МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ

**Рубцовский индустриальный институт (филиал)
ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»**

ХРЕСТОМАТИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ «КОНЦЕПЦИИ СОВРЕМЕННОГО ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ»

Учебное пособие для студентов очной, заочной, заочной сокращенной форм обучения направлений 050100.62 «Педагогическое образование», 080200.62 «Менеджмент», 080100.62 «Экономика»

Часть 4

Рубцовск 2012

УДК 502
ББК 20

Хрестоматия по дисциплине «Концепции современного естествознания»: Учебное пособие для студентов очной, заочной, заочной сокращенной форм обучения направлений 050100.62 «Педагогическое образование», 080200.62 «Менеджмент», 080100.62 «Экономика». Часть 4 / [Сост. А.Ю. Павлов]. – Рубцовский индустриальный институт. – Рубцовск, 2012. – 30 с.

Учебное пособие представляет собой тематически подобранные фрагменты известной книги «Фейнмановские лекции по физике» авторов Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. по различным направлениям современного естествознания. В четвертой части учебного пособия содержатся материалы по квантовой физике, элементарным частицам, теории относительности.

Издание предназначено для оказания помощи студентам очной, заочной, заочной сокращенной форм обучения при подготовке к семинарским занятиям, зачету, экзамену, при написании контрольных и самостоятельных работ по дисциплине «Концепции современного естествознания».

Рассмотрено и одобрено
на заседании кафедры ГД
Протокол № 10 от 19.06.2012

Рецензент: к.ф.н. В.И. Попов

СОДЕРЖАНИЕ

Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М.
Фейнмановские лекции по физике. Т.1. – М., 1976.

Ядра и частицы

Из чего состоят ядра? Чем части ядра удерживаются вместе? Обнаружено, что существуют силы огромной величины, которые и удерживают составные части ядра. Когда эти силы высвобождаются, то выделяемая энергия по сравнению с химической энергией огромна, это все равно, что сравнить взрыв атомной бомбы со взрывом тротила. Объясняется это тем, что атомный взрыв вызван изменениями внутри ядра, тогда как при взрыве тротила перестраиваются лишь электроны на внешней оболочке атома.

Так каковы же те силы, которыми нейтроны и протоны скреплены в ядре?

Электрическое взаимодействие связывают с частицей — фотоном. Аналогично этому Юкава [японский физик 20 в. – **А.П.**]предположил, что силы притяжения между протоном и нейтроном обладают полем особого рода, а колебания этого поля ведут себя как частицы. Значит, не исключено, что, помимо нейтронов и протонов, в мире существуют некоторые иные частицы. Юкава сумел вывести свойства этих частиц из уже известных характеристик ядерных сил. Например, он предсказал, что они должны иметь массу, в 200 — 300 раз большую, чем электрон. И — о, чудо!— в космических лучах как раз открыли частицу с такой массой! Впрочем, чуть погодя выяснилось, что это совсем не та частица. Назвали ее μ-мезон, или мюон.

И все же несколько попозже, в 1947 или 1948г., обнаружилась частица — π-мезон, или пион,— удовлетворявшая требованиям Юкавы. Выходит, чтобы получить ядерные силы, к протону и нейтрону надо добавить пион. «Прекрасно! — воскликнете вы. — С помощью этой теории мы теперь соорудим квантовую ядродинамику, и пионы послужат тем целям, ради которых их ввел Юкава; посмотрим, заработает ли эта теория, и если да, то объясним все». Напрасные надежды! Выяснилось, что расчеты в этой теории столь сложны, что никому еще не удалось их проделать и извлечь из теории какие-либо следствия, никому не выпала удача сравнить ее с экспериментом. И тянется это уже почти 20 лет!

С теорией что-то не клеится; мы не знаем, верна она или нет; впрочем, мы уже знаем, что в ней чего-то недостает, что *какие-то* неправильности в ней таятся. Покуда мы топтались вокруг теории, пробуя вычислить следствия, экспериментаторы за это время кое-что открыли. Ну, тот же μ-мезон, или мюон. А мы до сей поры не знаем, на что он годится. Опять же, в космических лучах отыскали множество «лишних» частиц. К сегодняшнему дню их уже свыше 30, а связь между ними все еще трудно ухватить, и непонятно, чего природа от них хочет и кто из них от кого зависит. Перед нами все эти частицы пока не предстают как разные проявления одной и той же сущности, и тот факт, что имеется куча разрозненных частиц, есть лишь отражение наличия бессвязной информации без сносной теории. После неоспоримых успехов квантовой электродинамики — какой-то набор сведений из ядерной физики, обрывки знаний, полуопытных-полутеоретических. Задаются, скажем, характером взаимодействия протона с нейтроном и смотрят, что из этого выйдет, не понимая на самом деле, откуда эти силы берутся. Сверх описанного никаких особых успехов не произошло.

