в 1913 году.

Однако и эта модель атома оказалась в противоречии с классической физикой. Согласно теории Максвелла, любой ускоренно движущийся заряд должен непрерывно излучать электромагнитные волны. Поскольку электроны, вращаясь вокруг ядра, движутся с центростремительным ускорением, они должны непрерывно излучать электромагнитные волны. На самом же деле в нормальном состоянии атомы не излучают!

Благодаря излучению электромагнитных волн энергия электронов должна непрерывно уменьшаться, и они должны приближаться к ядру и в конце концов непременно «упасть» на него. Согласно расчетам, время «падения» должно составить  $10^{-8}$  с. Однако опыты показывают, что атомы существуют довольно продолжительное время.

Таким образом, эти факты были несовместимы с планетарной моделью атома Резерфорда, если рассматривать ее с позиции классической электродинамики.

Разрешения этих противоречий были еще впереди. Пока же количество вопросов значительно превышало число удобоваримых объяснений. Тем не менее это был значительный шаг на пути понимания устройства мира. Добавим лишь, что рассеяние микрочастиц на других частицах или атомных ядрах — это квантовый процесс, а для его описания необходимо уравнение Шредингера, которого в 1911 году еще попросту не было.



Эрнест Резерфорд (1871–1937) — британский физик новозеландского происхождения. Известен как отец ядерной физики. Лауреат Нобелевской премии по химии 1908 года



## ГЕНИАЛЬНАЯ ДОГАДКА БОРА

*Если тебя квантовая физика не испугала,  
значит ты ничего в ней не понял.*

Нильс Бор

Резерфорд создал весьма изящную модель: несмотря на то что она многого не объясняла, все же давала общее представление о строении атома. Для разрешения всех несоответствий требовался совершенно новый взгляд на существующие проблемы и новый математический аппарат.

Итак, модель атома Резерфорда содержала многие противоречия. Для их объяснения нужно было отказаться от классических представлений, прежде всего о непрерывности энергии и момента импульса. На арену снова выходил принцип квантования физических параметров атома.

*«Нет сомнения, что перед нами безумная теория, но весь вопрос в том, достаточно ли она безумна, чтобы окантаться еще и верной!»*

(Нильс Бор)

### СТАБИЛИЗАЦИЯ НЕСТАБИЛЬНОСТИ

И вот в 1913 году датский ученый Нильс Бор, работавший в свое время у Резерфорда в Манчестере, предложил свое представление о строении атома. Стоит сказать, что именно Бор, работая в Кембридже, указал самому великому Томсону на ошибку в расчетах мэтра, но то ли его недостаточный английский, то ли молодость привели к тому, что работа с Томсоном у Бора так и не сложилась.

Настало время создания модели, способной согласовать теорию и эксперимент. Бор показал, что несовпадение экспериментов Резерфорда с выводом возникло потому, что поведение микрочастиц нельзя описывать теми же законами, что и макроскопических тел. Он предположил, что величины, характеризующие микромир, должны

квантоваться, то есть, как мы уже знаем, могут принимать только определенные дискретные значения. К сожалению, эти законы в начале XX столетия еще не были установлены наукой.

Объяснив дискретность (скачкообразность) энергетических состояний простых атомов, Бор в своей теории подошел к объяснению многих внутриатомных процессов с принципиально новых позиций, она стала первой полуквантовой теорией атома. Ее значение состоит в смелом предположении о существовании стационарных состояний и скачкообразных переходов между ними. Эти положения позднее были распространены и на другие микросистемы.

За основу Бор взял планетарную модель атома Резерфорда. Как вы помните, с точки зрения классической электродинамики электрон в модели Резерфорда, двигаясь вокруг ядра, должен был бы излучать непрерывно и очень быстро, потеряв энергию, упасть на ядро. Бор допустил, что электроны в атоме могут двигаться только по определенным орбитам, находясь на которых, они не излучают, а излучение или поглощение происходит только в момент перехода с одной орбиты на другую. Причем стационарными являются только те орбиты, при движении по которым момент количества движения электрона равен целому числу постоянных Планка.

## ЗАКВАНТОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОН

Работая над своей теорией, датский ученый пришел к выводам, которые сформулировал в виде постулатов. Рассмотрим их подробнее.

## ФИЗКУЛЬТУРА И ФИЗИКА

Нильс Бор слыл хорошим спортсменом — он играл в футбол за сборную Дании в амплу вратаря. В Копенгагене Бора знали лучше как футболиста, нежели как знаменитого физика. Когда Бор в 1922 году был удостоен Нобелевской премии, датские спортивные газеты в этот день вышли с заголовком: «Нашему вратарю дали Нобелевскую премию!»



Нильс Бор (1885–1962) — датский физик-теоретик и общественный деятель, один из создателей современной физики. Лауреат Нобелевской премии по физике. Известен как создатель первой квантовой теории атома и активный участник разработки основ квантовой механики

Постулат 1. Электрон в атоме водорода может находиться только на орбитах, для которых значение момента импульса электрона равно целому числу постоянных Планка. Соответственно, энергия электрона на каждой из орбит имеет определенное значение  $E_n$ , а другие значения энергии невозможны. Находясь на этих орбитах, электрон не излучает энергию.

Постулат 2. Излучение энергии в виде электромагнитного излучения происходит только при переходе электрона с одной орбиты, с большей энергией  $E_i$ , на другую — с меньшей энергией  $E_f$ . Энергия испущенного фотона при этом:  $h\nu = E_i - E_f$ . При поглощении же энергии электрон переходит с орбиты с более низкой энергией на орбиту с более высокой энергией.

С математической точки зрения это можно представить так:  $E = hn$ , где  $E$  — разность энергии испущенного или поглощенного фотона,  $h$  — постоянная Планка,  $n$  — частота электромагнитной волны.

Вместе с тем теория Бора имела и существенные недостатки. Она была справедлива для простых, водородоподобных, атомов и не работает для элементов, следующих за водородом в таблице Менделеева. Она также не могла объяснить, почему совершаются те или иные переходы.

Теория Нильса Бора явилась крупным шагом в развитии атомной физики и являлась важным этапом в создании квантовой механики.

# ЗАПРЕТИТЬ НЕЛЬЗЯ РАЗРЕШИТЬ

*Ваша теория безумна, но недостаточно безумна,  
чтобы быть истинной.*

Нильс Бор — Вольфгангу Паули

Сколько у атома электронов и как они располагаются относительно ядра? Эти и другие подобные вопросы начали возникать по мере того, как ученые медленно продвигались в своих представлениях вглубь микромира, пытаясь понять суть его квантового строения.

К середине 20-х годов XX века ученый мир более или менее определился со строением атома и характеристиками электрона. Для описания его, электрона, движения в атоме применяется четыре квантовых числа. Рассмотрим их более детально.

## КВАНТОВЫЕ ЧИСЛА ЭЛЕКТРОНА

Главное квантовое число ( $n$ ) определяет энергетический уровень электрона, то есть его удаленность от ядра, или размер электронного облака. К этому времени физики-теоретики уже обосновали, что электрон — это не твердое тело, не шарик, который вы можете видеть во многих учебниках физики, вращающийся вокруг атомного ядра, а скорее размазанное в пространстве облако, в котором рассредоточены его масса и заряд. Главное квантовое число принимает целые значения ( $n = 1, 2, 3 \dots$ ) и соответствует номеру периода в периодической системе элементов Менделеева.

Орбитальное квантовое число ( $l$ ) характеризует геометрическую форму орбиты электрона, или, говоря научным языком, орбитали. Также может принимать значение целых чисел от 0 до  $n-1$ . Каждому значению орбитального квантового числа соответствует

*«Мы должны признать также, что на всех путях познания и избавления зависим от факторов, находящихся вне нашего контроля и носящих в религиозном языке название благодати»*

(Вольфганг Паули)

Принцип Паули: в атоме не может быть двух электронов, у которых значения всех квантовых чисел ( $n, l, m, s$ ) были бы одинаковы, то есть на каждой орбитали может находиться не более двух электронов

*«Работать с Паули было восхитительно, абсолютно восхитительно! Ему можно было задавать любые вопросы, не боясь, что они покажутся ему глупыми. Дело в том, что он считал глупыми все вопросы»*

(Виктор Вейскопф)

орбиталь особой формы. Набор орбиталей с одинаковыми значениями главного квантового числа  $n$  называется энергетическим уровнем, с одинаковыми  $n$  и  $l$  — подуровнем.

Магнитное квантовое число ( $m$ ) характеризует положение электронной орбитали в пространстве. Может принимать только целочисленные значения от  $-l$  до  $+l$ , включая 0, где  $l$  — орбитальное квантовое число.

И в заключение — спиновое квантовое число ( $s$ ) характеризует магнитный момент, возникающий при вращении электрона вокруг своей оси. Может принимать только два значения:  $+1/2$  и  $-1/2$ , которые соответствуют противоположным направлениям вращения.

Осталось разобраться с тем, как несколько электронов «уживаются» в одном атоме и какой закон обеспечивает их распределение по энергетическим уровням.

## КАЖДЫЙ СВЕРЧОК ЗНАЙ СВОЙ ШЕСТОК

Представьте необычный зрительный зал в театре, где каждый ярус кресел количественно больше предыдущего, но их число в каждом ряду всегда четное. При заполнении зала сначала заполняется первый ряд, причем рядом могут сидеть только существа противоположного пола, по мере подхода все новых и новых пар заполняются последующие ярусы.

Приведенный пример наглядно описывает один из фундаментальных законов квантовой механики — принцип запрета и объясняет, как электроны распределяются в околоатомном пространстве.

Принцип запрета был сформулирован немецким ученым Вольфгангом Паули

в 1925 году. Вначале он относился только к электронам, но в дальнейшем выяснилось, что он применим ко всем легким частицам, получавшим обобщенное наименование — фермионы.

Обобщенный принцип Паули, а именно такое название получил принцип запрета, можно сформулировать следующим образом: в пределах одной квантовой системы (системы, в которой ее параметры и характеристики меняются только скачкообразно) в данном квантовом состоянии может находиться только один фермион, состояние другого должно отличаться хотя бы одним квантовым числом.

Можно сказать, что Паули отвел каждой частице определенное место и обосновал принцип построения атомной оболочки. Строение микромира приобретало все более определенные очертания. Квантовая теория из просто теории становится реальным аппаратом для описания законов микрочастиц.

Принцип запрета Паули представляет собой яркий пример закона природы нового типа, он позволил объяснить разнообразные физические явления. Как следствие — электронные оболочки помогли объяснить разнообразие химических элементов и их соединений, предсказывать новые элементы. Законы этого типа принципиально отличаются от законов классической физики — они не предсказывают, что произойдет в системе. Вместо этого они определяют, чего в системе не может произойти.



Вольфганг Эрнст Паули (1900–1958) — швейцарский физик-теоретик, работавший в области физики элементарных частиц и квантовой механики. Лауреат Нобелевской премии по физике за 1945 год

## ЭЛЕКТРОННЫЕ ВОЛНЫ ДЕ БРОЙЛЯ

*Де Бройль был первым, кто осознал тесную физическую и формальную взаимосвязь между квантовыми состояниями материи и явлениями резонанса еще в те времена, когда волновая природа материи не была открыта экспериментально.*

Альберт Эйнштейн

Если кванты света могут себя вести и как волна, и как частица, то могут ли подобным образом вести себя другие микрочастицы, составляющие атом? Настала пора ответить и на этот вопрос.

Мы уже знаем, что фотон ведет себя в пространстве не только как некий материальный объект — корпускула, но и как волна. Причем длина этой волны определяется формулой  $\lambda = h/p$ , где  $h$  — постоянная Планка, а  $p$  — импульс частицы. Вопросом, любая ли движущаяся частица может себя вести подобным образом, заинтересовался французский физик-теоретик Луи де Бройль.

*«Полезно поразмыслить над ошибками, сделанными великими умами, поскольку они часто имели серьезное основание, чтобы их сделать»*  
(Луи де Бройль)

### ЧАСТИЦА ПРЕВРАЩАЕТСЯ... В ВОЛНУ

Напомним, что впервые квантовые свойства были открыты Максом Планком при исследовании законов теплового излучения тел. Тогда в науку и вошло представление о «световых порциях» — квантах электромагнитного поля. Вместе с тем уже давно были известны волновые свойства электромагнитного излучения, проявляющиеся, например, в явлениях дифракции (огибании светом препятствий, сравнимых с длиной волны) и интерференции (наложении волн друг на друга) света.

Впервые идею о корпускулярно-волновой природе электрона французский физик выдвинул еще в 1923 году. Позднее это

оказалось справедливым и для других составляющих атома. Выдвинутая им гипотеза хорошо обосновала казавшийся загадочным принцип стационарных орбит в модели атома Бора.

Де Бройль предположил, что если частица имеет массу  $m$  и скорость  $v$ , значительно меньшую скорости света  $c$ , импульс частицы  $p = mv$ , то длина волны должна определяться формулой  $\lambda = h/mv$ .

Волновые свойства макроскопических объектов практически не проявляются из-за очень малых длин волн. Из приведенной выше формулы следует, что длина волны де Бройля тем меньше, чем больше масса частицы и ее скорость. Например, для тела массой 200 г, движущегося со скоростью 3 м/с, вычисленная длина волны приблизительно равна  $10^{-32}$  см, что лежит за пределами наших наблюдательных возможностей. Однако для микрочастиц длины волн лежат в доступной наблюдению области. Так, для электрона, ускоренного разностью потенциалов 100 вольт, длина волны составит всего около  $10^{-9}$  м, что соответствует размеру атома.

Волновые свойства электронов должны проявиться, например, при их рассеянии на кристаллах, на которых уже к этому времени наблюдали дифракцию рентгеновских лучей.

Оставалось проверить теорию на практике. Как же это сделать?

## ОКОШКО В МИКРОМИР

Впервые экспериментальное подтверждение гипотезы де Бройля осуществили американские ученые Клинт Дэвиссон и Лестер Джермер. Они разогнали пучок электронов

Волны де Бройля — волны, связанные с любой движущейся микрочастицей, отражающие ее квантовую природу



Луи де Бройль (1892–1987) — французский физик-теоретик, один из основоположников квантовой механики, лауреат Нобелевской премии по физике за 1929 год



## ЛАУРЕАТ-ДОЛГОЖИТЕЛЬ

Дольше всех с момента получения Нобелевской премии по физике и Нобелевской премии вообще прожил лауреат 1929 года Луи де Бройль, умерший в 1987 году в возрасте 94 лет

в электрическом поле с разностью потенциалов до 150 вольт и пустили его на кристалл никеля. Было установлено, что на кристалле происходит дифракция электронов, причем полученная длина соответствует соотношению де Бройля, а следовательно, электрон в данном случае действительно ведет себя как волна.

Таким образом, подтвержденная на опыте идея де Бройля о корпускулярно-волновом дуализме микрочастиц принципиально изменила представления об облике микромира. Поскольку всем микрообъектам — по традиции будем все же называть их частицами — присущи и корпускулярные, и волновые свойства, то любую из этих «частиц» нельзя считать ни частицей, ни волной в классическом понимании этих слов. Возникла потребность в такой теории, в которой волновые и корпускулярные свойства материи выступали бы не как исключаяющие, а как взаимно дополняющие друг друга. В основу именно такой теории — волновой, или квантовой механики, и легла подтвержденная гипотеза де Бройля.

Сегодня волновые свойства составляющих атом частиц, а также самих атомов и молекул не только доказаны прямыми опытами, но и широко используются в установках с высокой разрешающей способностью.

Существование волн де Бройля лежит в основе работы электронного микроскопа, разрешающая способность которого на много порядков выше, чем у любого оптического микроскопа, что позволяет ученым наблюдать молекулы и атомы. Метод дифракции частиц в настоящее время широко используется при изучении строения и свойств вещества.

## УРАВНЕНИЕ ШРЕДИНГЕРА

*Я не вижу лучшего и более ясного способа для достижения цели, чем мой собственный, хотя, быть может, и извилистый путь.*

Эрвин Шредингер

Если электрон не только частица, но и волна, как было доказано Луи де Бройлем, то должен существовать математический аппарат, позволяющий описывать его состояние в каждый конкретный момент времени. И такой аппарат появился стараниями Эрвина Шредингера.

Согласно законам квантовой механики, невозможно одинаково точно определить все свойства субатомной частицы. Об этом более детально будет сказано ниже. Вместо того чтобы определять местонахождение частицы, квантовая теория предлагает измерить так называемую волновую функцию.

### ГДЕ ЖЕ ТЫ, ЭЛЕКТРОН?

Волновая функция подобна звуковой волне с той разницей, что математическое описание звуковой волны определяет движение молекул в воздухе в конкретном месте, а волновая функция описывает вероятность появления частицы в том или ином месте.

Волновая функция непосредственно не имеет физического смысла, она лишь помогает описать эволюцию квантовых систем во времени, а ее квадрат — это вероятностная плотность пространственно-временного распределения этой системы. Фактически отвечает на вопрос, какая часть квантовой системы находится в конкретной области пространства в конкретный временной промежуток. Измерить эту функцию также не просто, но физики-теоретики могут примерно предсказать ее значения.

*«Думаю, что могу смело сказать, что никто не понимает квантовую механику»*

(Ричард Фейнман)

Описание состояния микрообъекта с помощью волновой функции имеет статистический, вероятностный характер: квадрат модуля волновой функции (квадрат модуля амплитуды волны де Бройля) определяет лишь вероятность нахождения частицы в момент времени в области с координатами  $x$  и  $dx$ ,  $y$  и  $dy$ ,  $z$  и  $dz$

Итак, в квантовой механике состояние частицы описывается принципиально по-новому — с помощью волновой функции, которая является основным носителем информации о ее корпускулярных и волновых свойствах.

Справедливости ради заметим, что вероятностное описание не было новостью для физиков. В классической теории оно использовалось, когда объект исследования был настолько сложным, что полное предсказание его эволюции становилось невозможным из-за действия неконтролируемых случайных факторов. В квантовой теории утверждалось, что даже в каждом единичном случае рассеяния электрона на кристалле принципиально невозможно предсказать, на каком месте экрана он обнаружится, а можно лишь предсказать вероятности этого.

Надо сказать, что такая вероятностная интерпретация квантовой теории принималась далеко не всеми учеными. Имея в виду вывод о принципиальной непредсказуемости результатов измерений, Эйнштейн писал: «Господь Бог не играет в кости!», да и сам де Бройль до конца дней пытался найти пути к спасению обусловленности физики.

## ВОТ ТАК ОТДОХНУЛ!

Волны де Бройля, как мы видели ранее, неправильно толковать как классические, что и было выяснено в дискуссиях с физиками так называемой копенгагенской школы во главе с Бором, где и было выдвинуто принципиально новое, вероятностное или статистическое, толкование.

На Рождество 1925 года австрийский физик Эрвин Шредингер отправился в небольшой

отпуск в местечко Ароза, пригласив старую подругу из Вены составить ему компанию. Чтобы скоротать время, он взял с собой некоторые записи де Бройля. Когда же он вернулся из отпуска 8 января 1926 года, то объявил об открытии волновой механики — теории, описывающей электрон как волну.

Фактически Шредингер предположил, что любая материя существует в виде волн, подобных классическим электромагнитным, хотя и несколько отличающихся от них.