Но химических элементов ведь тоже было множество, и внезапно между ними удалось увидеть связь, выраженную периодической таблицей Менделеева. Скажем, калий и натрий — вещества, близкие по химическим свойствам,— в таблице попали в один столбец. Так вот, попробовали соорудить таблицу типа таблицы Менделеева и для новых частиц. Одна подобная таблица была предложена независимо Гелл-Манном в США и Нишиджимой в Японии. Основа их классификации — новое число, наподобие электрического заряда. Оно присваивается каждой частице и называется ее «странностью» S. Число это не меняется (так же как электрический заряд) в реакциях, производимых ядерными силами.

В табл. 2.2 приведены новые частицы. Мы не будем пока подробно говорить о них. Но из таблицы по крайней мере видно, как мало мы еще знаем. Под символом каждой частицы стоит ее масса, выраженная в определенных единицах, называемых мегаэлектронвольт, или *Мэв* (1 Мэв — это $1{,}782 \cdot 10^{-27}$ г). Не будем входить в исторические причины, заставившие ввести эту единицу. Частицы помассивнее стоят в таблице повыше. У (p— 938,3; n—939,6). В одной колонке стоят частицы одинакового электрического заряда, нейтральные — посерединке, положительные — направо, отрицательные — налево.

Частицы подчеркнуты сплошной линией, «резонансы» — штрихами. Некоторых частиц в таблице нет совсем: нет фотона и гравитона, очень важных частиц с нулевыми массой и зарядом (они не попадают в барион-мезон-лептонную схему классификации), нет и кое-каких новейших резонансов (Y, f, φ и др.). Античастицы мезонов в таблице приводятся, а для античастиц лептонов и барионов надо было бы составить новую таблицу, сходную с этой, но только зеркально отраженную относительно нулевой колонки. Хотя все частицы, кроме электрона, нейтрино, фотона, гравитона и протона, неустойчивы, продукты их распада написаны только для резонансов. Странность лептонов тоже не написана, так как это понятие к ним неприменимо — они не взаимодействуют сильно с ядрами.

Частицы, стоящие вместе с нейтроном и протоном, называют *барионами.* Это «лямбда» с массой 1115,4 Мэв и три другие — «сигмы», называемые сигма-минус, сигма-нуль, сигма-плюс, с почти одинаковыми массами. Группы частиц почти одинаковой массы (отличие на 1—2%) называются *мультиплетами.* У всех частиц в мультиплете странность одинакова. Первый мультиплет — это пара *(дублет)* протон — нейтрон, потом идет *синглет* (одиночка) лямбда, потом — *триплет* (тройка) сигм, дублет кси и синглет омега-минус. Начиная с 1961 г. начали открывать новые тяжелые частицы. Но *частицы ли* они? Живут они так мало (распадаются, едва возникнув, на π и Λ), что неизвестно, назвать ли их новыми частицами или считать «резонансным» взаимодействием между π и Λ при некоторой фиксированной энергии.

Для ядерных взаимодействий, кроме барионов, необходимы другие частицы — *мезоны.* Это, во-первых, три разновидности пионов (плюс, нуль и минус), образующие новый триплет. Найдены и новые частицы — *К*-мезоны (это дублет K^{+} и $K°$). У каждой частицы бывает античастица, если только частица не оказывается *своей собственной* античастицей, скажем π^{+} и π^{-} — античастицы друг друга, а π^{0} — сам себе античастица. Античастицы и K^{-} с K^{+} и K^{0} с $\overline{K^{0}}$.

Кроме того, после 1961 г. мы начали открывать новые мезоны, или *вроде-мезоны,* распадающиеся почти мгновенно. Одна такая диковинка называется омега, ω, ее масса 783, она превращается в три пиона; есть и другое образование, из которого получается пара пионов.

Подобно тому как из очень удачной таблицы Менделеева выпали некоторые редкие земли, точно так же из нашей таблицы выпадают некоторые частицы. Это те частицы, которые с ядрами сильно не взаимодействуют, к ядерному взаимодействию отношения не имеют и между собой сильно тоже не взаимодействуют (под сильным понимается мощный тип взаимодействия, дающего атомную энергию). Называются эти частицы *лептоны;* к ним относятся электрон (очень легкая частица с массой 0,51 Мэв) и мюон (с массой в 206 раз больше массы электрона). Насколько мы можем судить по всем экспериментам, электрон и мюон различаются *только* массой. Все свойства мюона, все его взаимодействия ничем не отличаются от свойств электрона — только один тяжелее другого. Почему он тяжелее, какая ему от этого польза, мы не знаем. Кроме них, есть еще нейтральный лептон — *нейтрино,* с массой нуль. Более того, сейчас известно, что есть *два* сорта нейтрино: одни, связанные с электронами, а другие — с мюонами.

И, наконец, существуют еще две частицы, тоже с ядрами не взаимодействующие. Одну мы знаем уже — это фотон; а если поле тяготения также обладает квантово-механическими свойствами (хотя пока квантовая теория тяготения не разработана), то, возможно, существует и частица гравитон с массой нуль.

Что такое «масса нуль»? Массы, которые мы приводили, это массы *покоящихся* частиц. Если у частицы масса нуль, то это значит, что она не смеет *покоиться.* Фотон никогда не стоит на месте, скорость его равна всегда 300000 *км/сек.* Мы с вами еще разберемся в теории относительности и попытаемся глубже вникнуть в смысл понятия массы.

Итак, мы встретились с целым строем частиц, которые все вместе, по-видимому, являются очень фундаментальной частью вещества. К счастью, эти частицы *не все* отличаются по своему взаимодействию друг от друга. Видимо, есть только *четыре типа* взаимодействий между ними. Перечислим их в порядке убывающей силы: ядерные силы, электрические взаимодействия, β- распадное взаимодействие и тяготение. Фотон взаимодействует со всеми заряженными частицами с силой, характеризуемой некоторым постоянным числом 1/137. Детальный закон этой связи известен — это квантовая электродинамика. Тяготение взаимодействует со всякой *энергией,* но чрезвычайно слабо, куда слабее, чем электричество. И этот закон известен. Потом идут так называемые слабые распады: β- распад, из-за которого нейтрон распадается довольно медленно на протон, электрон и нейтрино. Тут закон выяснен лишь частично. А так называемое сильное взаимодействие (связь мезона с барионом) обладает по этой шкале силой, равной единице, а закон его совершенно темен, хоть и известны кое-какие правила, вроде того, что количество барионов ни в одной реакции не меняется.

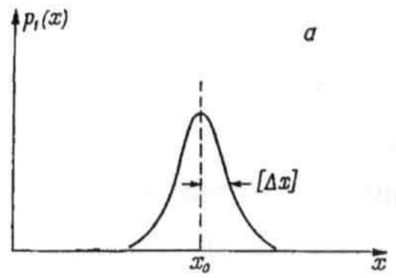
Положение, в котором находится современная физика, следует считать ужасным. Я бы подытожил его такими словами: вне ядра мы, видимо, знаем все; внутри него справедлива квантовая механика, нарушений ее принципов там не найдено. Сцена, на которой действуют все наши знания,— это релятивистское пространство-время; не исключено, что с ним связано и тяготение. Мы не знаем, как началась Вселенная, и мы ни разу не ставили опытов с целью точной проверки наших представлений о пространстве-времени на малых расстояниях, мы только *знаем,* что вне этих расстояний наши воззрения безошибочны. Можно было бы еще добавить, что правила игры — это принципы квантовой механики; и к новым частицам они, насколько нам известно, приложимы не хуже, чем к старым. Поиски происхождения ядерных сил приводят нас к новым частицам; но все эти открытия вызывают только замешательство. У нас нет полного понимания их взаимных отношений, хотя в некоторых поразительных связях между ними мы уже убедились. Мы, видимо, постепенно приближаемся к пониманию мира заатомных частиц, но неизвестно, насколько далеко мы ушли по этому пути.

Принцип неопределенности

Понятия вероятности оказались очень полезны при описании поведения газа, состоящего из огромного количества молекул. Немыслимо же, в самом деле, пытаться определить положение и скорость каждой из 10^{22} молекул! Когда впервые теория вероятности была применена к таким явлениям, то это рассматривалось просто как удобный способ работы в столь сложной обстановке. Однако теперь мы полагаем, что вероятность *существенно необходима* для описания различных атомных процессов. Согласно квантовой механике, этой математической теории малых частичек, при *определении* положения частички и ее скорости, всегда существует некоторая неопределенность. В лучшем случае мы можем только сказать, что существует какая-то вероятность того, что частица находится вблизи точки *x*.

Для описания местоположения частицы можно ввести плотность вероятности $p_1(x)$, так что $p_1(x)\,\Delta x$ будет вероятностью того, что частица находится где-то между x и $x+\Delta x$. Если положение частицы установлено достаточно хорошо, то примерный вид функции $p_1(x)$ может иллюстрировать график, приведенный на фигуре 6.10, а. Точно такое же положение и со скоростью частицы: она тоже неизвестна нам точно. С некоторой вероятностью $p_2(v)\Delta v$ части-

Ф и г. 6.10. Плотности вероятности координаты (а) и скорости (б) частицы.