Согласно его работе, волновое уравнение, которое впоследствии получило его имя, относится к ненаблюдаемой величине — так сказать, к амплитуде вероятностей. А квадрат модуля этой величины дает картину распределения вероятностей обнаружить частицу в различных точках пространства. Так, если частица свободная, то эта вероятность вообще не зависит от координат и от времени, то есть одинаково вероятно обнаружить ее в любой точке. Это, однако, не означает, что частица «равномерно размазана» по всему пространству: можно говорить лишь о вероятности ее обнаружения. Таким образом, описание материи приобрело принципиально новые черты, оно становится статистическим, то есть вероятностным. А квантовая механика стала самой удивительной областью науки, которая в буквальном смысле переворачивает наши взгляды на повседневные вещи.

Остается только добавить, что в ответ на так называемую проблему копенгагенской интерпретации квантовой механики, согласно которой она описывает не микрообъекты сами по себе, а их свойства, проявляющиеся в макроусловиях, создающихся классическими измерительными приборами в процессе акта



Эрвин Шредингер (1887–1961) — австрийский физик-теоретик, один из создателей квантовой механики. Лауреат Нобелевской премии по физике 1933 года

## ИМЯ ДЛЯ ПРЕМИИ

В 1956 году Австрийская Академия наук учредила премию имени Эрвина Шредингера. Первым ее лауреатом стал сам Шредингер

### ...ТАЛАНТЛИВ ВО ВСЕМ

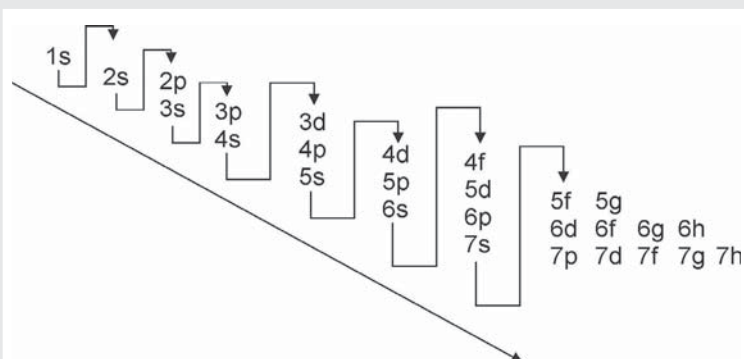
Был Шредингер, помимо прочего, мыслителем, знал шесть языков и читал философов в подлиннике. В длинном списке его работ есть исследование на стыке биологии и физики: «Что такое жизнь с точки зрения физики?». И вот вам ответ Шредингера: «Работа специальным образом организованной системы по понижению собственной энтропии за счет повышения энтропии окружающей среды»

наблюдения, Шредингер решил продемонстрировать неполноту квантовой механики при переходе от субатомных систем к макроскопическим и пришел к странному, но интересному мысленному эксперименту.

Представьте себе коробку, в которой находится живой кот, радиоактивный материал, молоток и едкая кислота. Если радиоактивный материал распадется, то это приведет к тому, что молоток упадет на контейнер с кислотой и разобьет его, что, в свою очередь, приведет к смерти кота. Но Шредингер утверждал, что шансы на распад радиоактивного материала спустя ровно час составляют 50%. Логично предположить, что через час кот будет либо жив, либо мертв, и мы не сможем определить это, пока не откроем ящик. Сам же Шредингер заключил, что, согласно квантовой механике, кот одновременно жив и мертв до того момента, пока мы не откроем коробку и не узнаем его состояние.

Этот эксперимент еще раз подчеркивает вероятностный характер описания событий микромира.





Согласно принципу Паули, примерный порядок заполнения атомных орбиталей – от  $1s$  до  $7p$



Знаменитый «кот Шредингера»

# ОБРЕТЕНИЕ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

*Здесь, возможно, был Гейзенберг.*

Надпись на стенах физического факультета некоторых университетских городков

Какова скорость частицы в определенной точке пространства и поддаются ли вообще эти параметры измерению? На эти вопросы ответил молодой ученый Вернер Гейзенберг, а сформулированный им принцип неопределенности стал фундаментом для создания нового раздела физики — квантовой механики.

Мы подошли к очень важному периоду в развитии квантовой физики, поэтому в начале этой главы стоит еще раз повторить и подытожить некоторые главные положения, о которых мы уже говорили ранее.

## 38 ПОПУГАЕВ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ

В обыденной жизни нас окружают предметы, более или менее сопоставимые по размерам с нами. Мы привыкли наблюдать тела и явления, которые замечательно подчиняются законам классической, или ньютоновской, физики. Мы можем проводить с такими телами мысленный эксперимент, с достаточной степенью достоверности прогнозируя результат.

Чтобы получить характеристики того или иного объекта, достаточно его измерить, или, как говорят физики, сравнить с эталоном единицы измерения. При этом мы воздействуем на тела весьма незначительно, фактически наше воздействие стремится к нулю, а значит, тела при измерении не меняют своих первоначальных характеристик и погрешность нашего

*«Опыты, определяющие какую-нибудь физическую величину, делают в то же время недействительным ранее добытое знание других величин...»*

(Вернер Гейзенберг)



### **ПРИТЧА, РАСКАЗАННАЯ ГЕЙЗЕНБЕРГОМ**

Жил старый раввин. Пришел к нему один человек в отчаянии от всех происходивших вокруг него изменений. «Все в мире может способствовать нашему знанию: не только то, что создал Бог, но и все то, что сделал человек». — «Чему мы можем научиться у железной дороги?» — спросил в сомнении пришедший. «Тому, что из-за одного мгновения можно упустить все». — «А у телеграфа?» — «Тому, что за каждое слово надо отвечать». — «У телефона?» — «Тому, что там слышат то, что мы здесь говорим»

измерения ограничивается только ценой деления измерительных приборов.

В микромире все обстоит иначе. Частицы там предстают сразу в двух ипостасях: и как волна, и как частица, говоря языком науки, здесь присутствует корпускулярно-волновой дуализм. Представить это с точки зрения формальной логики невозможно. Допустим, вы летите самолетом из Москвы в Санкт-Петербург и находитесь одновременно в каждой точке пространства между этими городами и одновременно — в конкретном кресле самолета. Описать подобное состояние частиц в классической механике не представляется возможным, поэтому на заре изучения микромира встал вопрос о принципиально новом подходе к этому вопросу.

Для того чтобы измерить, например, скорость электрона или найти его местоположение в пространстве, необходимо на него воздействовать. Поскольку инструментов для подобных измерений попросту не существует, на наш электрон необходимо воздействовать другой частицей, или же квантом света — фотоном. Но поскольку наш «инструмент» сопоставим с размерами самой исследуемой частицы, ее параметры в момент измерения значительно меняются. Говоря проще, в микромире любое измерение воздействует на частицу и меняет ее характеристики, такие как скорость и место положения. А значит, определить одновременно эти два параметра не представляется возможным. То есть в момент воздействия мы можем знать пространственные координаты частицы, но не иметь никакого представления о ее скорости. И наоборот.

## НЕУЛОВИМЫЙ ЭЛЕКТРОН

Начало XX века — это время формирования представлений о микромире. Великие умы той эпохи — Нильс Бор, Макс Борн, Альберт Эйнштейн, Арнольд Зоммерфельд — пытались объяснить, как ведут себя атом и его составляющие, выдвигали гипотезы. Задачей определения параметров микрочастиц в 1920-е годы заинтересовался молодой ассистент Нильса Бора, немецкий физик-теоретик Вернер Гейзенберг. Начав со сложных математических расчетов, описывающих положение дел на субатомном уровне, в 1927 году он вывел изящную по своей простоте формулу и сформулировал ставший ключевым для создания квантовой механики принцип соотношения неопределенностей, впоследствии получивший его имя: невозможно одновременно с точностью определить координаты и скорость квантовой частицы.

Математически выражение соотношения неопределенностей Гейзенберга выглядит так:

$$\Delta x * \Delta v > h/m,$$

где  $\Delta x$  — неопределенность (погрешность измерения) пространственной координаты микрочастицы,  $\Delta v$  — неопределенность скорости частицы,  $m$  — масса частицы, а  $h$  — постоянная Планка.

Иногда в литературе по квантовой механике можно встретить утверждения, будто принцип неопределенности подразумевает, что у квантовых частиц отсутствуют определенные пространственные координаты и скорости или же что эти величины абсолютно непознаваемы. На самом деле это не так. Принцип неопределенности не мешает нам с любой желаемой точностью



Вернер Гейзенберг (1901–1976) — немецкий физик-теоретик, один из создателей квантовой механики, лауреат Нобелевской премии по физике 1932 года

## ВЕХИ СУДЬБЫ

В 1926 году Гейзенберг стал ассистентом Нильса Бора в Копенгагене. Именно там в 1927 году он и сформулировал свой принцип неопределенности. В том же году Гейзенберг стал профессором Лейпцигского университета — самым молодым профессором в истории Германии. За ведущую роль в разработке квантово-механической теории в 1932 году Гейзенберг был удостоен Нобелевской премии по физике

измерить каждую из этих величин отдельно. Он утверждает лишь, что мы не в состоянии достоверно узнать и то и другое одновременно.

Принцип неопределенности связывает не только пространственные координаты и скорость, но и другие пары взаимно связанных характеристик микрочастиц, например, энергию квантовой системы и момент времени, в который она этой энергией обладает. Понятно, что на измерение энергии квантовой системы нам потребуется какое-то время, но за этот промежуток времени энергия системы случайным образом изменится, и определить ее абсолютно точно мы не сможем.

В заключение сделаем два важных замечания относительно принципа неопределенности:

- он не подразумевает, что какую-либо одну из двух характеристик частицы, например, пространственное местоположение или скорость, нельзя измерить сколь угодно точно;
- принцип неопределенности действует объективно и не зависит от присутствия разумного субъекта, эти измерения проводятся.

Принцип неопределенности Гейзенберга стал фундаментом для создания нового раздела физики — квантовой механики, за которую Вернер Гейзенберг в 1932 году и был удостоен Нобелевской премии.

## ДОПОЛНИТЕЛЬНОСТЬ БОРА

*Закон природы выражается тем проще,  
чем более общим он является.*

Макс Планк

Согласно соотношению неопределенностей Гейзенберга, нельзя в одном и том же опыте определить обе характеристики атомного объекта — координату и импульс. А что если предположить, что микрочастица — это не корпускула и не волна, а нечто третье?

Развивая принцип неопределенности Гейзенберга, Бор пошел дальше. Он отметил, что координаты и импульс частицы нельзя измерить не только одновременно, но вообще с помощью одного и того же прибора.

Так, для измерения импульса микрочастицы необходим чрезвычайно легкий и подвижный «инструмент». Но именно из-за его подвижности положение его весьма неопределенно. Для измерения же координаты нужен очень массивный «инструмент», который оставался бы неподвижным при попадании в него частицы. Но изменения импульса мы при этом не заметим.

### РАЗНОСТОРОННИЙ ВЗГЛЯД НА ВЕЩИ

Сейчас это очевидно, но до Бора все были убеждены, что несовместимость двух типов приборов влечет за собой противоречивость их свойств. Бор отрицал такую прямолинейность суждений и объяснил, что свойства их действительно несовместимы, но для полного описания атомного объекта оба они одинаково необходимы и поэтому не противоречат, а дополняют друг друга. Этот принцип и получил название дополнительнойности Бора и был им сформулирован в 1927 году.

Среди положений формальной логики существует «правило исключенного третьего»,

*«...Теперь атомный физик далеко ушел от идиллических представлений старомодного натуралиста, который надеялся проникнуть в тайны природы, подстерегая бабочек на лугу»*

(Макс Борн)

## ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ И ВЗАИМОИСКЛЮЧАЮЩИЕ

Согласно принципу дополнителности, для полного описания квантовомеханических явлений необходимо применять два взаимоисключающих, или «дополнительных», набора классических понятий, совокупность которых и дает исчерпывающую информацию об этих явлениях как о целостных. Например, дополнительными в квантовой механике являются пространственно-временная и энергетически-импульсная картины

согласно которому из двух противоположных высказываний одно истинно, другое — ложно, а третьего быть не может. В классической физике все хорошо соотносилось с вышеуказанным принципом, поскольку там понятия «волна» и «частица» действительно противоположны и несовместимы по существу. В атомной же физике оба понятия одинаково хорошо применимы для описания свойств одних и тех же объектов, причем для полного описания необходимо использовать их одновременно.

Таким образом, принцип дополнительности Бора примирил недостатки устоявшейся системы понятий с новыми знаниями о мире. Этот принцип расширил возможности нашего мышления, объяснив, что в атомной физике меняются не только понятия, но и сама постановка вопросов о сущности физических явлений.

На самом же деле значение принципа дополнительности выходит далеко за пределы квантовой механики. Позднее этот принцип был распространен и на другие области науки.

Например, сам Бор любил приводить пример из биологии, связанный с жизнью клетки, сравнивая ее роль с ролью атома в физике. Изучить жизнь клетки — значит узнать все элементарные процессы, которые в ней происходят, и при этом понять, как их взаимодействие приводит к совершенно особому состоянию материи — к жизни. Однако при попытке выполнить эту программу одновременное сочетание анализа и синтеза неосуществимо. В самом деле, чтобы проникнуть в детали механизмов клетки, мы воздействуем на нее, то есть вмешиваемся в ее функции,

а значит, ничего не узнаем о ней как о целостном живом организме.

## ТРЕТЬЕ СОСТОЯНИЕ МАТЕРИИ

Фактически Бор показал, что сам вопрос «Что такое атомная частица — это все-таки частица или же волна?» поставлен некорректно применительно к атомным объектам. У атома нет отдельных свойств частицы или волны, поэтому на поставленный вопрос нельзя ответить однозначно, подобно тому, как нельзя ответить на вопрос «Что больше — вольт или килограмм?».

Нельзя разделить дополняющие друг друга свойства атома, не разрушив при этом его единство. Составляющие атом частицы — это и не частицы, и не волны, а также ни то ни другое одновременно. Это нечто третье, которое нельзя представить как простую сумму корпускулярных и волновых свойств частицы. И хотя это «нечто» и недоступно нашему восприятию, тем не менее оно реально существует. Как существует мелодия, представляющая собой нечто большее, чем набор составляющих ее нот.

Если мы возьмем отдельно понятия «состояние» и «наблюдение», то, согласно Бору, они будут дополнительные. Ведь взятые каждый в отдельности они неполны, а значит, могут быть определены только друг через друга. Фактически эти понятия не существуют отдельно. Мы всегда наблюдаем только конкретное состояние объекта! Само же состояние объекта остается вещью в себе, пока мы не найдем способ его «наблюдения».

Понятия «волна», «частица», «состояние квантовой системы», «наблюдение системы»,

## ПРАВДА ЛИ, ЧТО?..

На дверях своего дома Нильс Бор повесил подкову. Увидев ее, один его гость спросил: — Неужели вы, ученый-физик с мировым именем, верите, что подкова над дверью приносит счастье?

— Нет, — сказал Бор, — я, конечно, не верю. Но вы знаете, она приносит счастье даже тем, кто не верит...

*«Противоположно-  
сти — не проти-  
воречия, они — до-  
полнения»*

(Нильс Бор)

взятые по отдельности, — это только абстракции, не имеющие никакого отношения к миру атомов, но они необходимы для его понимания.

Наука — это только один из способов познать окружающий нас мир. Другой, дополнительный, способ — искусство. Совместное существование искусства и науки может служить хорошей иллюстрацией принципа дополненности. Можно либо в полной мере заняться наукой, не имея понятия об искусстве, и наоборот. Оба эти отношения к жизни в одинаковой мере правомерны, но взятые по отдельности неполны по своей сути.

# СПИН

*Что нам действительно нужно, так это воображение,  
но воображение в надежной смиренной рубашке.*

Ричард Фейнман

Вспомним, что для описания элементарной частицы ученые ввели четыре квантовых характеристики. Если с тремя более-менее все понятно, то что собой представляет магнитный момент, возникающий при вращении, или спин, мы попытаемся сейчас выяснить.

Сегодня ученые могут классифицировать более 400 различных элементарных частиц. Великий итальянский физик Энрико Ферми на вопрос студента о названии какой-то элементарной частицы ответил: «Молодой человек, если бы я мог запомнить названия всех этих частиц, я бы стал ботаником».

## ЭЛЕМЕНТАРНО ОБ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ

Вначале немного разберемся с понятием «элементарная частица».

Элементарная частица — термин собирательный и относится к объектам, размеры которых меньше, чем размеры ядра атома. Разделить элементарные частицы на части невозможно, хотя их подавляющее большинство и имеет сложную внутреннюю структуру. И только 28 частиц считаются бесструктурными и рассматриваются учеными как первичные, или фундаментальные, частицы. Характерной особенностью элементарных частиц является их взаимное превращение.

Чем же характеризуются элементарные частицы? Прежде всего, это масса, электрический заряд, время жизни и спин, о котором и пойдет речь ниже.

По массе все частицы делятся на тяжелые — адроны, средние — мезоны,

## ПОЧТИ КАК LEGO

Элементарные частицы — своего рода конструктор LEGO, из которого строятся все объекты нашей Вселенной. Все элементарные частицы делятся на две группы: фермионы — частицы вещества (материи) и бозоны — переносчики взаимодействия



*«Вы оба достаточно молоды, чтобы позволить себе сделать одну глупость!»*

(Пауль Эренфест  
об открытии  
спина Джорджем  
Уленбеком  
и Сэмюэлем  
Гаудсмитом)



Лейден, 1926 год.  
Сотрудники Хейке  
Камерлинг-Оннеса  
и Пауля Эренфеста.  
Крайний слева — Джордж  
Уленбек, крайний  
справа —  
Сэмюэл Гаудсмит

легкие — лептоны. В зависимости от времени жизни элементарные частицы можно разделить на стабильные ( $10^{20}$ — $10^{30}$  лет), квазистабильные (10 — 20 сек) и нестабильные ( $10^{-23}$ — $10^{-24}$  с).

Еще в квантовой механике любой элементарной частице можно приписать некий собственный момент вращения, никак не связанный с ее движением в пространстве. Это свойство частиц является квантовым и не допускает классической интерпретации.

Собственный момент импульса частицы называется спином, в отличие от момента, связанного с движением частицы в пространстве, о котором говорят как об орбитальном моменте.

Идея о наличии у элементарных частиц собственного вращательного момента была высказана американцами Джорджем Уленбеком и Сэмюэлем Гаудсмитом в 1925 году. В квантовую же механику спин был введен Паули в 1927 году.

## ДВИЖЕНИЕ — ЭТО ЖИЗНЬ

Спин характеризует тот факт, что частицы ведут себя так, будто бы они вращаются около собственной оси, их можно представить как миниатюрные волчки. Спин задает направление частице, так же как ось волчка — всему устройству. Спин может реагировать на толчки так же, как это делает волчок, если толкать его в сторону, и вообще ведет себя подобно миниатюрным гироскопам.

Если частица имеет заряд, то у вращающейся заряженной частицы должен быть и магнитный момент. Можно сказать, что элементарные частицы представляют собой миниатюрные магниты.

Итак, спин — это момент вращения элементарной частицы, и ничего больше за этим словом не кроется. Как и все квантовые характеристики, он может принимать только строго определенные значения.

Обычно спин измеряется в количестве квантов вращения, которое имеет элементарная частица. Если говорят, что у частицы спин равен  $(+1)$ , значит она имеет один квант вращения по часовой стрелке. Если у частицы спин равен  $(-1)$ , значит эта частица имеет один квант вращения против часовой стрелки. Частицы, например электроны, могут иметь и полуцелый спин —  $(+\frac{1}{2})$  или  $(-\frac{1}{2})$ .

Спин принято измерять в долях постоянной Планка: минимальное возможное значение спина соответствует  $\frac{1}{2}$  постоянной Планка. Но, как правило, физики говорят просто  $\frac{1}{2}$ , 1, 2 и так далее.