ца может двигаться со скоростью, находящейся в интервале между v и $v + \Delta v$

Один из основных результатов квантовой механики состоит в том, что эти две плотности $p_1(x)$ и $p_2(v)$ не могут быть выбраны независимо в том смысле, что они обе не могут быть сколь угодно узкими. Если мы возьмем «полуширины» кривых $p_1(x)$ и $p_2(v)$ и обозначим их соответственно $[\Delta x]$ и $[\Delta v]$ (см. фиг. 6.10), то природа требует, чтобы *произведение* этих двух полуширин было не меньше величины h/m, где m — масса частицы, а h — некоторая фундаментальная физическая постоянная, называемая *постоянной Планка.* Это соотношение записывается следующим образом:

$$[\Delta x][\Delta v] \geqslant \frac{h}{m}$$

и называется *принципом неопределенности Гейзенберга.*

Чтобы это соотношение выполнялось, частица должна себя вести очень курьезно. Вы видите, что правая часть соотношения постоянна, а это означает, что если мы попытаемся «приколоть» частицу в каком-то определенном месте, то эта попытка окончится тем, что мы не сможем угадать, куда она летит и с какой скоростью. Точно так же если мы попытаемся заставить частицу двигаться очень медленно или с какой-то *определенной* скоростью, то она будет «расплываться» и мы не сможем точно указать, где она находится.

Принцип неопределенности выражает ту неясность, которая должна существовать при любой попытке описания природы. Наиболее точное и полное описание природы должно быть только вероятностным. Однако некоторым физикам такой способ описания приходится не по душе. Им кажется, что *о реальном* поведении частицы можно говорить только, когда одновременно заданы импульсы и координаты. В свое время на заре развития квантовой механики эта проблема очень сильно волновала Эйнштейна. Он часто качал головой и говорил: «Но ведь не гадает же господь бог «орел — решка», чтобы решить, куда должен двигаться электрон!» Этот вопрос беспокоил его в течение очень долгого времени, и до конца своих дней он, по-видимому, так и не смог примириться с тем фактом, что вероятностное описание природы — это максимум того, на что мы пока способны. Есть физики, которые интуитивно чувствуют, что наш мир можно описать как-то по-другому, что можно исключить эти неопределенности в поведении частиц. Они продолжают работать над этой проблемой, но до сих пор ни один из них не добился сколько-нибудь существенного результата.

Эта присущая миру неопределенность в определении положения частицы является наиболее важной чертой описания структуры атомов. В атоме водорода, например, который состоит из одного протона, образующего ядро, и электрона, находящегося где-то вне его, неопределенность в местонахождении электрона такая же, как и размеры самого атома! Мы не можем поэтому с уверенностью сказать, где, в какой части атома находится наш электрон, и уж, конечно, не может быть и речи ни о каких «орбитах». С уверенностью можно говорить только о *вероятности* $p(r)\Delta V$ обнаружить электрон в элементе объема ΔV на расстоянии r от протона. Квантовая механика позволяет в этом случае вычислять плотности вероятности $p(r)$, которая для невозмущенного атома водорода равна $Ae^{-r^2 a^2}$ Это — колоколообразная функция…, причем число *а* представляет собой характерную величину радиуса, после которого функция очень быстро убывает. Несмотря на то, что существует вероятность (хотя и небольшая) обнаружить электрон на большем, чем а, расстоянии от ядра, мы называем эту величину «радиусом атома». Она равна приблизительно 10^{-10}*м*.

Если вы хотите как-то представить себе атом водорода, то вообразите этакое «облако», плотность которого пропорциональна плотности вероятности. Такая наглядная картинка, пожалуй, наиболее близка к истине, хотя тут же нужно помнить, что это *не реальное* «электронное облако», а только «облако вероятностей». Где-то внутри него находится электрон, но природа позволяет нам только гадать, где же именно он находится. В своем стремлении узнать о природе вещей как можно больше современная физика обнаружила, что существуют вещи, познать которые точно ей никогда не удастся. Многому из наших знаний суждено навсегда остаться неопределенным. Нам дано знать *только* вероятности.

Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М.
Фейнмановские лекции по физике. Т.2. – М., 1976.

СПЕЦИАЛЬНАЯ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Принцип относительности

Свыше двухсот лет считалось, что уравнения движения, провозглашенные Ньютоном, правильно описывают природу. Потом в них была обнаружена ошибка. Обнаружена и тут же исправлена. И заметил ошибку, и исправил ее в 1905 г. один и тот же человек — Эйнштейн.

Второй закон Ньютона, выражаемый уравнением

$$\mathbf{F} = \frac{d(m\mathbf{v})}{dt},$$

безмолвно предполагал, что ***m*** — величина постоянная. Но теперь мы знаем, что это не так, что масса тела возрастает со скоростью. В формуле, исправленной Эйнштейном, ***m*** появилась в таком виде:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}.$$

Здесь «масса покоя» m_0— это масса неподвижного тела, а *с* — скорость света (примерно $3 \cdot 10^5$ *км/сек).*

Для кого теория нужна лишь для решения задач, тому этой формулы будет вполне достаточно. Больше ничего от теории относительности ему не понадобится; он просто введет в законы Ньютона поправку на изменяемость массы. Из самой формулы очевидно, что рост массы в обычных условиях незначителен.

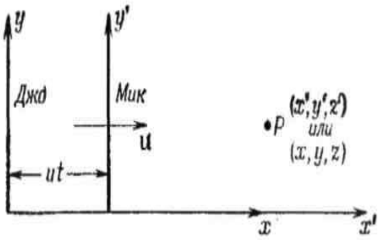
Даже если v — скорость спутника (около 8 *км/сек),* то и при этих условиях $v/c = 3/10^5$; подстановка этой величины в формулу показывает, что поправка к массе составит не более одной двухмиллиардной части самой массы, что, пожалуй, заметить невозможно. На самом деле, правильность формулы подтверждена наблюдением движения разнообразных частиц, скорость которых практически вплотную подходила к скорости света. В обычных условиях рост массы незаметен; тем замечательней, что он сперва был обнаружен теоретически, а уж после открыт на опыте. Хотя для достаточно больших скоростей рост может быть как угодно велик, открыт он был не таким путем. Закон этот в момент своего открытия означал лишь едва заметное изменение в некоторых цифрах. Тем интереснее разобраться, как сочетание физического размышления и физического эксперимента вызвало его к жизни. Вклад в это дело внесло немалое число людей, но конечным итогом их деятельности явилось открытие Эйнштейна.

У Эйнштейна, собственно говоря, есть две теории относительности. Мы будем здесь говорить только о *специальной теории относительности,* ведущей свое начало с 1905 г. В 1915 г. Эйнштейн выдвинул еще одну теорию, называемую *общей теорией относительности.* Она обобщает специальную теорию на случай тяготения; мы не будем ее здесь обсуждать.

Принцип относительности впервые высказал Ньютон в одном из следствий из Законов Движения: «Относительные движения друг по отношению к другу тел, заключенных в каком-либо пространстве, одинаковы, покоится ли это пространство или движется равномерно и прямолинейно без вращения». Это означает, к примеру, что при свободном полете межпланетного корабля с постоянной скоростью все опыты, поставленные на этом корабле, все явления, наблюдаемые на нем, будут таковы, как будто он покоится (конечно, при условии, что наружу из корабля выходить не будут). В этом смысл принципа относительности. Мысль эта — довольно проста; вопрос только в том, *верно ли,* что во всех опытах, производимых внутри движущейся системы, законы физики выглядят такими же, какими они были бы, если бы система стояла на одном месте. Давайте же сначала посмотрим, так ли выглядят законы Ньютона в движущейся системе. Для этого нам снова понадобится помощь наших молодых людей — Мика и Джо.

Пускай Мик отправился вдоль по оси x с постоянной скоростью u и измеряет свое положение в какой-то точке, показанной на фигуре 15.1.

Фиг. 15.1. Две системы координат, находящиеся в равномерном относительном движении вдоль оси x.



Он обозначает «х-расстояние» точки в своей системе координат как x'. Джо стоит на месте и измеряет положение той же точки, обозначая ее x-координату в своей системе через x. Связь между координатами в двух системах ясна из рисунка. За время t начало системы Мика сдвинулось на ut, и если обе системы вначале совпадали, то

$$\begin{aligned} x' &= x - ut, \quad & y' &= y, \\ z' &= z, & t' &= t. \end{aligned} \tag{15.2}$$

Если подставить эти преобразования координат в законы Ньютона, то законы эти превращаются в такие же законы, но в штрихованной системе; это значит, что законы Ньютона имеют одинаковый вид в движущейся и в неподвижной системах; потому-то, проделав любые опыты по механике, и нельзя сказать, движется система или нет.

Принцип относительности применялся в механике уже издавна. Многие, в частности Гюйгенс, пользовались им для вывода законов столкновения биллиардных шаров почти так же, как мы в гл. 10* доказывали сохранение импульса.