Частицы, имеющие целый спин, можно остановить. Если вращающийся фотон, имеющий только целый спин, отдаст один квант вращения, который он имеет, то он перестанет вращаться и его спин станет равным 0. Частицы, имеющие целый спин, называются бозонами. А электрон, имеющий, как было сказано, полуцелый спин, половину кванта вращения отдать не может. Вращение можно отдавать и принимать только целым числом квантов. Поэтому электрон не может остановиться, ведь если спин электрона равен  $(+\frac{1}{2})$  и этот электрон отдает один квант вращения по часовой стрелке  $(+1)$ , то получаем  $(+\frac{1}{2}) - (+1) = (-\frac{1}{2})$ . То есть этот электрон начинает вращаться в другую сторону с той же самой скоростью. Такие частицы принято называть фермионами.

Итак, самый простой пример спина — это целый спин, равный 1. Попробуем представить

*«Через много лет я рассказал Уленбеку о том, как тяжело дался мне этот первый день, проведенный в беседе с ним. Он с улыбкой ответил, что и сам прошел через это, когда впервые встретился с Эренфестом. А Эренфест, в свою очередь, получил тот же урок от великого Людвига Больцмана в Вене. Эта традиция является частью обучения в великом старом стиле, который направлен на обучение лишь нескольких студентов... Между тем, я думаю, старая школа преподавания ушла в небытие, поскольку теперь гораздо большее число студентов получает высшее образование»*

(Абрахам Пайс, американский физик-теоретик)

*«Все статьи Уленбека сравнительно короткие и выделяются своей лаконичностью, точностью и ясностью, они прекрасно отполированы с целью более глубокого понимания основной проблемы в статистической физике. Они не содержат длинных формальных выводов и почти все связаны с конкретными проблемами... они были примером классического благородства, математической чистоты и ясности... Он чувствовал, что нечто действительно оригинальное делается лишь однажды — как спин электрона, — а остальное время тратится на прояснение основ»*

(Клод Козн-Таннуджи, ученик Уленбека)

себе это наглядно. Возьмем вектор, в качестве примера — заточенный карандаш, лежащий на столе, и повернем его на 360 градусов. Этот вектор вернется в свое первоначальное состояние: наш карандаш будет лежать так же, как и до поворота.

Еще легче представить себе спин, равный 0. Это точка, которая со всех сторон выглядит одинаково.

При спине, равном 2, достаточно взять наш карандаш и заточить его с обеих сторон, тогда для возврата в положение, не отличное от исходного, достаточно повернуть его всего на 180 градусов.

А вот для представления полуцелого спина, равного  $\frac{1}{2}$ , нужно взять ленту Мебиуса и представить, что по ней ползет муравей, тогда, сделав один оборот, то есть пройдя 360 градусов, муравей окажется в той же точке, но с другой стороны ленты, а чтобы вернуться в точку, откуда он начал путь, придется пройти 720 градусов.

Таким образом, частицы, обладающие целым спином, восстанавливают свое состояние, если делают полный оборот, частицы же с полуцелым спином восстанавливают свое состояние, лишь повернувшись вокруг своей оси два раза.

Отметим, что вектор спина является единственной величиной, характеризующей ориентацию частицы в квантовой механике.

Переоценить значение спинов в современной физике трудно. Они являются основой для построения квантовых вычислителей, различного рода датчиков, часов, они ответственны за свойства атомов и свойства материалов. Это маленькие магнитики-гироскопы, прочно обосновавшиеся в нашей жизни.

# СТАТИСТИКА ФЕРМИ — ДИРАКА

*Физические законы должны обладать математической красотой.*

Поль Дирак

Если все однородные частицы в квантовой физике абсолютно тождественны, то есть неотличимы друг от друга, то как же описать их состояние? Вот тут на первый план и выходит квантовая статистика. А поскольку фермионы и бозоны ведут себя отлично друг от друга, начнем рассказ с фермионов.

В классической физике все микрочастицы в принципе различимы, в квантовой же физике различия между одинаковыми частицами нет! Поэтому все описание сводится к статистическому анализу вероятности событий.

Выше мы описали понятие спина и указали, что частицы, имеющие спин, равный  $\frac{1}{2}$ , называются фермионами. К фермионам относится, например, электрон. В отличие от бозонов, имеющих спин, равный 1, фермионы подчиняются принципу Паули, чего нельзя сказать о бозонах.

## НЕРАЗЛИЧИМЫЕ БЛИЗНЕЦЫ, ИЛИ ОДНО И ТО ЖЕ

Описанием поведения частиц занимается квантовая статистика — раздел статистической физики, исследующий системы, которые состоят из огромного числа частиц, подчиняющихся законам квантовой механики.

Изучаемые в курсе классической молекулярной физики частицы можно было рассматривать как упругие шарики. При этом каждую из одинаковых частиц можно было отличить от других — как бы «пронумеровать», отследить траекторию каждой из них. При рассмотрении поведения коллектива таких частиц можно пользоваться

## ОДНОВРЕМЕННО...

Статистика Ферми — Дирака была предложена в 1926 году итальянским физиком Энрико Ферми и одновременно английским физиком Полем Дираком, который выяснил ее квантово-механический смысл



Энрико Ферми (1901–1954) — итальянский физик, наиболее известный благодаря созданию первого в мире ядерного реактора, внесший большой вклад в развитие ядерной физики, физики элементарных частиц, квантовой и статистической механики. Считается одним из «отцов атомной бомбы». Лауреат Нобелевской премии по физике 1938 года

распределением Максвелла и Больцмана — это статистическое распределение частиц с различными энергетическими состояниями в термодинамическом равновесии при достаточно высокой температуре и достаточно низкой плотности.

## ОН НАС ПОСЧИТАЛ!

Природа же квантовых частиц не позволяет отличить их друг от друга. Если две тождественные частицы, то есть частицы с одинаковыми массами, зарядом, спином и так далее, взаимодействуют, то мы не можем выяснить, какая из двух частиц была первая, а какая вторая. В квантовой физике действует принцип неразличимости тождественных частиц: тождественных частицы экспериментально различить принципиально невозможно.

Для описания поведения систем фермионов и их вероятного распределения по энергетическим уровням применяется статистическое распределение Ферми — Дирака. Еще раз напомним, что фермионы (электроны, протоны, нейтроны и др.) подчиняются принципу запрета Паули. В таких системах в одном квантовом состоянии может находиться не более одной частицы. Согласно этой статистике и описывается вероятность того, что состояние с некоторой энергией  $E$  при температуре  $T$  будет занято электроном.

Итак, распределение Ферми — Дирака математически отражает суть поведения частиц с полуцелым спином: присутствие фермиона в конкретном квантовом состоянии запрещает другим фермионам находиться в том же состоянии.

## СТАТИСТИКА БОЗЕ — ЭЙНШТЕЙНА

*Невозможно решить проблему на том же уровне, на котором она возникла. Нужно стать выше этой проблемы, поднявшись на следующий уровень.*

Альберт Эйнштейн

Если с фермионами более-менее понятно, то как же будут распределяться бозоны, к которым не применим принцип Паули и количество однотипных частиц, находящихся в одном и том же состоянии, может быть любое?

Одним из важнейших объектов изучения квантовой статистики, как и классической, является идеальный газ, что связано с тем, что во многих случаях реальную систему можно в хорошем приближении считать идеальным газом. Состояние системы невзаимодействующих частиц можно задать с помощью чисел заполнения  $N_i$  — чисел, указывающих степень заполнения квантового состояния частицами системы, которая состоит из многих тождественных частиц.

### БОЗОНЫ — ЭТО ВАМ НЕ ФЕРМИОНЫ...

В системе частиц, образованных бозонами, — бозе-газ, числа заполнения могут принимать любые целые значения: 0, 1, 2... Сумма всех чисел заполнения должна быть равна общему числу частиц системы. Квантовая статистика позволяет подсчитать среднее число частиц в данном квантовом состоянии, то есть определить средние числа заполнения  $N_i$ .

Бозоны, в отличие от фермионов, не подчиняются принципу запрета Паули, а это значит, что произвольное количество частиц может одновременно находиться в одном состоянии. Из-за этого их поведение довольно сильно отличается от поведения

Конденсат Бозе — Эйнштейна — агрегатное состояние вещества, основу которого составляют бозоны, охлажденные до температур, близких к абсолютно нулю (меньше миллионной доли кельвина)

*«Все нужно упрощать до предела, но не более того»*

(Альберт  
Эйнштейн)

## ПЯТОЕ АГРЕГАТНОЕ

В 1924 году физик из Индии Шатъендранат Бозе попросил Эйнштейна о помощи в публикации его статьи, и в 1925 году она была представлена в немецком переводе. Позже Эйнштейн развил предположение Бозе по отношению к системам тождественных частиц с целым спином. Оба физика обосновали существование пятого агрегатного состояния вещества, которое было названо конденсатом Бозе — Эйнштейна

фермионов при низких температурах. В случае бозонов при понижении температуры все частицы будут собираться в одном состоянии, обладающем наименьшей энергией, формируя так называемый бозе-конденсат.

Напомним, что бозоны, например фотоны и атомы гелия-4, имеют нулевой или целочисленный спин. Бозоны так же, как и фермионы, абсолютно тождественны, но поскольку принципиально отличаются от фермионов, то и статистическая вероятность распределения их по энергетическим уровням будет подчиняться другому распределению.

Это распределение для фотонов в 1924 году предложил индийский физик Шатъендранат Бозе, а в 1924–1925 годах Альберт Эйнштейн обобщил его для систем атомов с целым спином. Это распределение и получило название статистика Бозе — Эйнштейна.

## А ПО СУТИ — ПРОСТО ГАЗ

Система частиц называется вырожденной, если ее свойства существенно образом отличаются от свойств систем, подчиняющихся классической статистике. Поведение бозе-газа, впрочем как и ферми-газа, отличается от классического газа, поэтому они являются вырожденными газами. Вырождение газов становится существенным при довольно низких температурах и больших плотностях.

При довольно высокой температуре статистическое описание бозонов переходит в классическое распределение Максвелла — Больцмана.

Статистику Бозе — Эйнштейна можно применить, например, к теории теплоемкости твердых тел. Тепловые колебания твердого

тела описываются как возбужденные совокупности частиц, соответствующие колебаниям кристаллической решетки. Возбужденные состояния системы частиц можно описать как идеальный газ квазичастиц, называемых фононами. На основании этого представления удастся правильно описать поведение твердых тел при низких температурах.

С помощью статистики Бозе — Эйнштейна можно также обосновать теорию излучения абсолютно черного тела, опираясь на представление о фотонах.

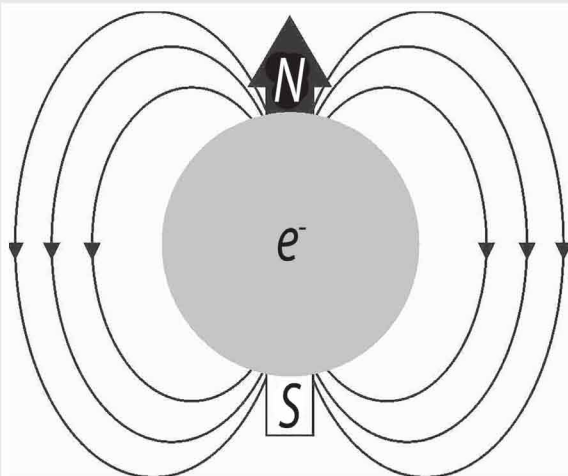


Шатьендранат Бозе (1894–1974) — индийский физик, специализировавшийся в математической физике. Один из создателей квантовой статистики, теории конденсата Бозе — Эйнштейна. В его честь назвали бозон

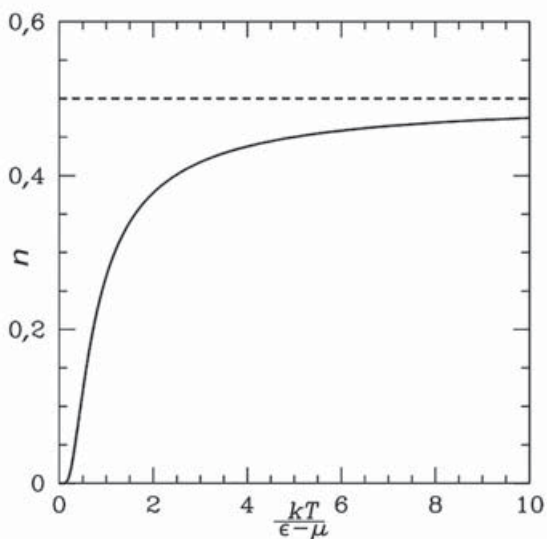




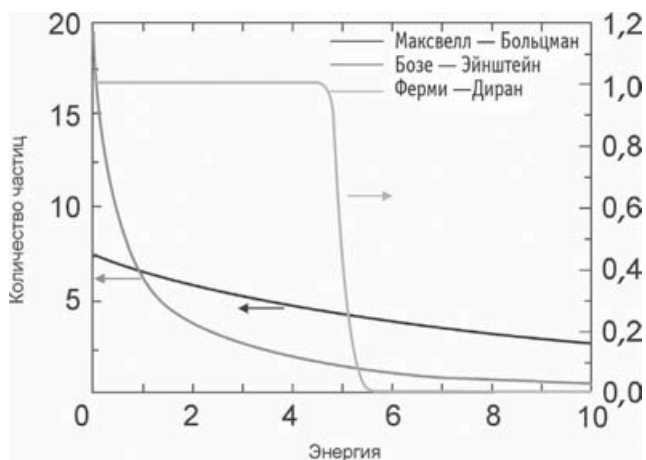
Для полного описания квантовомеханических явлений необходимо применять два взаимоисключающих («дополнительных») набора классических понятий, совокупность которых дает исчерпывающую информацию об этих явлениях как о целостных. Например, дополнительными в квантовой механике являются пространственно-временная и энергетически-импульсная картины



Теория спин электрона определяет электрон как квантовую частицу, а не как простую сферу, и утверждает, что направление спина электрона влияет на магнитные характеристики атома



Распределение Ферми — Дирака: высокоэнергетические состояния имеют меньшую вероятность, а низкоэнергетические более вероятны



Функции распределения различаются между системами бозонов (распределение Бозе — Эйнштейна), фермионов (распределение Ферми — Дирака) и классических частиц (распределение Больцмана)

# СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ

*Наука — поле, которое непрерывно растет с постоянно расширяющимися границами.*

Джон Бардин

Согласно классическим теориям, сопротивление проводника должно плавно падать с уменьшением температуры. Существовало также мнение, что при слишком низких температурах электроны практически остановятся и металл совсем перестанет проводить ток. На деле же получается совсем противоположный эффект.

Прежде чем на основе квантовой теории объяснить явление сверхпроводимости, рассмотрим некоторые свойства сверхпроводников.

Опытным путем доказано, что при переходе металла в сверхпроводящее состояние структура его кристаллической решетки не изменяется. Так же как и не изменяются его механические и оптические свойства. Вместе с тем при таком переходе скачкообразно меняются тепловые, электрические, а следовательно, и магнитные свойства.

Сверхпроводимость — свойство некоторых материалов обладать строго нулевым электрическим сопротивлением при достижении ими температуры ниже определенного значения (критическая температура)

## НА ПУТИ К ИСТИНЕ

В 1933 году немецкий физик Вальтер Мейснер показал, что в сверхпроводящем состоянии магнитное поле в толще сверхпроводника отсутствует. То есть при охлаждении сверхпроводника ниже критической температуры магнитное поле из проводника вытесняется. Это и есть так называемый эффект Мейснера.

Поскольку эффекты сверхпроводимости наблюдаются у разных металлов, то это обусловлено какими-то общими причинами, то есть должен существовать единый для всех сверхпроводников механизм этого явления.

Само явление было открыто в 1911 году голландским ученым Хейке Камерлинг-Оннесом. Физическая же природа сверхпроводимости была понята лишь в 1957 году. Именно тогда американские физики Джон Бардин, Леон Купер и Джон Шриффер создали теорию сверхпроводимости, а основой для нее послужила теория сверхтекучести гелия, предложенная Львом Ландау в 1941 году.

Оказалось, что, помимо внешнего сходства между сверхтекучестью, когда сверхтекучая жидкость протекает по узким капиллярам без трения, и сверхпроводимостью, когда ток в сверхпроводнике течет без сопротивления по проводу, существует физическая аналогия: и то и другое — это макроскопический квантовый эффект.

## АНСАМБЛЬ СВЯЗАННЫХ ПАР

Между электронами металла, помимо кулоновского отталкивания, возникает и слабое взаимное притяжение. Это притяжение при определенных условиях может преобладать над отталкиванием. Электроны, обеспечивающие проводимость, образуют своеобразное связанное состояние, получившее название куперовской пары в честь Леона Купера, впервые описавшего это состояние. Поскольку размеры такой пары примерно на четыре порядка больше среднего межатомного расстояния, между электронами, «связанными» в пару, находится много «обычных» электронов.

Для разрушения куперовской пары необходимо затратить некоторую энергию, идущую на преодоление сил притяжения электронов

Куперовская пара — связанное состояние двух взаимодействующих через фонon электронов. Обладает нулевым спином и зарядом, равным удвоенному заряду электрона. Впервые подобное состояние было описано Леоном Купером в 1956 году

*«На свете есть столь серьезные вещи, что говорить о них можно только шутя»*

(Нильс Бор)



Хейке Камерлинг-Оннес (1853—1926) — голландский физик и химик, лауреат Нобелевской премии по физике 1913 года

пары. Однако это не так просто сделать, поскольку пары сопротивляются своему разрушению, образуя целую группу взаимодействующих друг с другом куперовских пар.

Поскольку электроны, входящие в куперовскую пару, имеют противоположно направленные спины, то общий спин такой пары равен нулю, то есть она представляет собой не что иное, как бозон. Вспомним, что к бозонам принцип Паули не применим, а значит, число частиц, в нашем случае куперовских пар, находящихся в одном состоянии, не ограничено. При сверхнизких температурах бозоны скапливаются в основном состоянии, из которого их довольно трудно перевести в возбужденное. Система куперовских пар, как бозе-частиц, обладает устойчивостью относительно возможности отрыва электрона, а значит, может под действием внешнего электрического поля двигаться без сопротивления со стороны проводника, а это и приводит к сверхпроводимости.

Сверхпроводники нашли очень широкое применение. Поскольку они не пропускают магнитный поток, следовательно, могут экранировать электромагнитное излучение, что нашло применение в микроволновых устройствах. Сегодня проводятся работы по созданию поездов на магнитной подушке, где используется так называемая магнитная левитация. Ну и наконец, комбинация полупроводниковых и сверхпроводящих приборов открывает новые возможности в конструировании электронных вычислительных устройств.

# КВАНТОВАЯ ТЕОРИЯ ПОЛЯ

*Ныне внимателен будь, достоверному внемля ученью:  
Новый предмет до ушей твоих бурно стремится  
достигнуть,  
В новом обличии предстать пред тобой должно  
мирозданье.  
Лукреций. О природе вещей*

Многие задачи в рамках квантовой механики к середине XX века так и не удалось решить. И снова потребовался абсолютно новый подход для объяснения необъяснимого, нужна была теория, способная связать микро- и макромир. И она появилась — это квантовая теория поля.