В прошлом столетии в результате исследования явлений электричества, магнетизма и света интерес к принципу относительности возрос. Максвелл подытожил в своих уравнениях электромагнитного поля многие тщательные исследования этих явлений. Его уравнения сводят воедино электричество, магнетизм, свет. Однако уравнения Максвелла, по-видимому, *не подчиняются* принципу относительности: если преобразовать их подстановкой (15.2), то *их вид не останется прежним.* Значит, в движущемся межпланетном корабле оптические и электрические явления не такие, как в неподвижном; их можно использовать для определения его скорости, в частности определить и абсолютную скорость корабля, сделав подходящие электрические или оптические измерения. Одно из следствий уравнений Максвелла заключается в том, что если возмущение поля порождает свет, то эти электромагнитные волны распространяются во все стороны одинаково и с одинаковой скоростью $c = 300\,000$ *км/сек*. Другое следствие уравнений: если источник возмущения движется, то испускаемый свет все равно мчится сквозь пространство со скоростью с. Так же бывает и со звуком: скорость звуковых волн тоже не зависит от движения источника.

Преобразование времени

При проверке, согласуется ли идея о сокращении расстояний с фактами, обнаруженными в других опытах, оказывается, что все действительно согласуется, если только считать, что *время тоже преобразуется* и притом так, как это высказано в уравнении (15.3). По этой-то причине время t_3, которое затратит свет на путешествие от *В* к *С* и обратно, оказывается неодинаковым, если его вычисляет человек, делающий этот опыт в движущемся межпланетном корабле, или же неподвижный наблюдатель, который следит со стороны за этим кораблем. Для первого время t_3 равно просто $2L/c$, а для второго оно равно

$2L/c\sqrt{1-u^2/c^2}$ [уравнение (15.5)]. Иными словами, если вы со стороны наблюдаете, как космонавт закуривает папиросу, вам кажется, что он делает это медленнее, нежели обычно, хотя сам он считает, что все происходит в нормальном темпе. Стало быть, не только длины должны сокращаться, но и приборы для измерения времени («часы») должны замедлить свой ход. Иначе говоря, когда часы на космическом корабле отсчитывают, по мнению космонавта, 1 *сек,* то, по мнению стороннего наблюдателя, пройдет $1/\sqrt{1-u^2/c^2}$ *сек*

Замедление хода часов в движущейся системе — явление весьма своеобразное, и его стоит пояснить. Чтобы понять его, давайте проследим, что бывает с часовым механизмом, когда часы движутся. Так как это довольно сложно, то лучше часы выбрать попроще. Пусть это будет стержень (метровой длины) с зеркалами на обоих концах. Если пустить световой сигнал между зеркалами, то он будет без конца бегать туда-сюда, а часы будут тикать каждый раз, как только свет достигнет нижнего конца. Конструкция довольно глупая, но в принципе такие часы возможны. И вот мы изготовим двое таких часов со стержнями равной длины и синхронизуем их ход, пустив их одновременно; ясно, что они всегда будут идти одинаково: ведь длина стержней одна и та же, а скорость света c — тоже. Дадим одни часы космонавту; пусть он возьмет их с собой на межпланетный корабль и поставит их поперек направления движения, тогда длина стержня не изменится. Да, но откуда мы знаем, что поперечная длина не меняется? Наблюдатель может договориться с космонавтом, что на высоте y в тот момент, когда стержни поравняются, каждый сделает другому на его стержне метку. Из симметрии следует, что отметки придутся на те же самые координаты y и y', в противном случае одна метка окажется ниже или выше другой и, сравнив их, можно будет сказать, кто из них двигался на самом деле.

Так что же происходит в движущихся часах? Входя на борт корабля, космонавт убедился, что это вполне приличные стандартные часы и ничего особенного в их поведении на корабле он не заметил. Если бы он что-то заметил, то сразу понял бы, что он движется; если хоть что-то меняется в результате движения, то ясно, что он движется. Принцип же относительности утверждает, что в равномерно движущейся системе это невозможно; стало быть, в часах никаких изменений не произошло. С другой стороны, когда внешний наблюдатель взглянет на пролетающие мимо часы, он увидит, что свет, перебегая от зеркала к зеркалу, на самом деле движется зигзагами, потому что стержень все время перемещается боком. Мы уже анализировали такое зигзагообразное движение в связи с опытом Майкельсона — Морли. Когда за заданное время стержень сдвинется на расстояние, пропорциональное u, то расстояние, пройденное за то же время светом, будет пропорционально c, и поэтому расстояние по вертикали пропорционально $\sqrt{c^2-u^2}$.

Значит, свету понадобится *больше времени,* чтобы пройти движущийся стержень из конца в конец,— больше, чем когда стержень неподвижен. Поэтому кажущийся промежуток времени между тиканьями движущихся часов удлинится в той же пропорции, во сколько гипотенуза треугольника длиннее катета (из-за этого в формуле и появляется корень). Из рисунка также видно, что чем u больше, тем сильнее видимое замедление хода часов. И не только такие часы начнут отставать, но (если только теория относительности правильна!) любые часы, основанные на любом принципе, также должны отстать, причем в том же отношении. За это можно поручиться, не проделывая дальнейшего анализа. Почему?

Чтобы ответить и на этот вопрос, положим, что у нас есть еще двое часов, целиком сходных между собой, скажем, с зубчатками и камнями, или основанных на радиоактивном распаде, или еще каких-нибудь. Опять согласуем их ход с нашими первыми часами. Пусть, пока свет прогуляется до конца и обратно, известив о своем прибытии тиканьем, за это время новая модель завершит свой цикл и тоже возвестит об этом какой-нибудь вспышкой, звонком или любым иным сигналом. Захватим с собой на космический корабль новую модель часов. Может быть, эти часы уже не отстанут, а будут идти так же, как их неподвижный двойник. Ах, нет! Если они разойдутся с первой моделью (которая тоже находится на корабле), то человек сможет использовать этот разнобой между показаниями обоих часов, чтобы определить скорость корабля. А ведь считается, что скорость узнать немыслимо. Смотрите, как ловко! *Нам не нужно ничего знать о механизме работы* новых часов, не нужно знать, что именно *в них* замедляется, мы просто знаем, что, какова бы ни была причина, ход часов будет выглядеть замедленным, и притом в любых часах одинаково.

Что же выходит? Если *все* движущиеся часы замедляют свой ход, если любой способ измерения времени приводит к замедленному темпу течения времени, нам остается только сказать, что *само время,* в определенном смысле, кажется на движущемся корабле замедленным. На корабле все: и пульс космонавта, и быстрота его соображения, и время, потребное для зажигания папиросы, и период возмужания и постарения — все это должно замедлиться в одинаковой степени, ибо иначе можно будет узнать, что корабль движется. Биологи и медики иногда говорят, что у них нет уверенности в том, что раковая опухоль будет в космическом корабле развиваться дольше.

Однако с точки зрения современного физика это случится почти наверняка; в противном случае можно было бы по быстроте развития опухоли судить о скорости корабля!

Очень интересным примером замедления времени при движении снабжают нас мю-мезоны (мюоны) — частицы, которые в среднем через $2{,}2\cdot10^{-6}$ *сек* самопроизвольно распадаются.

Они приходят на Землю с космическими лучами, но могут быть созданы и искусственно в лаборатории. Часть космических мюонов распадается еще на большой высоте, а остальные — только после того, как остановятся в веществе. Ясно, что при таком кратком времени жизни мюон не может пройти больше 600 *м*, даже если он будет двигаться со скоростью света. Но хотя мюоны возникают на верхних границах атмосферы, примерно на высоте 10 *км* и выше, их все-таки обнаруживают в земных лабораториях среди космических лучей. Как это может быть? Ответ состоит в том, что разные мюоны летят с различными скоростями, иногда довольно близкими к скорости света. С их собственной точки зрения они живут всего лишь около 2 *мксек*, с нашей же — их жизненный путь несравненно более долог, достаточно долог, чтобы достигнуть поверхности Земли. Их жизнь удлиняется в $1/\sqrt{1-u^2/c^2}$ раз. Среднее время жизни мюонов разных скоростей было точно измерено, причем полученное значение хорошо согласуется с формулой.

Мы не знаем, почему мезон распадается и каков его внутренний механизм, но зато мы знаем, что его поведение удовлетворяет принципу относительности. Тем и полезен этот принцип — он позволяет делать предсказания даже о тех вещах, о которых другим путем мы мало чего узнаем. К примеру, еще не имея никакого представления о причинах распада мезона, мы все же можем предсказать, что если его скорость составит $^9/_{10}$ скорости света, то кажущаяся продолжительность отведенного ему срока жизни будет равна $2{,}2\cdot 10^{-6}/\sqrt{1-9^2/10^2}$ *сек*. И это предсказание оправдывается. Правда, неплохо?

Лоренцево сокращение

Теперь мы вернемся к преобразованию Лоренца и попытаемся лучше понять связь между системами координат (x, y, z, t) и (x', y', z', t'). Будем называть их системами S и S', или соответственно системами Джо и Мика. Мы уже отметили, что первое уравнение основывается на предположении Лоренца о том, что по направлению x все тела сжимаются. Как же можно доказать, что такое сокращение действительно бывает? Мы уже понимаем, что в опыте Майкельсона — Морли по принципу относительности *поперечное* плечо BC не может сократиться; в то же время нулевой результат опыта требует, чтобы *времена* были равны. Чтобы получился такой результат, приходится допустить, что продольное плечо BE кажется сжатым в отношении $\sqrt{1-u^2/c^2}$.

Что означает это сокращение на языке Джо и Мика? Положим, что Мик, двигаясь с системой S' в направлении x', измеряет метровой линейкой координату x' в некоторой точке. Он прикладывает линейку x' раз и думает, что расстояние равно x' метрам. С точки же зрения Джо (в системе S), линейка у Мика в руках укорочена, а «на самом деле» отмеренное им расстояние равно $x'\sqrt{1-u^2/c^2}$ метров.