Квантовая механика не может описать того, что при столкновении двух протонов на Большом адронном коллайдере рождается множество новых частиц. Для этого понадобился совершенно новый математический аппарат, новая теория, которая описывает системы с переменным и даже с бесконечным числом частиц. К середине прошлого века такая теория была разработана. В квантовой теории поля понятие точечной частицы заменило понятие квантового поля, которое разлито во всем пространстве и времени, и кванты этого поля и есть элементарные частицы.

## НОВАЯ ТЕОРИЯ КАК СИНТЕЗ ПОЛЕЙ

Понятие квантового поля возникло в физике как объединение представлений о физических полях типа электромагнитного и полей вероятностей, описываемых волновыми функциями в квантовой механике.

Понятие физического поля было введено, когда назрела необходимость отказаться от принципа мгновенного действия сил, присущего механике Ньютона. Предполагается, что пространство между двумя взаимодействующими частицами, например двумя

## НАД ЧЕМ РАБОТАЕМ?

Центральной проблемой квантовой теории поля является проблема создания единой теории, объединяющей все квантовые поля

Квантовая теория поля — раздел физики, изучающий поведение квантовых систем с бесконечно большим числом степеней свободы — квантовых полей. На квантовой теории поля базируется вся физика высоких энергий, физика элементарных частиц и физика конденсированного состояния

### **ТОЛЬКО ОДНА ОНА**

Квантовая теория поля в виде Стандартной модели сейчас является единственной экспериментально подтвержденной теорией, способной описать и предсказать поведение элементарных частиц при высоких энергиях

электрическими зарядами, заполнено полем, которое и служит переносчиком взаимодействия с одной из частиц на другую, причем перенос этот идет с определенной скоростью. Электромагнитное поле передает действие одной заряженной частицы на другую со скоростью света, являясь тем самым переносчиком электромагнитного взаимодействия между частицами.

В квантовых полях процесс передачи взаимодействия происходит порциями — квантами. В качестве квантов выступают элементарные частицы, имеющие строго фиксированные характеристики массы, спина, заряда. Таким образом, с одной стороны, сами взаимодействующие частицы имеют квантованные характеристики, а с другой — взаимодействие между ними передается квантовым полем со своими квантованными характеристиками.

### **ВСЕ ЕЩЕ ВПЕРЕДИ**

Основу квантовой теории поля составляют принципы квантовой механики, принцип относительности и принцип причинности. Ученые считают, что все разнообразие природных явлений можно описать, используя только указанные выше принципы. И хотя многие последствия квантовой теории поля хорошо согласовываются с экспериментом, однако природа элементарных частиц и структура вакуума еще не до конца ясны и расхождение теории с экспериментом иногда становится довольно значительным. Все это говорит о том, что квантовая теория поля еще не является полностью завершенной наукой, а продолжает

интенсивно развиваться и ждет своих новых исследователей.

Развиваясь от квантовой электродинамики до стандартной модели элементарных частиц, квантовая теория поля стала одним из важнейших инструментов познания мира, соединяющим физические модели с высшими областями математики. Сегодня она применяется не только в физике микромира, но и во многих областях теоретической физики: теории твердого тела, физике полимеров, теории турбулентности, теории критических явлений, статистической физике и других областях физики.

Квантовая теория поля является уникальной отраслью науки, она охватывает как физику микромира, устанавливая предполагаемую структуру элементарных составляющих вещества, таких как электроны, протоны, нейтроны и так далее, так и физику макромира, изучая рождение, эволюцию и структуру в целом всей Вселенной.

Стандартная модель — теоретическая конструкция в физике элементарных частиц, описывающая электромагнитное, слабое и сильное взаимодействие всех элементарных частиц. Стандартная модель не является «Теорией Всего», так как не описывает темную материю, темную энергию и не включает в себя гравитацию



# РЕЛЯТИВИСТСКАЯ КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА. УРАВНЕНИЕ ДИРАКА

*На нем стоит большая часть физики и вся химия.*  
Поль Дирак о своем уравнении

Вся классическая физика зиждется на том убеждении, что, зная закон движения частицы и факт появления ее в точке А, мы абсолютно точно можем предсказать, когда она попадет в точку В. Квантовая механика утверждает, что, зная закон движения микрочастицы и факт появления ее в точке А, мы можем определить всего лишь вероятность ее появления в точке В.

Вначале объясним слово «релятивистский». В физике под этим термином понимают все связанное с теорией относительности применительно к физическим эффектам, явлениям, наблюдаемым при скоростях тел или частиц, сравнимых со скоростью света. Так, к примеру, релятивистская частица — это частица, движущаяся с релятивистской скоростью, то есть близкой к скорости света.

Релятивистский — термин, употребляемый в физике для явлений, обусловленных движением со скоростями, близкими к скорости света, либо сильными полями тяготения. Такие явления описываются теорией относительности

## А ВСЕ НАЧАЛОСЬ С ИГРЫ

В 1928 году английский физик Поль Дирак вывел уравнение движения для классического поля электрона, являющегося релятивистской частицей. Позднее оно было применено и для описания других фермионов. Однако по порядку.

Сам Дирак вспоминал, что начал работать над своей релятивистской теорией, «играясь с уравнениями, а не пытаясь ввести какую-нибудь определенную физическую идею». В чем же состояла эта игра Дирака?

Он хотел найти такое уравнение, которое, во-первых, было бы релятивистским, то есть удовлетворяло принципам теории относительности, во-вторых, подчинялось

бы требованиям теории преобразований и, в-третьих, было бы квантово-механическим уравнением, описывающим движение электрона.

Но что значит «релятивистское уравнение»? Одним из характерных признаков такого уравнения является то, что в него должны входить как пространственные координаты  $x, y, z$ , так и временная координата  $t$ . Это уравнение должно быть квантово-механическим, то есть содержать волновую функцию электрона.

Дирак хотел просто привести в соответствие релятивистские принципы и требования теории преобразований. Оказалось, что существование спина как бы само собой возникает при объединении квантовой механики и теории относительности. Получилось, что квантовое уравнение, записанное с учетом требований теории относительности, описывает поведение частиц со спином.

Дираковская теория электрона наделяет электрон релятивистскими свойствами, а именно спином, то есть собственным механическим моментом количества движения и собственным магнитным моментом.

## ТЕОРИЯ, ПОРОЖДАЮЩАЯ ЗАГАДКИ

Уравнение Дирака дало возможность получить более точную формулу для уровней энергии атома водорода. Но особенностью его уравнения было наличие среди его решений таких, которые соответствуют состояниям с отрицательными значениями энергии для свободного движения частицы, а это уже соответствует отрицательной массе частицы. Это означало, что все механические законы

*«...Квантовую электродинамику можно уложить в рамки разумной математической теории, но лишь ценой нарушения релятивистской инвариантности. Мне, однако, это кажется меньшим злом, чем отступление от стандартных правил математики и пренебрежение бесконечными величинами»*

(Поль Дирак)

## НЕСЛОЖНАЯ ФОРМУЛА

Интересно отметить, что Поль Дирак нашел способ выразить любое натуральное число всего через три двойки и математические операции:

$$N = -\log(-\log_2(\sqrt{\dots\sqrt{2}})),$$

где число знаков корня равно числу  $N$

## НАБЛЮДАТЕЛЬ- НЫЙ УЧЕНЫЙ

Любопытны воспоминания дочери Тамма Ирины о Дираке: «Два года подряд у нас останавливался приезжавший в Москву П. А. М. Дирак, с которым папа познакомился и подружился в 28-м году у Эренфеста в Лейдене. Помню, как в свой второй приезд вечером входит сияющий Дирак и, подняв палец, торжественно заявляет: „Тамм, у вас грандиозные перемены“. В ответ на всеобщее недоумение он пояснил: „Теперь в туалете горит лампочка“»

для частицы в таких состояниях были бы неверными, переходы же в квантовой теории в эти состояния возможны. Действительный физический смысл переходов на уровни с отрицательной энергией выяснился, когда была доказана возможность взаимопревращения частиц. Из уравнения Дирака следовало, что должна существовать новая частица — античастица по отношению к электрону, с массой электрона и зарядом противоположного знака. Такая частица была открыта в 1932 году американским физиком-экспериментатором Карлом Андерсоном и получила название «позитрон». Переход электрона из состояния с отрицательной энергией в состояние с положительной энергией и обратный переход рассматриваются как процесс образования пары электрон — позитрон и аннигиляция, то есть взаимное уничтожение такой пары.

Однако, несмотря на эти успехи, теория Дирака имеет и недостаток. Она не описывает взаимодействие квантованного электронного поля с квантованным электромагнитным полем, в том числе и рождение или уничтожение частиц. Эта трудность была разрешена в квантовой теории поля. В случае с электронами следует добавить квантованное электромагнитное поле, квантование самого электронного поля и взаимодействие этих полей, а полученная теория уже называется квантовой электродинамикой.

# КВАНТОВАЯ ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

*По мере расширения знаний у ученых в известной степени уменьшаются притязания на полное «познание» мира.*  
Вернер Гейзенберг

Как рождаются частицы? Куда они исчезают? Дать ответ на этот вопрос классическая электродинамика не могла. И снова на помощь пришли наши теперь уже и не такие загадочные кванты.

Квантовая электродинамика — это по сути наиболее разработанная часть квантовой теории поля, можно сказать, это самая первая квантовая подтеория поля — теория чисто электромагнитных взаимодействий. В квантовой электродинамике могут рождаться и взаимодействовать только три типа частиц: электроны, их антиподы-античастицы — позитроны и фотоны — кирпичики электромагнитного излучения.

## ЗАГАДОЧНОЕ ЧИСЛО ТРИ

У истоков создания квантовой электродинамики стоял целый ряд физиков-теоретиков: Вернер Гейзенберг, Вольфганг Паули, Поль Дирак, Ричард Фейнман и другие. В основе этой теории, как и любой иной квантовой теории поля, лежит представление о заполняющем пространство поле, в котором возможны элементарные возбуждения — кванты. Квант электромагнитного поля — это фотон, кванты электрон-позитронного поля — соответственно, электроны и позитроны. Хотя справедливо сказать, что обычно термин «квант» применяют только к фотонам.

Квантовая электродинамика — релятивистская теория, что это такое — мы рассматривали выше. А значит, ее уравнения

— Пап, дай 500 рублей. Хочу поменьше их на четыре.  
— Это по какому такому курсу?  
— По «Квантовой электродинамике»  
(Анекдот)

На экзамене по атомной физике студентка вытащила билет с вопросами по теории ядра. Сев за стол, она нарисовала большую окружность — ядро, в нем четыре кружка поменьше — протоны и нейтроны. Потом, видимо, задумавшись, стала по инерции рисовать в них совсем маленькие кружочки — два, три, пять... Проходивший мимо преподаватель мельком заглянул ей через плечо и с укоризной заметил: «Зачем же вы, милочка, столько кварков-то в нуклон напихали. Нехорошо это...»  
(Анекдот)

подчиняются принципам теории относительности, то есть они одинаково выглядят как в покоящейся, так и в равномерно движущейся системах координат. Еще одно свойство квантовой электродинамики — это локальность, которое обозначает, что элементарное взаимодействие — испускание или поглощение фотона электроном либо позитроном — происходит мгновенно и в бесконечно малой области пространства. Причем локальное взаимодействие происходит не в пустоте, а в физическом вакууме.

Классическая электродинамика учитывает только непрерывные свойства электромагнитного поля, в основе же квантовой электродинамики лежит представление о том, что электромагнитное поле обладает также и дискретными свойствами, носителями этих свойств являются кванты поля — фотоны. Взаимодействие электромагнитного излучения с заряженными частицами в квантовой электродинамике рассматривается как поглощение и испускание частицами фотонов.

## ХОРОШО, НО НЕДОСТАТОЧНО

Любому событию квантовой электродинамики, например, перемещению электрона из одной точки пространства-времени в другую или испусканию либо поглощению фотона электроном, соответствует некое комплексное число, описывающее амплитуду вероятности события. Вероятность события равна квадрату модуля амплитуды вероятности события.

Квантовая электродинамика количественно объясняет эффекты взаимодействия излучения с веществом, такие как испускание,

поглощение и рассеяние, и описывает электромагнитные взаимодействия между заряженными частицами.

Квантовая электродинамика объясняет тепловое излучение тел, рассеяние рентгеновских лучей на свободных электронах, излучение и поглощение фотонов атомами и другие процессы взаимодействия электронов, позитронов и фотонов. При рассмотрении процессов с участием других частиц успех теории намного ниже, это объясняется тем, что в этих процессах, кроме электромагнитных взаимодействий, играют важную роль и другие виды взаимодействий — сильное, слабое.

В современной физике элементарных частиц квантовая электродинамика объединяется с теорией слабых взаимодействий в единую теорию электрослабых сил. Кроме фотонов, электронов и позитронов эта теория рассматривает другие частицы, некоторые из них только лишь предсказаны теорией, но пока не обнаружены на опыте.

*«Опыты, определяющие какую-нибудь физическую величину, делают в то же время недействительным ранее добытое знание других величин, так как они влияют неконтролируемым образом на измеряемую систему и тем самым изменяют ранее известные величины»*

(Вернер  
Гейзенберг)

## СЛАБЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ. ЭНРИКО ФЕРМИ

*Современные ученые мыслят глубоко, вместо того чтобы мыслить ясно. Чтобы мыслить ясно, нужно обладать здравым рассудком, а мыслить глубоко можно и будучи совершенно сумасшедшим.*

Никола Тесла

В природе существует четыре вида фундаментальных взаимодействий: гравитационное, электромагнитное, хорошо знакомые из курса физики, а также сильное, характерное для ядерных процессов, и слабое, о котором и пойдет речь ниже.

К осознанию самого факта существования слабого взаимодействия физики продвигались довольно медленно. Слабое взаимодействие несет ответственность за распады частиц; поэтому с его проявлением столкнулись только с открытием радиоактивности и исследованием бета-распада.

$\beta$ -распад — это радиоактивный распад атомного ядра, сопровождающийся вылетом из ядра электрона или позитрона

### ИСТИНА ГДЕ-ТО ТАМ

В 1896 году французский ученый Антуан Анри Беккерель обнаружил радиоактивность урана. И это был первый экспериментальный сигнал о неизвестных до того силах природы — слабом взаимодействии. Сегодня мы знаем, что слабое взаимодействие обуславливает многие привычные для нас явления, например, оно принимает участие в некоторых термоядерных реакциях, поддерживающих излучение Солнца и других звезд.

У бета-распада обнаружилась интересная и странная особенность. Результаты исследований приводили к выводу, что в этом распаде нарушается закон сохранения

энергии. Словно бы часть энергии куда-то исчезала. Для разрешения этого противоречия Вольфганг Паули предположил, что при бета-распаде вместе с электроном вылетает еще одна частица, она-то и уносит с собой недостающую энергию. Эта частица электро-нейтральна и вместе с тем обладает очень высокой проникающей способностью, поэтому ее и не удавалось наблюдать. Итальянский физик Энрико Ферми предложил назвать эту частицу-невидимку нейтрино.

Но предсказание нейтрино — это только постановка проблемы. Следовало еще понять его природу. Все дело в том, что электроны и нейтрино испускались нестабильными ядрами. Но было абсолютно точно доказано, что внутри ядер таких частиц нет. Откуда же они взялись? Как возникали? Ученые предположили, что электроны и нейтрино, так сказать, в готовом виде в ядре не существуют, а образуются из энергии радиоактивного ядра. Напрашивался вывод, что известные на тот момент силы не могут вызвать такой распад. Следовательно, он порождался какой-то иной, неизвестной силой. А силе всегда соответствует некоторое взаимодействие.

## РАЗРУШАЮЩЕЕ СОЗИДАНИЕ

На самом деле название «слабое» досталось этому взаимодействию по недоразумению, оно гораздо сильнее гравитационного. Но взаимодействие это скорее разрушительное, это единственная сила природы, которая не скрепляет вещество, а только разрушает его.

С дугой стороны, слабое взаимодействие значительно меньше электромагнитного

## ПРОВЕРКА

Во время церемонии вручения премии, состоявшейся в декабре 1938 года в Стокгольме, Ферми обменялся рукопожатием с королем Швеции, вместо того чтобы приветствовать того фашистским салютом, за что подвергся нападкам в итальянской печати. Сразу же после торжеств Ферми отправился за океан. По прибытии в Соединенные Штаты Ферми, как и всем эмигрантам того времени, пришлось пройти тест на проверку умственных способностей. Нобелевского лауреата попросили сложить 15 и 27 и разделить 29 на 2



## АТОМ НА СЛУЖБЕ У ЧЕЛОВЕКА

2 декабря 1942 года под трибунами стадиона университета Чикаго был запущен первый в мире ядерный реактор, построенный под руководством итальянского физика Энрико Ферми.

Сейчас на этом месте находится мемориальная доска: «Здесь 2 декабря 1942 года человек впервые осуществил самоподдерживающуюся цепную реакцию и этим положил начало овладению освобожденной атомной энергией»

и сильного взаимодействий. Поэтому оно долго оставалось как бы в тени. Кроме того, слабое взаимодействие распространяется на очень маленьких расстояниях — до  $10^{-16}$  см от источника и потому оно никак не может влиять на макроскопические объекты, а ограничивается микромиром, субатомными частицами. Лавинообразное открытие множества нестабильных субъядерных частиц дало повод утверждать, что большинство из них участвуют в слабом взаимодействии.

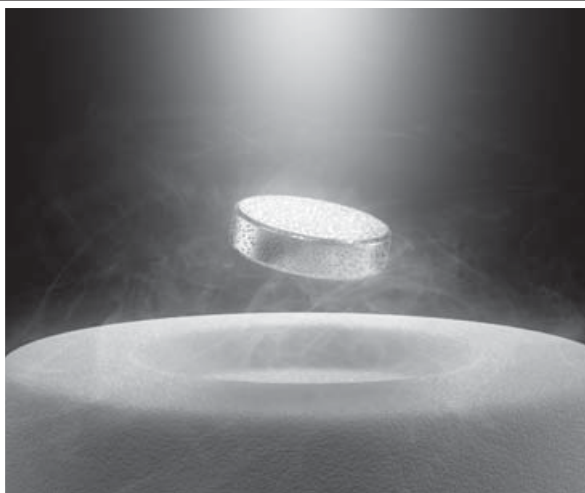
Основные свойства слабого взаимодействия стали известны еще в 1930-х годах благодаря работам Ферми. Повторимся, в отличие от гравитационных и электрических, слабые силы имеют очень малый радиус действия. Казалось, что радиуса действия вообще нет и взаимодействие происходит мгновенно и в одной точке пространства. Это взаимодействие можно назвать виртуальным, оно на короткое время превращает каждый протон ядра в нейтрон, позитрон — в позитрон и нейтрино, а каждый нейтрон — в протон, электрон и антинейтрино. В стабильных ядрах эти превращения так и остаются виртуальными, подобно виртуальным рождениям электрон-позитронных пар или протон-антипротонных пар в вакууме.

Впоследствии выяснилось, что слабое взаимодействие не локально, то есть оно происходит не мгновенно и не в одной точке. По современной теории, слабое взаимодействие передается не мгновенно, а виртуальная пара «электрон — антинейтрино» рождается через очень малый промежуток времени и на очень малых расстояниях. Естественно, ни один прибор не в состоянии измерить такое малое расстояние, так же как ни один

секундомер не может измерить такой малый интервал времени. И как это почти всегда бывает в современной физике, мы должны довольствоваться косвенными данными. Физики строят различные гипотезы о механизме процесса и проверяют всевозможные следствия этих гипотез. Гипотезы, которые противоречат хотя бы одному достоверному опыту, отменяются, а для проверки оставшихся ставятся новые эксперименты. В случае слабого взаимодействия этот процесс продолжается уже около 50 лет и еще далек от завершения.

Теория слабого взаимодействия была создана в конце 1960-х годов и с момента построения Максвеллом теории электромагнитного поля является самым крупным шагом на пути к единству физики.

Нейтрино (итал. *neutrino* — «нейтрончик», уменьшительное от *neutrone* — нейтрон) — нейтральная фундаментальная частица с полуцелым спином, участвующая только в слабом и гравитационном взаимодействиях и относящаяся к классу лептонов



Магнит, расположенный над высокотемпературным сверхпроводником, охлаждаемым жидким азотом. Электрический ток течет по поверхности сверхпроводника, компенсирует магнитное поле магнита. Этот ток образует магнитное поле, которое отталкивает магнит

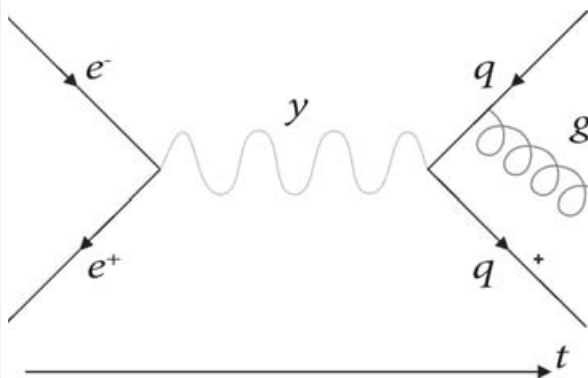
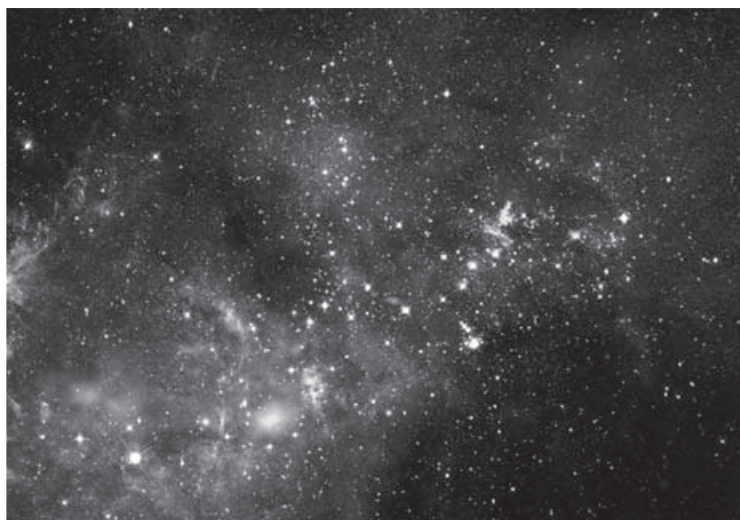


Диаграмма Фейнмана: электрон и позитрон аннигилируют, производя фотон (синусоида на схеме), который становится «кварк — антикварк» парой, после чего антикварк излучает глюон (спираль на схеме)



Краткий обзор различных семейств элементарных и составных частиц



Именно слабым взаимодействием обусловлено протекание термоядерной реакции, являющейся основным источником энергии большинства звезд, включая Солнце

## СОЗДАНИЕ УСКОРИТЕЛЕЙ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

— Ты волшебник?!

— Нет, я физик... Но для тебя это одно и то же.

Современный анекдот

Микромир загадочен и недоступен нашим органам чувств. Единственный способ, который можно применить для его исследования, — это взаимодействие. Но для преодоления ядерных сил, удерживающих частицы в ядре, частицу-снаряд нужно разогнать до невероятных скоростей, или, как говорят физики, сообщить частице необходимую энергию. Для этого существуют ускорители элементарных частиц.

*«Самое непостижимое  
в этом мире — то,  
что он постижим»*  
(Альберт Эйнштейн)

### БЫСТРЕЕ, БЫСТРЕЕ, БЫСТРЕЕ...

Для того чтобы познать микромир и расширить наши познания о материи в целом, современные физики-экспериментаторы, как и столетия назад, проводят опыты. Но микромир можно исследовать только с помощью «частиц-разведчиков», разогнанных до сверхвысоких энергий, ибо энергия частиц, испускаемых при естественном распаде радиоактивных веществ, относительно невелика. Для получения нужной энергии требуются мощные электрические и магнитные поля, для чего и сооружают огромные по размерам и сложности машины — ускорители.

Попробуем разобраться в сути устройства ускорителя.

Попав между электродами с разными зарядами, заряженная частица ускоряет движение под действием электрических сил, это известно из школьного курса физики.

Именно это явление и породило идею создания в 1930-е годы линейного ускорителя.

Линейный ускоритель представляет собой длинную трубу, в которой поддерживается вакуум. Заряженные частицы движутся по прямой, последовательно проходя сквозь цепочку электродов. От специального генератора на электроды подают переменное электрическое напряжение так, что когда первый электрод оказывается заряженным, допустим, положительно, второй электрод будет заряжен отрицательно и так далее.

Попадая в ускоритель из электронной «пушки», пучок электронов под действием потенциала первого, положительного, электрода начинает ускоряться, пролетая сквозь него. В этот же момент напряжение меняется, и электрод, только что заряженный положительно, становится отрицательным. Теперь он уже отталкивает от себя электроны. А второй электрод, став за это время положительным, притягивает электроны к себе, еще более ускоряя их. Таким образом, частица ускоряется всякий раз, когда оказывается в промежутке между соседними электродами.

Линейные ускорители позволяют увеличить энергию электронов до 1 – 10 гигаэлектронвольт (ГэВ). Поскольку линейный ускоритель имеет ограниченную длину, то разогнать частицы можно лишь до определенных энергий, а значит, необходимо было разрабатывать другие типы ускорителей.

Чем глубже физики проникали в структуру ядра, тем большей энергии требовались частицы. Возникла необходимость строить еще более мощные ускорители — синхротроны и синхрофазотроны, в которых частицы движутся по замкнутой окружности в кольцевой

## КИРПИЧ ВСЕЛЕННОЙ

«Поле Хиггса, как густой сироп, — объясняет доктор Алан Барр. — Оно улавливает частицы, которые перемещаются вокруг, и превращает их в материю». Частица, существование которой предположил британский физик Питер Хиггс, имеет много почетных прозвищ: «Частица Бога», «Ангел Творения» и «Кирпич, который построил Вселенную»

## ФИЗИКИ ШУТЯТ

- «Давным-давно ученые изобрели большой адронный коллайдер, так зародилась наша Вселенная»
- «У физиков есть традиция — раз в 50 миллиардов лет они собираются и строят адронный коллайдер»
- «Черные дыры — это места, где внеземные разумы изобрели коллайдеры раньше нас»

*«Истина всегда оказывается проще, чем можно было предположить»*  
(Ричард Фейнман)

камере. Траекторию частицы поддерживает большое число магнитных секций, расположенных друг за другом вдоль кольца.

Максимальная энергия протонов в современных синхрофазотронах — 500 ГэВ.

## В ПОИСКАХ ЧАСТИЦЫ БОГА

В науке и технике в настоящее время нашли широкое применение ускорители заряженных частиц — установки для получения пучков заряженных частиц высоких энергий — от десятков килоэлектронвольт (кэВ) до нескольких тераэлектронвольт (ТэВ).

Крайним шагом на сегодня стало создание коллайдеров — ускорителей со встречными пучками, где два пучка частиц раскручиваются в противоположных направлениях и сталкиваются друг с другом. Идею высказал и даже запатентовал в 1943 году норвежский физик Рольф Видероз, однако реализована она была лишь в начале 1960-х годов.

И вот в 2008 году в строй вступает самый мощный ускоритель, когда-либо построенный человеком, — Большой адронный коллайдер, ЛНС, с энергией протонов 7 ТэВ. Он расположен в подземном кольцевом туннеле длиной 27 км на границе Швейцарии и Франции. Физики надеялись, и, надо сказать, не зря, что результаты ЛНС приведут к новому прорыву в понимании глубинного устройства нашего мира.

Четвертого июля 2012 года физики Европейской организации ядерных исследований (ЦЕРН) официально объявили об открытии новой частицы, похожей на бозон Хиггса, и только 14 марта 2013 года исследователи подтвердили, что найденная полугодом

ранее частица действительно является бозоном Хиггса.

Бозон Хиггса — это элементарная частица, играющая ключевую роль в понимании механизмов образования и развития нашей Вселенной после так называемого Большого взрыва. Сама частица имеет много почетных прозвищ: «Частица Бога», «Ангел Творения», «Кирпич, который построил Вселенную». Можно сказать, бозон Хиггса улавливает частицы, которые перемещаются вокруг, и превращает их в материю.

То есть, если говорить очень упрощенно, бозоны Хиггса придают массу всем, а может, и не всем, но многим другим элементарным частицам, что делает возможным существование атомов, из которых состоит Вселенная.

Основные применения ускорителей относятся к разным отраслям науки и техники. Перечислим лишь некоторые. В медицине это лечение онкологических заболеваний и радиодиагностика. В инженерии — производство полупроводниковых устройств, радиационная дефектоскопия, радиационное сшивание полимеров, радиационная очистка топочных газов и сточных вод. Но все же по-прежнему к числу основных областей применения ускорителей относятся ядерная физика и физика высоких энергий. Современные ускорители заряженных частиц — это главные источники информации для физиков, изучающих вещество, энергию, пространство и время. Ведь большинство элементарных частиц, известных сегодня, не встречаются в естественных условиях на Земле и получены только на ускорителях. Эти потребности физики элементарных частиц и являются главным стимулом для развития ускорительной техники.

## И ЕЩЕ НЕМНОГО ЮМОРА...

Вот адронный  
    коллайдер,  
Который  
    построил CERN.  
А это частица,  
Которая в темной  
    трубе хранится,  
В адронном  
    коллайдере,  
Который  
    построил CERN.  
А это веселое  
    поле Хиггса,  
Которое часто  
    волнует частицу,  
Которая в темной  
    трубе хранится,  
В адронном  
    коллайдере,  
Который  
    построил CERN.  
Вот фотон,  
Который веселого  
    поля Хиггса  
        не боится,  
Которое часто  
    волнует частицу,  
Которая в темной  
    трубе хранится,  
В адронном  
    коллайдере,  
Который  
    построил CERN...





внутренней характеристикой, называемой «цвет». Кварки взаимодействуют между собой подобно тому, как взаимодействуют между собой электрические заряды, однако, в отличие от электрических зарядов, у которых два знака, у кварков три квантовых числа, получивших название «цвет». Их называют «красным», «зеленым» и «синим», хотя эти названия не имеют никакого отношения к цветам, которые мы видим в повседневной жизни. Для каждого цвета существует также антицвет: «антикрасный», «антизеленый» и «антисиний».

Существует модель, согласно которой протоны и нейтроны всех ядер химических элементов состоят из трех кварков двух типов: *uud* и *udd*. Почему именно из трех и именно в таком порядке — не поясняется. Просто так вписывается в существующие теории, и все тут.

Кварки — это элементарные частицы, которые имеют электрический заряд, кратный трети заряда электрона, и которые не могут существовать в свободном состоянии. Их взаимодействие устроено так, что они могут жить только в составе чего-либо. Например, комбинация из трех кварков определенного типа образует протон. Другая комбинация дает нейтрон. На сегодня известно всего шесть кварков, или, как говорят ученые, «ароматов» кварков. Естественно, это понятие весьма условно. Гипотеза о том, что протоны и нейтроны построены из специфических субъединиц, была впервые выдвинута американским ученым Мари Гелл-Манном и независимо от него его соотечественником Джорджем Цвейгом в 1964 году.

## НЕСВОБОДНЫЕ КВАРКИ

Да, кварки существуют, можно даже сказать, составляют нашу основу. Как известно, мы все состоим из атомов. Атом состоит из ядра и бегающих вокруг него электронов. Ядро состоит из положительно заряженных протонов и незаряженных нейтронов. А протоны и нейтроны состоят из кварков — по три штуки в каждом. Только вот разделить их на кварки нельзя — в свободном виде кварки не существуют

## ПОЧЕМУ «КВАРК»?

Гелл-Манн назвал новые частицы кварками. В своих научных трудах он предлагает ввести в физику элементарных частиц первые три кварка, получившие названия верхний ( $u$  — от англ. up), нижний ( $d$  — down) и странный ( $s$  — strange), обладающие дробным электрическим зарядом  $+2/3$ ,  $-1/3$  и  $-1/3$  соответственно, а для антикварков принять, что их заряды противоположны по знаку

Само слово «кварк» было заимствовано Гелл-Манном из романа Дж. Джойса «Поминки по Финнегану», где в одном из эпизодов чайки кричат: «Three quarks for Muster Mark!», что обычно переводится как «Три кварка для мистера Марка» и предположительно является звукоподражанием крику морских птиц.

Может возникнуть вопрос: как можно протон называть элементарной частицей, если он состоит из кварков? Очень просто: протон элементарен, так как его невозможно расщепить на составные части — кварки. Все частицы, которые участвуют в сильном взаимодействии, состоят из кварков и при этом являются элементарными.

Понимание взаимодействий элементарных частиц очень важно для понимания устройства Вселенной. Все что, происходит с макротелами, есть результат взаимодействия частиц. Именно взаимодействием частиц описываются рост деревьев на земле, реакции в недрах звезд, излучение нейтронных звезд и многое другое.

В отношении кварков остаются вопросы, на которые пока нет ответа: почему ровно три цвета, случайно ли совпадение этого числа с размерностью пространства в нашем мире, из чего состоят кварки, как они складываются в частицы и многие другие вопросы, которые ждут своих первооткрывателей.

## ТО, ЧЕГО, ВОЗМОЖНО, И НЕТ, ИЛИ КЛЕЙ ДЛЯ АДРОНОВ

Как же образуются кварки и какая сила удерживает в ядре одноименно заряженные частицы — протоны, ведь, по идее, они обязаны отталкиваться?

Элементарные частицы, являющиеся причиной взаимодействия кварков, а также косвенно ответственные за соединение протонов и нейтронов в атомное ядро, в физике получили название глюонов, от английского *glue* — клей.

Глюоны — частицы с единичным спином и нулевой массой, переносят сильное цветное взаимодействие между кварками. При испускании или поглощении глюона кварки изменяют свой цвет. При этом остальные квантовые числа кварка и его аромат не изменяются. Глюоны обладают цветом, являются переносчиками сильного взаимодействия между кварками и «склеивают» их в адроны.

Поскольку глюон обладает способностью создавать другие глюоны при движении и не имеет массы, то это противоречит закону сохранения энергии. На самом деле некоторые ученые считают, что никаких глюонов в природе нет. Они потребовались квантовой теории только для того, чтобы объяснить ядерные силы — фундаментальные силы сильного взаимодействия.

Еще раз акцентируем внимание на том, что в природе существует огромное количество элементарных частиц. Это наводит на мысль, что мы еще очень далеки от осознания истинной картины микромира и впереди нас ждет еще масса открытий, способных, возможно, перевернуть наше представление о природе вещей.

Глюоны — это гипотетические электрически нейтральные частицы с нулевой массой и спином 1, осуществляющие взаимодействие между кварками. Подобно кваркам, глюоны обладают квантовой характеристикой «цвет»

# ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ И ТЕРМОЯДЕРНЫЙ СИНТЕЗ

*На свете есть столь серьезные вещи,  
что говорить о них можно только шутя.*

Нильс Бор

То, о чем алхимики только мечтали, в природе происходит постоянно. Атомы одних элементов превращаются в другие, более тяжелые и более легкие. В физике это описывается ядерными и термоядерными реакциями.

Мы уже разобрались со строением атома, его ядра и даже со структурой составляющих ядро элементарных частиц. Как же образуются элементы в природе? И могут ли они переходить один в другой?

Нестабильные ядра химических элементов могут распадаться на более легкие с испусканием разных частиц и электромагнитного излучения. При этом они, как правило, вначале захватывают какую-то частицу, а потом распадаются. В свою очередь более легкие ядра могут забирать себе протоны и нейтроны и при этом становиться совершенно другими элементами. Деление ядер называется ядерной реакцией, объединение же ядер получило название «термоядерный синтез».

*«Исследователя всегда охватывает чувство удивительного счастья, когда он идет по следу нового элементарного кирпичика, из которого состоит наша планета»*

(Кlaus Гоман)

## МЕЧТА АЛХИМИКОВ

С явлением естественной радиоактивности, самопроизвольного превращения неустойчивых ядер атомов в ядра других атомов с испусканием частиц и излучением энергии еще в 1896 году нас познакомил французский физик Анри Беккерель.

Ученый выяснил, что почти 90% известных ядер нестабильны. Они могут испускать частицы трех видов: положительно заряженные  $\alpha$ -частицы, по сути представляющие собой ядра гелия, отрицательно заряженные  $\beta$ -частицы — электроны

и нейтральные  $\gamma$ -частицы — кванты коротковолнового электромагнитного излучения.

Масса любого ядра всегда меньше суммы масс входящих в его состав протонов и нейтронов — эту разность называют дефектом массы. Дефект масс — это по сути энергия связи элементов в ядре. Опираясь на знаменитую формулу Эйнштейна  $E = mc^2$ , где  $m$  — масса частицы, а  $c$  — это скорость света в вакууме, можно сделать вывод, что при ядерной реакции выделяется колоссальная энергия!

В отличие от естественной радиоактивности, впервые искусственную ядерную реакцию осуществил Резерфорд в 1919 году, бомбардируя  $\alpha$ -частицами ядра атомов азота. Она была зафиксирована по появлению вторичных ионизирующих частиц, идентифицированных как протоны. Это можно считать началом эры управления атомом. Прошло по историческим меркам не так много времени, и атом стал как грозной разрушающей силой, показав свою мощь при взрывах в Хиросиме и Нагасаки, так и надеждой на освоение космических пространств и энергетическую стабильность Земли.

## САМ СЕБЕ АЛХИМИК

Мы говорили до сих пор о делении ядер. Но ведь ядра легких элементов могут и соединяться.

Для того чтобы ядерная реакция произошла, исходные атомные ядра должны преодолеть силу электростатического отталкивания между ними или так называемый кулоновский барьер. Для этого они должны иметь большую кинетическую энергию. Поскольку кинетическую энергию движущихся

Ядерной реакцией называется процесс изменения состава и структуры атомного ядра в результате его взаимодействия с другим ядром или частицей либо в результате каких-либо внутренних процессов

### РАБОТА ДЛЯ ТЯЖЕЛЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

На основе деления тяжелых элементов, таких как уран и плутоний, работают атомные электростанции

Слияние легких ядер при очень высокой температуре, сопровождающееся выделением энергии, называется термоядерной реакцией, или реакцией термоядерного синтеза

## **ЗВЕЗДНАЯ ЭНЕРГИЯ**

Термоядерные реакции являются основным источником энергии звезд

## **ЦЕПНЫЕ РЕАКЦИИ**

Деление тяжелых ядер может происходить посредством цепной реакции, когда при распаде ядра выделяются частицы — нейтроны, способные вызвать реакцию деления других ядер. Цепные реакции возможны, если масса ядерного топлива превышает минимальную критическую массу

микрочастиц вещества можно представить в виде температуры, следовательно, нагревая вещество, можно достичь ядерной реакции.

Внутри ядра действуют силы притяжения, которые, как мы уже говорили, и обуславливают стабильность ядра. Ими же обусловлено и энерговыделение при ядерном синтезе.

Впервые задачу по управляемому термоядерному синтезу сформулировал и предложил конструктивное решение советский физик Олег Лаврентьев. Кроме него, важный вклад в решение проблемы внесли такие выдающиеся физики, как Андрей Сахаров и Игорь Тамм, а также Лев Арцимович, возглавлявший советскую программу по управляемому термоядерному синтезу с 1951 года.

Термоядерная реакция — это практически неисчерпаемый источник энергии. Например, количество угля, необходимого для обеспечения работы тепловой электростанции мощностью 1 ГВт, составляет 10 000 тонн в день. Это десять железнодорожных вагонов, а термоядерная установка такой же мощности будет потреблять в день лишь около 1 килограмма смеси дейтерия и трития, получаемых из воды. Озеро среднего размера в состоянии обеспечить любую страну энергией на сотни лет. К преимуществам такого источника энергии следует отнести следующее: отсутствие продуктов сгорания, отсутствие необходимости применять материалы, которые могут быть использованы для производства ядерного оружия, вырабатывается незначительное количество радиоактивных отходов с коротким периодом полураспада, ну и реакция синтеза не производит атмосферных выбросов углекислоты, что является главным вкладом в глобальное потепление.

# ПАРАДОКСЫ КВАНТОВОЙ ФИЗИКИ

*Если вам кажется, что вы понимаете квантовую теорию... то вы не понимаете квантовую теорию.*

Ричард Фейнман

Квантовая физика существует как объективная реальность, но само понимание остается непреодолимым барьером. Интуиция, основанная на нашем повседневном опыте, оказывается слишком слабой, когда нужно прояснить загадочные аспекты квантовой физики.

Парадокс — это явление, которое содержит некое «внутреннее противоречие» и поэтому кажется наблюдателю нелогичным и невероятным. То есть оно может существовать в реальности, но не имеет логического объяснения. Или же нам не хватает знаний для объяснения данного феномена.

Ниже рассмотрим несколько парадоксов квантовой физики.

## КОТ ШРЕДИНГЕРА

Как уже было рассказано ранее, Эдвин Шредингер в 1935 году вообразил себе эксперимент. В закрытую коробку вместе с котом помещают механизм, выпускающий яд только в том случае, если 1 атом этого радиоактивного вещества, помещенного в тот же коробок, распадается в течение часа. Получается, что, пока ящик закрыт, кот внутри в конкретный момент времени одновременно и жив, и мертв. Таким образом, при наблюдении за замкнутой системой неопределенности ее состояния можно избежать, только наблюдая за конкретным объектом в ней.

Шредингер ходил по комнате в поисках нагавившего котенка, а тот сидел в коробке ни жив ни мертв

## ПАРАДОКС КЛЕЙНА

Релятивистскую частицу перемещают сквозь потенциальный барьер, энергия



## ЮМОР ФИЗИКОВ

Шредингер и Гейзенберг едут по трассе на конференцию, Шредингер за рулем.

Внезапно раздаётся удар, и он останавливает машину.

Гейзенберг выглядывает на дорогу:

— Боже мой, похоже, я сбил кота!

— Он умер?

— Не могу сказать точно

которого больше потенциальной энергии этой частицы. Для наглядности представьте себе бегуна, который на полном ходу сталкивается с бетонной стеной. Так вот, по другую сторону стены другой бегун, принимая его импульс, начинает бежать с такой же скоростью, как бы принимая все физические характеристики спортсмена, оставшегося за стеной. Если с точки зрения классической механики это невозможно, то с точки зрения квантовой механики при ударе о барьер частица энергии будет через поле передана частице по другую сторону барьера, которая станет двигаться по тому же вектору.

## ПАРАДОКС ЗЕНОНА

Пока вы будете продолжать наблюдение за нестабильной квантовой частицей, она не распадется. Чтобы иметь возможность наблюдать за частицей, ученым необходимо постоянно передавать ей энергию или дополнительный импульс, и чем активнее она, тем с меньшей вероятностью произойдет распад.

## КОРПУСКУЛЯРНО-ВОЛНОВОЙ ДУАЛИЗМ

Мы уже не раз упоминали, что некоторые объекты, например свет, могут проявлять как свойства волны, так и корпускулярные свойства. Их можно рассматривать и как волну, и как совокупность частиц. В квантовой физике эти два подхода дают разные сведения, дополняющие друг друга.

## КВАНТОВАЯ ЗАПУТАННОСТЬ

Если взять частицу из определенного множества частиц и повлиять на нее любым способом, то изменится состояние и остальных частиц, даже если они находятся в совершенно иных условиях.

## ТЕЛЕПОРТАЦИЯ

Элементарные частицы тесно связаны между собой на некоем уровне за пределами времени и пространства. Если спровоцировать образование двух частиц одновременно, то они окажутся связанными друг с другом, или, как говорят физики, будут находиться в состоянии суперпозиции. Если мы затем выстреливаем их в противоположные концы Вселенной и через некоторое время тем или иным образом изменяем состояние одной из частиц, вторая частица тоже мгновенно изменится, чтобы прийти в такое же состояние. Телепортация — это по сути копирование состояния частиц без передачи энергии и самого вещества.

## СВЕРХТЕКУЧЕСТЬ

При температурах, близких к абсолютному нулю, вещество, которое мы назовем квантовой жидкостью, приобретает свойство просачиваться сквозь капилляры и узкие каналы, не вызывая трения. При таких температурах атомы вещества ведут себя практически одинаково, а значит, происходит минимальное количество столкновений. А нет столкновений — нет траты энергии, а следовательно, и трения.

Квантовая телепортация — это процесс передачи квантового состояния на некоторое расстояние при помощи классического канала связи. При этом состояние разрушается в точке отправки и воссоздается в точке приема. Термин впервые был использован в журнале «Physical Review Letters» в 1993 году. Квантовая телепортация не передает энергию или вещество на расстояние, а лишь телепортирует информацию, причем не быстрее скорости света, благодаря чему не нарушает принципы современной физики

Сидят две блондинки — обсуждают проблемы квантовой физики...  
Вдруг одна из них прерывает беседу:  
— Глянь — мужики идут! Давай скорее о тряпках!  
(Анекдот)

## СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ

Это квантовый эффект, когда при температурах, близких к абсолютному нулю, сопротивление проводника практически отсутствует.

Приведенные парадоксы — это лишь надводная часть айсберга, называемого «квантовая физика». Физики утверждают, что законы квантовой механики в наши дни неполны и в будущем будут выведены новые, дополняющие старые.

# КВАНТОВАЯ ТЕОРИЯ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД

*Ты никогда не решишь проблему, если будешь думать  
так же, как те, кто ее создал.*

Альберт Эйнштейн

Казалось бы, кристалл, содержащий миллионы атомов, исследовать в миллионы раз труднее, чем отдельный атом. Но на самом деле задача не так уж и сложна, если посмотреть на нее с другой точки зрения.

К физике конденсированных сред относят излучение кристаллов, магнетиков, жидких кристаллов, сверхтекучих жидкостей — упорядоченных сред и аморфных тел, полимеров, стекол — неупорядоченных сред.

Квантовая теория позволила разгадать многие загадки в поведении твердых тел, и прежде всего кристаллов.

## КРИСТАЛЛ И АТОМ — ВСЕ ЕДИНО

Структура кристалла — это кристаллическая решетка, внутри которой через равные промежутки находятся одни и те же атомы, ионы или молекулы. Кристалл обладает свойством периодичности по любому направлению. Потому-то при исследовании кристаллов помогает в первую очередь именно упорядоченность, а не свойства отдельных его составляющих. Вместе с тем между упорядоченными атомами кристаллической решетки электроны с верхних уровней свободно перебегают от одного атома к другому, они принадлежат всему кристаллу. Движение таких электронов определяется уже не столько свойствами отдельных атомов, сколько свойствами кристаллической решетки.

Кристаллы

(от греч.

κρύσταλλος, первоначально — лед, в дальнейшем — горный хрусталь, кристалл) — твердые тела, в которых атомы расположены закономерно, образуя трехмерно-периодическую пространственную укладку — кристаллическую решетку

### КРАСОТА ОТ ПРИРОДЫ

Кристаллы имеют естественную внешнюю форму правильных симметричных многогранников, основанную на их внутренней структуре, то есть на одном из нескольких определенных регулярных расположений составляющих вещество частиц (атомов, молекул, ионов)

Таким образом, кристалл можно рассматривать как совокупность двух составляющих. Первая из них — сама кристаллическая решетка, лишенная валентных электронов, а потому положительно заряженная. Вторая — совокупность электронов в периодическом электрическом поле положительно заряженной решетки.

Любое воздействие на кристалл приводит к тому, что в одной из составляющих подсистем, а то и сразу в обеих начнет распространяться волна, подобно распространению волны в воде от брошенного камня. А значит, достаточно исследовать саму волну в целом, а не ее составляющие.

Согласно квантовой теории, каждой волне соответствует частица — квант данной волны. В теории твердого тела она называется квазичастицей. Квазичастицам разрешено иметь характеристики, в частности энергию, не любых значений, а лишь некоторых, определяемых конкретной структурой кристалла. Типов квазичастиц существует довольно много. Кванты упругих колебаний кристаллической решетки, так называемые фононы, отвечают, в частности, за распространение в кристалле звука и тепла.

Из этих рассуждений следует вывод, что квантовая теория — это универсальный инструмент, позволяющий проводить качественное и количественное исследование вещества на любом уровне — от атомов до сплошных сред.

## ОТ МАЗЕРА ДО ЛАЗЕРА

Достоинство квантовой теории заключается не только в том, что с ее помощью

удалось понять необъяснимые с точки зрения классической теории факты. Благодаря ей перед учеными открылись новые горизонты, о каких раньше они и не мечтали. Одним из открытий, основанных на теории конденсированных сред, стало создание квантовых генераторов, совершивших переворот не только в науке и технике, но и во всей окружающей нас действительности.

В 1939 году советский физик Валентин Фабрикант заметил, что при определенных условиях падающее на вещество электромагнитное излучение усиливается. Вспомним, что электроны и в отдельных атомах или молекулах, и в сплошных средах могут находиться на разных энергетических уровнях. Если на такую систему падает электромагнитная волна с определенной частотой, то в соответствии с постулатами Бора фотон может отдать свою энергию электрону, перебросив его с одного энергетического уровня на более высокий. Вместе с тем, как показал Эйнштейн, фотон способен заставить электрон, находящийся на более высоком энергетическом уровне, опуститься на более низкий с излучением фотона той же частоты. В результате вместо одного фотона появляются два одинаковых. В таких случаях говорят, что произошло вынужденное излучение. В обычных условиях термодинамического равновесия на более низком энергетическом уровне электронов больше, чем на верхнем. Если же по каким-то причинам электронов на верхнем уровне больше, излучение определенной частоты усиливается. Это принцип усиления электромагнитного излучения.

Лазер (англ. laser, акроним от light amplification by stimulated emission of radiation — «усиление света посредством вынужденного излучения»), или оптический квантовый генератор, — это устройство, преобразующее энергию накачки (световую, электрическую, тепловую, химическую и др.) в энергию когерентного, монохроматического, поляризованного и узконаправленного потока излучения

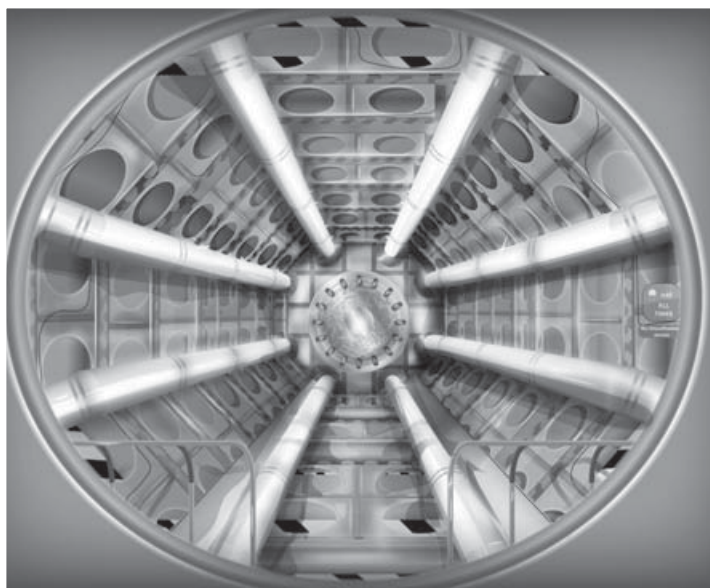
Мазер (от нач. букв англ. слов Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation — усиление микроволн сверхвысокой частоты (СВЧ) в результате вынужденного излучения) — общее название квантового усилителя и квантового генератора СВЧ. Мазеры используются в технике (в частности, в космической связи), в физических исследованиях, а также как квантовые стандарты частоты

Оставалось добиться такого состояния, когда на верхнем уровне окажется больше электронов, чем на нижнем.

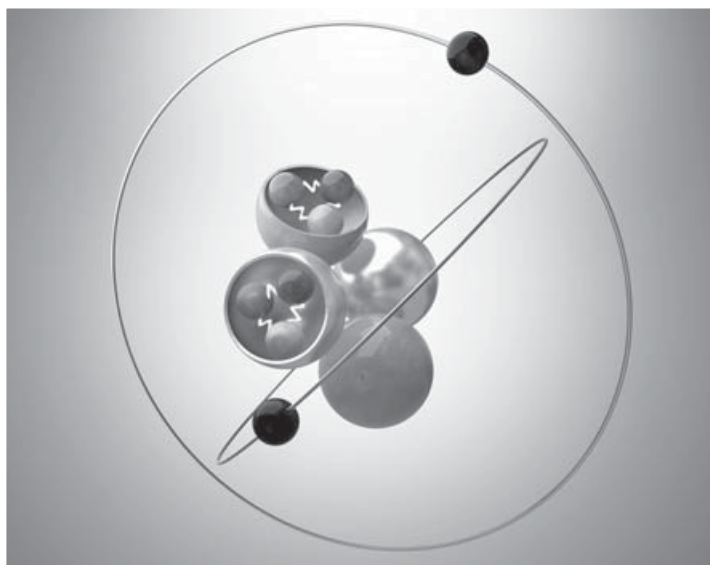
В 1954 году советские ученые Николай Басов и Александр Прохоров и независимо от них американец Чарлз Таунс создали приборы, генерирующие и усиливающие радиоволны микроволнового диапазона на молекулах аммиака, — так называемые мазеры. Электроны в них перемещало на верхний уровень электрическое поле сложной конфигурации. Это открытие знаменовало собой зарождение квантовой электроники.

А несколько ранее, в 1952 году, французский теоретик Альфред Кастлер предложил метод оптической накачки, что явилось в дальнейшем основой для создания генераторов и усилителей когерентного оптического излучения — лазеров, прочно вошедших в нашу жизнь.

Квантовая теория позволяет прогнозировать поведение тел при очень низких температурах. В первую очередь это относится к сверхпроводимости и сверхтекучести. При очень низких температурах миллионы атомов собираются в своеобразный «шар», который ведет себя как одна частица. Данное явление получило название бозе-эйнштейновской конденсации и вошло в научный обиход благодаря все той же квантовой механике — мощнейшему инструменту для предсказания и толкования новых эффектов.

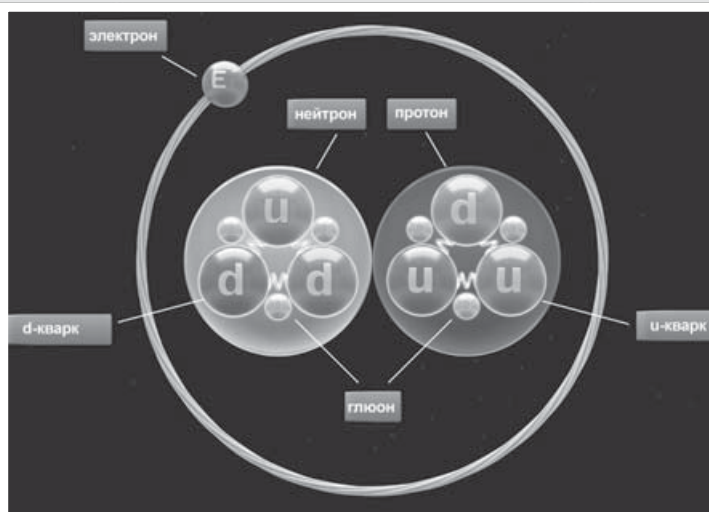


Большой адронный коллайдер



Протон как структура из двух  $u$ -кварков и одного  $d$ -кварка





Глюоны – элементарные частицы, которые «склеивают» кварки. Глюоны играют такую же роль в процессе сильного ядерного взаимодействия, как фотоны – в электромагнитном взаимодействии

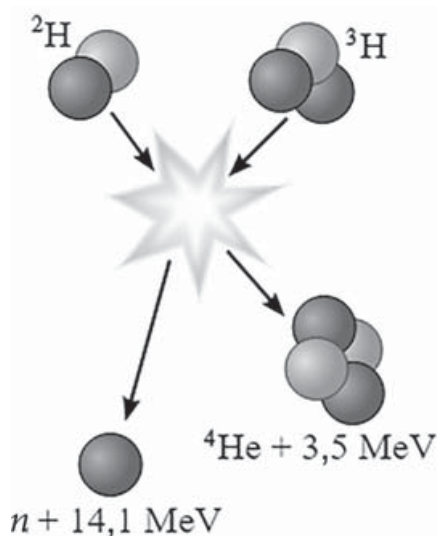


Схема термоядерной реакции дейтерий — тритий

# КВАНТОВАЯ ТЕОРИЯ ТВЕРДОГО ТЕЛА

*Вы думаете, все так просто?  
Да, все просто. Но совсем не так.*  
Альберт Эйнштейн

В предыдущей главе вы познакомились с квантовой теорией конденсированных сред. Физику твердого тела можно рассматривать как часть этой теории, описывающую физические свойства твердых тел с точки зрения их атомного строения.

Интенсивное развитие квантовой теории твердого тела началось в XX веке после открытия квантовой механики и было обусловлено широким кругом задач прикладного характера, в частности, внедрением полупроводниковой техники.

## ПОЧЕМУ ЖЕ ОНО ТВЕРДОЕ?

Одной из ключевых дат в истории физики твердого тела можно считать 8 июня 1912 года, когда в Баварской академии наук в Мюнхене немецкий физик Макс фон Лауэ выступил с докладом «Интерференция рентгеновских лучей». В этой работе было показано, что рентгеновские лучи являются волнами, так как они способны дифрагировать, то есть огибать препятствия. Лауэ доказал, что кристаллы состоят из периодических рядов атомов. Но только в 1930-е годы в работах Гейзенберга, Паули, Борна были созданы основы квантово-механической теории твердого тела, что позволило объяснить и спрогнозировать интересные физические эффекты в твердых телах.

Однако по порядку. Твердое тело состоит из атомов. Мы уже знаем, что между атомами существуют не только интенсивные силы притяжения, связывающие их



Макс фон Лауэ (1879–1960) — немецкий физик, лауреат Нобелевской премии по физике в 1914 году за открытие дифракции рентгеновских лучей на кристаллах

Твердое тело — это одно из четырех агрегатных состояний вещества, отличающееся от других агрегатных состояний (жидкости, газов, плазмы) стабильностью формы и характером теплового движения атомов, совершающих малые колебания около положений равновесия

воедино, но и силы отталкивания, без которых между атомами не было бы промежутков. В результате таких взаимодействий атомы твердого тела частично теряют свои индивидуальные свойства, этим-то и объясняются новые, коллективные свойства системы атомов, которая и называется твердым телом.

Какова же природа этих сил? Свободный атом состоит из положительно заряженного ядра и некоторого числа отрицательно заряженных электронов, а их суммарная масса, как мы помним, значительно меньше массы ядра. Электрические, или, как говорят физики, кулоновские, силы, действующие между заряженными частицами, создают притяжение между ядром и электронами, ведь они имеют разный заряд, а также взаимное отталкивание между электронами, имеющими одинаковый — отрицательный заряд. Из этого следует, что твердое тело можно рассматривать как состоящее из системы взаимно отталкивающихся ядер и системы взаимно отталкивающихся электронов, причем обе эти системы притягиваются друг к другу. Физические свойства такого объекта определяются двумя фундаментальными физическими теориями — квантовой механикой и статистической механикой. И хотя характер взаимодействий между частицами известен, но их необычайно большое число не позволяет дать точное теоретическое описание твердого тела.

## СОЕДИНЕНИЕ ПРОСТОГО И СЛОЖНОГО

Что же в этом случае делать? Физики — люди, привыкшие к идеализации, которую

поставили во главу многих своих теорий. Вот и в физике твердого тела обычно принимают упрощенные модели твердого тела и затем проводят вычисления его физических свойств. С одной стороны, модели должны быть достаточно простыми, чтобы их можно было теоретически описать, и, с другой стороны, достаточно сложными, для того чтобы они обладали исследуемыми свойствами.

По сути вся физика твердого тела сводится к установлению связи между свойствами отдельных атомов и молекул и свойствами, которые они обнаруживают при объединении в гигантские упорядоченные системы — кристаллы.

Физика твердого тела — один из тех столпов, на которых покоится современное технологическое общество. Целая армия инженеров работает над наилучшим использованием твердых материалов при проектировании и изготовлении самых разнообразных инструментов, станков, механических и электронных компонентов, необходимых в таких областях, как связь, транспорт, компьютерная техника, а также для фундаментальных исследований. Фактически физика твердого тела служит базой для физического материаловедения.

Физика твердого тела — раздел физики конденсированного состояния, задачей которого является описание физических свойств твердых тел с точки зрения их атомного строения. Интенсивно развивалась в XX веке после открытия квантовой механики. Развитие стимулировалось широким спектром важных задач прикладного характера, в частности развитием полупроводниковой техники

## КВАНТОВАЯ ОПТИКА

*Вам знакомо выражение «выше головы не прыгнешь»?  
Это заблуждение. Человек может все.*  
Никола Тесла

И все же, что такое свет? Частица, волна или и то и другое одновременно? Можно ли пощупать фотон и почему он существует, пока движется? Все дело в том, что это особое состояние материи, которое описывается законами квантовой оптики — одного из разделов квантовой физики.

Вспомним, что именно для света, а точнее, для электромагнитного поля, в 1900 году Максом Планком была впервые предложена идея квантового описания. Он предположил, что излучение света происходит порциями — квантами. И каким бы парадоксальным это предположение ни казалось, оно объяснило многие парадоксы оптики. Предположение о том, что излучение света происходит порциями, позволило согласовать теорию и эксперимент и тем самым избавило физику от «ультрафиолетовой катастрофы».

Квантовая оптика — раздел оптики, изучающий квантовые свойства света. Можно сказать, что квантовая оптика — это квантовая физика света

### ТАК ЧТО ЖЕ ТАКОЕ СВЕТ?

Кроме спектров излучения, в физике оставалось еще одно неясное место, а именно явление фотоэффекта. Было не понятно, почему кинетическая энергия электронов, выбиваемых светом из металла, зависит от частоты света. Более того, свет с достаточно малой частотой вообще не способен вызвать фотоэффект. Поскольку малая частота света соответствует красной части спектра, то это явление называли красной границей фотоэффекта.

В 1905 году Альберт Эйнштейн применил для объяснения фотоэффекта гипотезу квантов. Его идея заключалась в том,

что каждому электрону достается одна-единственная порция энергии — один квант. И если энергия этого кванта мала, ее просто не хватает для выхода электрона из металла. Эта идея прекрасно подтвердилась экспериментальными данными.

Оказалось, что свет и излучается, и поглощается порциями. Эйнштейн предположил, что свет всегда имеет дискретную структуру, но это была лишь гипотеза, ведь из того, что поглощение и излучение света происходят порциями, еще не следует, что свет и существует только в виде порций. Но именно эта идея оправдывает название «квантовая оптика», и именно с развитием квантовой оптики появились более весомые аргументы в пользу квантовой природы света.

В начале XX века стало общепринятым утверждение, что свет состоит из фотонов, и появилось представление о свете как о потоке корпускул, или частиц. Но такие явления, как интерференция и дифракция, не удавалось объяснить с точки зрения корпускулярной структуры света. Получалось, что свет, как и вообще электромагнитное излучение, — это и волны, и в то же время поток частиц. Примирить эти две точки зрения позволил квантовый подход к описанию света. С точки зрения такого подхода электромагнитное поле может находиться в одном из различных квантовых состояний. Поэтому фразу «свет состоит из фотонов» не следует понимать буквально: так, например, свет может находиться в таком состоянии, что с вероятностью 99% он не содержит фотонов, а с вероятностью 1% он содержит два фотона. Количество фотонов, находящихся в некотором

## СВЕТ КАК ФИЗИЧЕСКОЕ ЯВЛЕНИЕ

Свет — в физической оптике электромагнитное излучение, воспринимаемое человеческим глазом.

В широком смысле, используемом вне физической оптики, светом часто называют любое оптическое излучение. В этом случае в понятие «свет», помимо видимого излучения, включаются как инфракрасное, так и ультрафиолетовое излучения

Квантовая запутанность — квантово-механическое явление, при котором квантовые состояния двух или большего числа объектов оказываются взаимозависимыми. Такая взаимозависимость сохраняется, даже если эти объекты разнесены в пространстве за пределы любых известных взаимодействий, что находится в логическом противоречии с принципом локальности

объеме пространства, в отличие от, например, электронов, измерить точно практически невозможно.

## НЕКВАНТОВАЯ ТЕОРИЯ СВЕТА

Возможна ли неквантовая физика света? Конечно, да, и в большинстве случаев оптические явления можно объяснить без помощи квантовой теории. Но также есть много случаев, когда важно учитывать квантовую природу света.

Считается, что первый эксперимент в квантовой оптике — это эксперимент Брауна и Твисса, выполненный в 1956 году. Они показали, что если направить свет от некоторых источников на два фотоприемника, которые «щелкают» при регистрации фотонов, то приемники будут часто щелкать одновременно. Этот эксперимент довольно долго считался доказательством фотонной природы света: ведь одновременность щелчков фотоприемников означает, что оба они регистрируют существующие в действительности порции света. Соответственно, свет, который заставляет два фотоприемника щелкать строго одновременно, называют двухфотонным светом. С другой стороны, существуют источники света, которые никогда не дают одновременных щелчков фотодетекторов. Такой свет называется однофотонным.

Таким образом, можно прийти к выводу, что только в особых состояниях свет проявляет свойства, которые невозможно объяснить с классических позиций. Такие состояния света называют неклассическими.

Какие же неклассические состояния света можно на сегодняшний день воспроизвести

в лабораториях? Оказывается, совсем немного видов. Физики умеют готовить однофотонный и двухфотонный свет с примесью вакуумного состояния, то есть состояния света без фотонов. В случае однофотонного света это значит, что даже идеальный фотоприемник, включенный в определенный момент, необязательно зарегистрирует фотон, он среагирует лишь с какой-то вероятностью. Двух фотонов в этом случае фотоприемник не регистрирует никогда.

Однофотонный свет можно приготовить и без примеси вакуумного состояния — при этом будут точно известны моменты, когда нужно включать фотоприемник, и он будет щелкать с вероятностью 100%. А трехфотонный и тем более четырехфотонный свет экспериментаторы на сегодняшний день не умеют готовить даже с примесью вакуума!

Последний из доступных видов неклассического света — это так называемый сжатый свет, содержащий лишь четное число фотонов, и при его регистрации фотоприемники могут обнаружить пары фотонов, четверки, шестерки и так далее, но никогда — тройки, пятерки и другие нечетные числа фотонов.

Неклассический свет находит различные применения. Сжатый свет, как и двухфотонный свет, оказывается полезным при точных измерениях. Их использование позволяет уменьшить ошибки эксперимента, связанные с квантовой неопределенностью. Квантовые объекты чаще всего не имеют точно заданных параметров, их свойства можно назвать размазанными, так же как «размазно» их положение в пространстве. При высокоточных измерениях, когда погрешности эксперимента сведены к минимуму, эта

## СЛУЧАЙ ИЗ ЖИЗНИ...

Стоял на балконе. На улице уже темно, свет фонарей освещает дорогу около подъезда дома. Две девушки пытаются сфотографировать свои тени на асфальте и при этом делают это «зеркалкой», да еще и со вспышкой. Засек время. Ровно 2 минуты 34 секунды эти два прелестных создания не могли осознать сего физического явления

*(Цитата из ЖЖ)*



*«Меня завораживает все непонятное. В частности, книги по ядерной физике — умопомрачительный текст»*  
(Сальвадор Дали)

размазанность свойств становится принципиальным ограничением точности измерений. Использование сжатого света позволяет обойти эту трудность и в определенные моменты времени уменьшить размазанность.

Таим образом, основная проблема квантовой оптики — это описание взаимодействия света с веществом с учетом квантовой природы объектов, а также описание распространения света в специфических условиях. Чтобы точно решить эти задачи, требуется описывать и вещество, и свет исключительно с квантовых позиций. Это очень сложная задача, поэтому ученые часто прибегают к упрощениям: одну из компонент системы описывают как классический объект.

# КВАНТОВАЯ КРИПТОГРАФИЯ

*Господь не только играет в кости,  
но к тому же забрасывает их порою туда,  
где мы их не можем не увидеть.*

Стивен Хокинг

Современные оптические линии связи не гарантируют конфиденциальность передаваемой информации, поскольку по оптоволоконным линиям движутся миллионы фотонов, во многом дублирующих друг друга, и часть из них можно перехватить незаметно для адресата. И тут на помощь вновь приходит квантовая физика.

Шифрование передаваемой информации всегда играло важнейшую роль в политической и экономической жизни стран. Проблемой шифрования занимается наука криптография, которая использует математические методы. Тем не менее всегда остается вероятность перехватить часть информации и ее расшифровать.

Развитие науки породило квантовую криптографию — метод защиты коммуникаций, основанный на принципах квантовой физики, когда информация переносится с помощью объектов квантовой механики.

## ИДЕАЛЬНАЯ ЗАЩИТА

История квантовой криптографии началась в конце 1960-х годов, когда студент Колумбийского университета Стивен Визнер изложил своему бывшему сокурснику Чарльзу Беннету идею квантовых банкнот, которые в принципе нельзя подделать, поскольку это исключают законы природы.

Основная идея квантовой криптографии состоит в том, чтобы передавать информацию отдельными фотонами.

Квантовая криптография — метод защиты коммуникаций, основанный на принципах квантовой физики

## **ФОТОНЫ — НОСИТЕЛИ ИНФОРМАЦИИ**

Носителями информации в протоколе BB84 являются фотоны, поляризованные под углами 0, 45, 90, 135 градусов. В соответствии с законами квантовой физики, с помощью измерения можно различить лишь два ортогональных состояния: если известно, что фотон поляризован либо вертикально, либо горизонтально, то путем измерения можно установить — как именно; то же самое можно утверждать относительно поляризации под углами 45 и 135 градусов. Однако с достоверностью отличить вертикально поляризованный фотон от фотона, поляризованного под углом 45 градусов, невозможно

Например, цифры 0 и 1 кодируются поляризацией фотонов: вертикально поляризованный фотон обозначает 0, а горизонтально поляризованный фотон — 1. Такая передача информации будет секретной, потому что ее нельзя «подслушать». В основе этого утверждения лежит принцип неопределенности Гейзенберга, который постулирует, что любое попользование внедриться в канал передачи, то есть произвести измерение в квантовой системе, неизбежно приведет к ее нарушению и будет зафиксировано принимающей стороной. Любой подслушивающий может лишь перехватить некоторые фотоны целиком — ведь он не может отщепить часть фотона и узнать таким образом его поляризацию. Но перехваченные фотоны просто не будут участвовать в передаче информации, поэтому информация, переданная отдельными квантами, защищена от подслушивания.

## **БУДУЩЕЕ ГДЕ-ТО РЯДОМ**

Первый протокол квантовой криптографии изобрели американские ученые Чарльз Беннет и Жиль Brassard в 1984 году, поэтому его называют BB84. Спустя пять лет они создали такую систему в исследовательском центре IBM, разместив передатчик и приемник в светонепроницаемом кожухе на расстоянии всего 30 см друг от друга. Система управлялась с персонального компьютера

и позволяла обмениваться по воздушному каналу секретным ключом со скоростью 10 бит/с.

На сегодняшний день у этого канала есть один теоретически непреодолимый недостаток: он не в состоянии обеспечить высокую пропускную способность. Это ограничение является настолько значительным, что об использовании квантовой криптографии до сих пор говорили только в будущем времени. Однако ситуация стремительно меняется, и кто знает...

## **ЧТО ТАКОЕ КУБИТ?**

BB84 — первый протокол квантового распределения ключа, который был предложен в 1984 году Чарльзом Беннетом и Жилем Брассардом. Отсюда и название BB84, под которым этот протокол известен в наше время. Носителями информации являются двухуровневые системы, называемые кубитами — квантовыми битами.

## КВАНТОВЫЙ КОМПЬЮТЕР

*Величайшим достижением человеческого гения является то, что человек может понять вещи, которые он уже не в силах вообразить.*

Лев Ландау

Используя законы квантовой механики, можно создать принципиально новый тип вычислительных машин, которые позволят решать некоторые задачи, недоступные даже самым мощным современным суперкомпьютерам. Сегодня уже созданы прототипы квантовых компьютеров будущего.

Идея использования квантовых вычислений, а как следствие, и квантового компьютера впервые была высказана советским математиком Юрием Маниным в 1980 году, но, к сожалению, особой популярности не приобрела. Истинный интерес к проблеме возник лишь два года спустя, в 1982 году, после публикации статьи американского физика-теоретика Ричарда Фейнмана. Он заметил, что некоторые квантово-механические операции нельзя в точности переносить на классический компьютер, значит, подобные вычисления имеет смысл осуществлять при помощи квантовых операций.

Квантовый компьютер — вычислительное устройство, которое использует явления квантовой суперпозиции и квантовой запутанности для передачи и обработки данных

### ОНИ СУЩЕСТВУЮТ, НО ВСЕ ЖЕ...

Уже в 1985 году британский физик-теоретик Дэвид Дойч предложил конкретную математическую модель квантовой машины, но практическая реализация квантовых компьютеров на тот момент оказалась весьма сложной. Идеи начали воплощаться в практику только в 1998 году, но достаточно результативные работы проводятся только в последние десять лет.

Каков же принцип работы квантового компьютера?

Смысл работы обычного компьютера заключается в использовании двоичного кодирования, где наличие определенного значения напряжения принимается за 1, а отсутствие — за 0. Количество информации, выраженное 0 или 1, считается битом. Работа же квантового компьютера связана с понятием спина. Определенное направление спина частицы принимается за 1, а обратное ему — за 0. Это напоминает устройство транзистора. Основным элементом будет уже называться квантовым битом, или кубитом. В качестве него могут выступать фотоны, атомы, ионы, ядра атомов.

Главным условием квантового компьютера является наличие двух квантовых состояний. И если изменение состояния определенного бита в обычном компьютере не ведет к изменению других, то в квантовом компьютере все происходит именно так. Но поскольку таких частиц огромное количество, представьте, во сколько раз возрастет производительность такой машины! И все же создание целостного новейшего компьютера — это пока только гипотеза.

В создании компьютера нового поколения выделяют четыре направления, которые отличаются тем, что именно выступает в роли логических кубитов:

- направление спинов частиц, составляющих основу атома;
- наличие или отсутствие куперовской пары в установленном месте пространства;
- состояния внешнего электрона;
- различные состояния фотона.

### **ОДНОВРЕМЕННО ИЛИ ПОСЛЕДОВА- ТЕЛЬНО?**

Обыкновенные персональные компьютеры способны оперировать только понятиями «Да» или «Нет», «Вкл» или «Выкл», «0» или «1». В мире квантов место этих понятий занимает операция «И». Благодаря этому квантовые компьютеры способны обрабатывать все возможные варианты решения проблемы одновременно, а не последовательно

### 1 ИЛИ 0?

В обычных персональных компьютерах при вычислениях используются биты, которые могут содержать одно из двух значений — ноль или единицу. В компьютере же, использующем принципы квантовой механики, единицей информации служат так называемые кубиты, которые также могут иметь два положения, но есть у них и третье — одновременно 1 и 0. Это значит, что один и тот же набор кубитов может иметь несколько различных значений, например 2 кубита в суперпозиции представляют собой четыре возможных ситуации: 0–0, 1–0, 0–1, 1–1

## ОБЕЩАННОГО ЛЕТ ДЕСЯТЬ ЖДУТ

В разработке квантового компьютера очень заинтересованы, прежде всего, различные крупные компании и государства в целом. Ибо это приведет к новым открытиям в области разработки криптографических алгоритмов, а значит, решатся многие проблемы, связанные с банковской системой.

Сообщения будут передаваться с огромной скоростью, и не будет проблем связаться с любой точкой на земном шаре, а возможно, и за его пределами.

Такой компьютер приведет к разрешению многих медицинских проблем, поможет в расшифровке генетического кода.

Физические процессы, составляющие принцип работы квантового компьютера, помогут человечеству выйти за рамки материального мира и, возможно, приоткроют дверь в страну мистических тайн, параллельных миров.

Но все это дело далекого, а может, и не совсем, будущего. Для практического применения пока не создано ни одного квантового компьютера, который бы удовлетворял всем теоретическим условиям. Однако во многих развитых странах разработке квантовых компьютеров уделяется особое внимание, в такие программы ежегодно вкладываются десятки миллионов долларов.

На данный момент наибольший квантовый компьютер составлен всего из

семи кубитов. Этого достаточно только для того, чтобы разложить число 15 на простые множители 3 и 5.

Остается добавить, что возможны различные схемы квантовых компьютеров, разработка которых ведется в настоящее время. Однако пройдет еще какое-то время, прежде чем настоящие квантовые компьютеры, наконец, будут созданы.

*«Знаешь, очень трудно говорить о квантах на языке, изначально предназначенном для того, чтобы одна обезьяна могла сообщить другой, где висит спелый плод»*  
(Лю-Цзе)



## ТЕОРИЯ СТРУН

*В теоретической физике нам удастся объяснить то, что мы уже не можем себе представить.*

Лев Ландау

Как вы уже знаете, вся Вселенная зиждется на четырех видах взаимодействий: гравитационном, электромагнитном, сильном и слабом. Но существует ли универсальная формула, описывающая единство этих взаимодействий? Над этой проблемой до сих пор ломают голову физики-теоретики разных стран.

Эйнштейновская теория относительности описывает гравитацию — самую известную силу Вселенной. Квантовая механика описывает три другие силы: сильное ядерное взаимодействие, склеивающее протоны и нейтроны в атомах, электромагнетизм и слабое взаимодействие, которое участвует в радиоактивном распаде. Любое событие в мироздании описывается взаимодействиями материи посредством этих четырех сил.

Теория струн — направление теоретической физики, изучающее динамику взаимодействия не точечных частиц, а одномерных протяженных объектов, так называемых квантовых струн

### ТЕОРИЯ ВСЕГО

Ученые с помощью математического аппарата доказали, что электромагнитное и слабое взаимодействия имеют общую природу, объединив их в электрослабое. Немного позднее к ним добавилось и сильное ядерное взаимодействие. Гравитация в общую картину этих взаимодействий не вписывается никак.

Попытка объединить все виды взаимодействий в единую теорию и тем самым объяснить все явления во Вселенной получила название теории струн, которую еще называют Теорией Всего.

А все началось в конце 1960-х годов, когда молодой итальянский физик-теоретик Габриеле Венециано искал уравнения,

которые смогли бы объяснить сильные ядерные взаимодействия — тот «суперклей», который скрепляет ядра атомов, связывая воедино протоны и нейтроны. Легенда утверждает, что как-то он случайно наткнулся на пыльную книгу по истории математики, в которой нашел уравнение двухсотлетней давности, впервые записанное швейцарским математиком Леонардом Эйлером. Каково же было удивление Венециано, когда он обнаружил, что уравнение Эйлера, которое долгое время считали не чем иным, как математической казуистикой, как раз и описывает это сильное взаимодействие! Но скорее всего, уравнение стало результатом долгих лет работы Венециано, а случай лишь помог сделать первый шаг к теории струн.

Работы Венециано в конце концов попали на глаза молодому американскому физико-теоретику Леонарду Сасскинду, который увидел, что в первую очередь формула описывает частицы, которые не имеют внутренней структуры и могут вибрировать, — словом, эти частицы ведут себя так, что не могут быть просто точечными частицами. Сасскинд понял: формула описывает нить, подобную упругой резинке. Она может не только растягиваться и сжиматься, но и колебаться, извиваться. Описав свое открытие, Сасскинд представил миру революционную идею струн.

## КОСМИЧЕСКИЙ ОРКЕСТР

Теория струн позволяет представить элементарные частицы, составляющие атом из ультрамикроскопических волокон, называемых струнами. Микрочастицы — это объединения тончайших одномерных струн,

Чтобы понять основную идею теории струн, сначала нужно вникнуть в суть стандартной модели, ее ближайшего конкурента. В стандартной модели предполагается, что материя и взаимодействия описываются определенным набором частиц, которые можно поделить на следующие группы: кварки, лептоны, бозоны — то есть минимально возможные в нашем мире микрообъекты, которые невозможно поделить на части, в общем кирпичики мироздания. Отличие теории струн состоит в том, что в ней такими кирпичиками выступают не частицы, а ультрамикроскопические квантовые струны, которые совершают колебания

Адроны — класс элементарных частиц, подверженных сильному взаимодействию. Адроны делятся на две основные группы:

- Барионы — состоят из трех кварков трех цветов, образуя так называемую бесцветную комбинацию. Именно из барионов построена подавляющая часть наблюдаемого нами вещества — это нуклоны, составляющие ядро атома и представленные протоном и нейтроном
- Мезоны — состоят из одного кварка и одного антикварка. К мезонам относятся пионы и каоны

имеющих вид точечных микрочастиц. Все свойства элементарных частиц объясняются резонансным колебанием волокон, их образующих.

Представьте себе струны музыкальных инструментов, которые могут вибрировать, изгибаться, сворачиваться. Аналогичный процесс происходит и с этими струнами-нитеями, которые, издавая определенные вибрации, взаимодействуют друг с другом, сворачиваются в петли и образуют более крупные частицы, масса которых зависит от частоты вибрации волокон и их натянутости. Чем больше излучаемая энергия, тем выше масса элементарной частицы.

Согласно гипотезе, Вселенная возникла благодаря расширению микропространства размером в струну, соответствующую постоянной Планка. По мере увеличения этой области растягивались и ультрамикроскопические струны — теперь их длина соизмерима с размерами Вселенной. Но они точно так же взаимодействуют между собой и производят те же вибрации и колебания. Продольные колебания порождают гравитационное излучение.

В середине 1980-х годов теория струн, несмотря на путаницу, приобрела относительно стройный вид. Всего за несколько лет возникло целых пять версий теории струн, объединенных, невзирая на значительные различия, в общую теорию суперструн.

Тем не менее из-за наличия множества проблем в этой теории ее поддерживают далеко не все ученые.

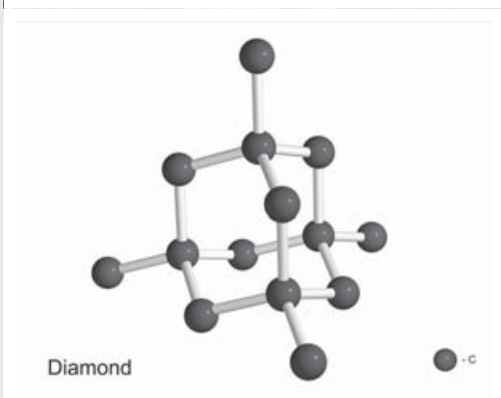
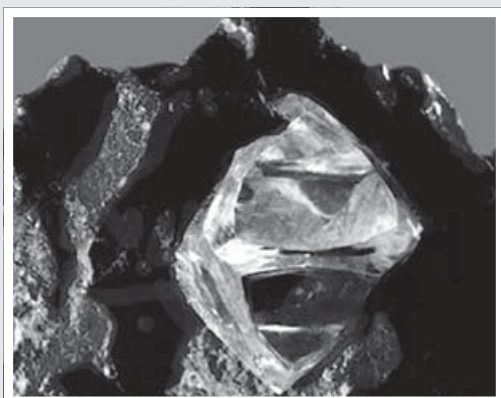
Одной из проблем считается математическая несостоятельность теории — физикам, изучающим ее, не хватает формул для

приведения ее в заверченный вид. Вторая заключается в том, что данная теория предполагает существование десяти измерений, но мы можем ощущать всего четыре — высоту, ширину, длину и время. Ученые предполагают, что остальные шесть находятся в скрученном состоянии, их наличие не ощущается в реальном времени. Также проблемой является невозможность экспериментального подтверждения этой теории. Но и опровергнуть ее никто не может, поскольку ни один инструмент в мире, ни существующий, ни способный появиться в перспективе, не способен «увидеть» эти самые струны. На сегодня остается открытым вопрос: теория струн — это физическая или философская теория?

Все же некоторые ученые считают, что существует минимальная возможность проверить гипотезу о дополнительных измерениях на следующем поколении ускорителей, но произойти это может еще очень нескоро — как минимум через десятилетия, как максимум — через сотню лет. Пока же вопросов значительно больше, чем ученые могут дать ответов...

*«Приветствуем вас  
в павильоне сме-  
ха — в сумасшед-  
шем, ненормальном,  
на голове стоящем  
мире квантовой ме-  
ханики, где правит  
неопределенность  
и ничто порождает  
осмысленные ощу-  
щения»*

(Леонард  
Сасскинд)



Внешний вид алмаза и его кристаллическая решетка



Первая квантово-криптографическая схема. Система состоит из квантового канала и специального оборудования на обоих концах схемы

Обычный регистр

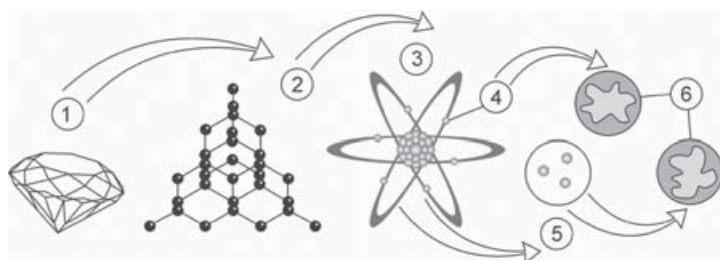
Квантовый регистр

101

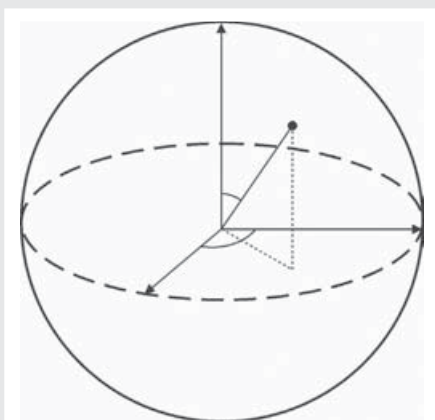


000 001 010 011  
100 101 110 111

3 бита обычного регистра и 3 кубита квантового



Уровни строения мира: 1 — макроскопический, 2 — молекулярный, 3 — атомный, 4 — субатомный — электрон, 5 — субатомный — кварки, 6 — струнный



Сфера Блоха является представлением кубита, фундаментального строительного блока квантовых компьютеров

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Хокинг С.* Краткая история времени... — М.: Издательский дом «Амфора», 2001.
2. *Сасскинд Л.* Битва при черной дыре. Мое сражение со Стивеном Хокингом за мир, безопасный для квантовой механики. — СПб.: Питер, 2016.
3. *Кокс Б., Форшоу Д.* Квантовая Вселенная. Как устроено то, что мы не можем увидеть. — М.: МИФ, 2016.
4. *Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М.* Фейнмановские лекции по физике. Том 3: Излучение. Волны. Кванты. — М.: Эдиториал УРСС, 2004.
5. *Фейнман Р.* КЭД — странная теория света и вещества. — М.: АСТ, 2014.
6. *Грин Б.* Элегантная Вселенная: Суперструны, скрытые размерности и поиски окончательной теории. — М.: Эдиториал УРСС, 2011.
7. *Каганов М.И.* Электроны, фононы, магноны. — М.: Эдиториал УРСС, 2014.
8. [http://elementy.ru/nauchno-populyarnaya\\_biblioteka/430290/Kvantovaya\\_sutra](http://elementy.ru/nauchno-populyarnaya_biblioteka/430290/Kvantovaya_sutra)
9. <http://nuclphys.sinp.msu.ru/cur/microcosm.htm>
10. <http://econet.ru/articles/67773-10-izmereniy-realnosti-prosto-i-ponyatno-o-teorii-strun>
11. [http://elementy.ru/trefil/85/Kvantovaya\\_khromodinamika](http://elementy.ru/trefil/85/Kvantovaya_khromodinamika)
12. <http://hi-news.ru/tag/kvantovye-kompyutery>
13. <http://www.quantum-philosophy.com/superposition>
14. <https://geektimes.ru/post/267954/>

Все права защищены. Книга или любая ее часть не может быть скопирована, воспроизведена в электронной или механической форме, в виде фотокопии, записи в память ЭВМ, репродукции или каким-либо иным способом, а также использована в любой информационной системе без получения разрешения от издателя. Копирование, воспроизведение и иное использование книги или ее части без согласия издателя является незаконным и влечет уголовную, административную и гражданскую ответственность.

Издание для досуга

ЭНЦИКЛОПЕДИЯ БЫСТРЫХ ЗНАНИЙ

## **КВАНТОВАЯ ФИЗИКА ДЛЯ ТЕХ, КТО ХОЧЕТ ВСЕ УСПЕТЬ**

Директор редакции *Е. Капъёв*  
Руководитель направления *М. Терёшина*  
Ответственный редактор *Ю. Орлова*  
Редактор *Е. Яворская*  
Младший редактор *М. Бройдо*  
Текст *М. Куценко*  
Художественный редактор *Г. Булгакова*  
Компьютерная верстка *Е. Кочкурова*  
Корректоры *В. Ганчурина, Н. Ленская*

В оформлении обложки использована иллюстрация:  
Yurkoman / Shutterstock.com  
Используется по лицензии от Shutterstock.com

Во внутреннем оформлении использованы фотографии и иллюстрации:  
Ye Liew, Designua, Victor Tongdee, ktsdesign, Anatolii Vasilev, Nicholas Greenaway,  
Festa, general-fmv, Vasilyev / Shutterstock.com  
Используется по лицензии от Shutterstock.com

ООО «Издательство «Эксмо»  
123308, Москва, ул. Зорге, д. 1. Тел. 8 (495) 411-68-86.  
Home page: [www.eksmo.ru](http://www.eksmo.ru) E-mail: [info@eksmo.ru](mailto:info@eksmo.ru)  
Өндіруші: «ЭКСМО» АҚБ Баспасы, 123308, Мәскеу, Ресей, Зорге көшесі, 1 үй.  
Тел. 8 (495) 411-68-86.  
Home page: [www.eksmo.ru](http://www.eksmo.ru) E-mail: [info@eksmo.ru](mailto:info@eksmo.ru)  
Тауар белгісі: «Эксмо»  
Қазақстан Республикасында дистрибьютор және өнім бойынша  
арыз-талаптарды қабылдаушының  
өкілі «РДЦ-Алматы» ЖШС, Алматы қ., Домбровский көш., 3-а, литер Б, офис 1.  
Тел.: 8 (727) 2 51 59 89,90,91,92, факс: 8 (727) 251 58 12 вн. 107; E-mail: [RDC-Almaty@eksmo.kz](mailto:RDC-Almaty@eksmo.kz)  
Өнімнің жарамдылық мерзімі шектелмеген.  
Сертификация туралы ақпарат сайты: [www.eksmo.ru/certification](http://www.eksmo.ru/certification)

Сведения о подтверждении соответствия издания согласно  
аконодательству РФ о техническом регулировании  
можно получить по адресу: <http://eksmo.ru/certification/>

Өндірген мемлекет: Ресей. Сертификация қарастырылмаған

Подписано в печать 31.01.2017.  
Формат 84x108<sup>1/32</sup>. Печать офсетная. Усл. печ. л. 6,72.  
Тираж экз. Заказ



ISBN 978-5-699-95592-3





В электронном виде книги издательства вы можете  
купить на [www.litres.ru](http://www.litres.ru)

**ЛитРес:**  
один клик до книги



Оптовая торговля книгами «Эксмо»:  
ООО «ТД «Эксмо». 142700, Московская обл., Ленинский р-н, г. Видное,  
Белокаменное ш., д. 1, многоканальный тел. 411-50-74.  
E-mail: [reception@eksmo-sale.ru](mailto:reception@eksmo-sale.ru)

По вопросам приобретения книг «Эксмо» зарубежными оптовыми  
покупателями обращаться в отдел зарубежных продаж ТД «Эксмо»  
E-mail: [international@eksmo-sale.ru](mailto:international@eksmo-sale.ru)

*International Sales: International wholesale customers should contact  
Foreign Sales Department of Trading House «Eksmo» for their orders.*  
**[international@eksmo-sale.ru](mailto:international@eksmo-sale.ru)**

По вопросам заказа книг корпоративным клиентам, в том числе в специальном  
оформлении, обращаться по тел. +7 (495) 411-68-59, доб. 2261.  
E-mail: [ivanova.ey@eksmo.ru](mailto:ivanova.ey@eksmo.ru)

Оптовая торговля бумажно-беловыми  
и канцелярскими товарами для школы и офиса «Канц-Эксмо»:  
Компания «Канц-Эксмо»: 142702, Московская обл., Ленинский р-н, г. Видное-2,  
Белокаменное ш., д. 1, а/я 5. Тел./факс +7 (495) 745-28-87 (многоканальный).  
e-mail: [kanc@eksmo-sale.ru](mailto:kanc@eksmo-sale.ru), сайт: [www.kanc-eksmo.ru](http://www.kanc-eksmo.ru)

**В Санкт-Петербурге:** в магазине «Парк Культуры и Чтения БУКВОЕД», Невский пр-т, д.46.  
Тел.: +7(812)601-0-601, [www.bookvoed.ru](http://www.bookvoed.ru)

Полный ассортимент книг издательства «Эксмо» для оптовых покупателей:

**В Санкт-Петербурге:** ООО СЗКО, пр-т Обуховской Обороны, д. 84Е. Тел. (812) 365-46-03/04.

**В Нижнем Новгороде:** Филиал ООО ТД «Эксмо» в г. Н. Новгороде, 603094, г. Нижний Новгород, ул.  
Карпинского, д. 29, бизнес-парк «Грин Плаза». Тел. (831) 216-15-91 (92, 93, 94).

**В Ростове-на-Дону:** Филиал ООО «Издательство «Эксмо»,  
344023, г. Ростов-на-Дону, ул. Страны Советов, 44 А. Тел.: (863) 303-62-10. E-mail: [info@rnd.eksmo.ru](mailto:info@rnd.eksmo.ru)

**В Самаре:** ООО «РДЦ-Самара», пр-т Кирова, д. 75/1, литера «Е». Тел. (846) 207-55-56.

**В Екатеринбурге:** Филиал ООО «Издательство «Эксмо» в г. Екатеринбурге,  
ул. Прибалтийская, д. 24а. Тел. +7 (343) 272-72-01/02/03/04/05/06/07/08.

**В Новосибирске:** ООО «РДЦ-Новосибирск», Комбинатский пер., д. 3.

Тел. +7 (383) 289-91-42. E-mail: [eksmo-nsk@yandex.ru](mailto:eksmo-nsk@yandex.ru)

**В Киеве:** ООО «Форс Украина», 04073, Московский пр-т, д.9. Тел.: +38 (044) 290-99-44.

E-mail: [sales@forsukraine.com](mailto:sales@forsukraine.com)

**В Казахстане:** ТОО «РДЦ-Алматы», ул. Домбровского, д. 3а.

Тел./факс (727) 251-59-90/91. [rdc-almaty@mail.ru](mailto:rdc-almaty@mail.ru)

Полный ассортимент продукции издательства «Эксмо»

**можно приобрести в магазинах «Новый книжный» и «Читай-город».**

Телефон единой справочной: 8 (800) 444-8-444. Звонок по России бесплатный.

Интернет-магазин ООО «Издательство «Эксмо»

**[www.fiction.eksmo.ru](http://www.fiction.eksmo.ru)**

Розничная продажа книг с доставкой по всему миру.

Тел.: +7 (495) 745-89-14. E-mail: [imarket@eksmo-sale.ru](mailto:imarket@eksmo-sale.ru)



BOOK24.RU

ИНТЕРНЕТ-МАГАЗИН

ИНТЕРНЕТ-МАГАЗИН

BOOK24.RU

Многие века человеческие умы будоражили рассказы и проявления магических феноменов. И только в наши дни появилась наука, определившая качественные и количественные закономерности перехода энергетических структур в более или менее плотное состояние. Эта наука — квантовая физика. Перспективы, которые открывают современные прикладные разделы квантовой теории, способны поразить любое воображение. Каждый прочитавший эту книгу станет немного магом, сможет приоткрыть завесу мироздания, взглянуть на физику иначе.

---

- ЧТО ТАКОЕ ТЕОРИЯ СТРУН?
- ПОЧЕМУ НАГРЕТОЕ ТЕЛО СВЕТИТСЯ?
- КАК УСТРОЕН ЭЛЕКТРОННЫЙ МИКРОСКОП?
- В ЧЕМ ЗАГАДКА КОТА ШРЁДИНГЕРА?
- ВОЗМОЖНА ЛИ ТЕЛЕПОРТАЦИЯ?

ОБ ЭТОМ И МНОГОМ ДРУГОМ В КОМПАКТНОМ И СОДЕРЖАТЕЛЬНОМ СПРАВОЧНИКЕ ДЛЯ ТЕХ, КТО ХОЧЕТ ВСЕ УСПЕТЬ.

---

ЗАДАЧА СЕРИИ «ЭНЦИКЛОПЕДИЯ БЫСТРЫХ ЗНАНИЙ» — рассказать просто, коротко и увлекательно о сложном. Книги послужат отличным источником базовых знаний и донесут общее понимание основных терминов и ключевых моментов в различных областях. Книги будут интересны читателям всех возрастов, решившим расширить свои знания в той или иной области и сделать это в быстрой и увлекательной форме.

ISBN 978-5-699-95592-3



9 785699 955923 >