Поэтому если система S' удалилась от системы S на расстояние ut, то наблюдатель в системе S должен сказать, что эта точка (в его координатах) удалена от начала на $x=x'\sqrt{1-u^2/c^2}+ut$, или

$$x'=\frac{x-ut}{\sqrt{1-u^2/c^2}}.$$

Это и есть первое уравнение из преобразований Лоренца.

Одновременность

Подобным же образом из-за различия в масштабах времени появляется и знаменатель в уравнении в преобразованиях Лоренца. Самое интересное в этом уравнении — это новый и неожиданный член в числителе, член ux/c^2. В чем его смысл? Внимательно вдумавшись в положение вещей, можно понять, что события, происходящие, но мнению Мика (наблюдателя в системе S'), в разных местах одновременно, с точки зрения Джо (в системе S), вовсе *не* одновременны. Когда одно событие случилось в точке x_1 в момент t_0, а другое -в точке x_2 в тот же момент t_0, то соответствующие моменты t'_1 и t'_2 отличаются на

$$t'_2 - t'_1 = \frac{u(x_1 - x_2)/c^2}{\sqrt{1 - u^2/c^2}}.$$

Это явление можно назвать «нарушением одновременности удаленных событий». Чтобы пояснить его, рассмотрим следующий опыт.

Пусть человек, движущийся в космическом корабле (система S'), установил в двух концах корабля часы. Он хочет знать, одинаково ли они идут. Как синхронизовать ход часов? Это можно сделать по-разному. Вот один из способов, он почти не требует вычислений. Расположимся как раз где-то посредине между часами. Из этой точки пошлем в обе стороны световые сигналы. Они будут двигаться в обоих направлениях с одинаковой скоростью и достигнут обоих часов в одно и то же время. Вот этот-то одновременный приход сигналов и можно применить для согласования хода. Положим, что человек в S' таким способом согласует ход часов. Посмотрим, согласится ли наблюдатель в системе S, что эти часы идут одинаково. Космонавт в системе S' имеет право верить, что их ход одинаков; ведь он не знает, что он движется. Но наблюдатель в системе S сразу рассудит, что раз корабль движется, то часы на носу корабля удалились от светового сигнала и свету пришлось пройти больше половины длины корабля, прежде чем он достиг часов; часы на корме, наоборот, двигались к световому сигналу — значит, его путь сократился. Поэтому сигнал сперва дошел до часов на корме, хотя космонавту в системе S' показалось, что сигналы достигли обоих часов одновременно. Итак, выходит, что когда космонавт считает, что события в двух местах корабля произошли одновременно (при одном и том же значении t' в его системе координат), то в другой системе координат *одинаковым* t' отвечают *разные* значения t!

Парадокс близнецов

Чтобы продолжить наше изучение преобразований Лоренца и релятивистских эффектов, рассмотрим известный «парадокс» — парадокс близнецов, скажем, Петера и Пауля. Подросши, Пауль улетает на космическом корабле с очень высокой скоростью. Петер остается на Земле. Он видит, что Пауль уносится с огромной скоростью, и ему кажется, что часы Пауля замедляют свой ход, сердце Пауля бьется реже, мысли текут ленивее. С точки зрения Петера, все замирает. Сам же Пауль, конечно, ничего этого не замечает. Но когда после долгих странствий он возвратится на Землю, он окажется моложе Петера! Верно ли это? Да, это одно из тех следствий теории относительности, которые легко продемонстрировать. Мю-мезоны живут дольше, если они движутся; так и Пауль проживет дольше, если будет двигаться. «Парадоксом» это явление называют лишь те, кто считает, что принцип относительности утверждает относительность *всякого движения.* Они восклицают: «Хе-хе-хе! А не можем ли мы сказать, что с точки зрения Пауля двигался *Петер* и что именно Петер должен был медленнее стареть? Из симметрии тогда следует единственный возможный вывод: при встрече возраст обоих братьев должен оказаться одинаковым».

Но ведь чтобы встретиться и помериться годами, Пауль должен либо остановиться в конце путешествия и сравнить часы, либо, еще проще, вернуться. А возвратиться может только тот, кто двигался. И он знает о том, что двигался, потому что ему пришлось повернуть, а при повороте на корабле произошло много необычных вещей: заработали ракеты, предметы скатились к одной стенке и т. д. А Петер ничего этого не испытал.

Поэтому можно высказать такое правило: тот, *кто почувствовал ускорение,* кто увидел, как вещи скатывались к стенке, и т. д.,— тот и окажется моложе. Разница между братьями имеет «абсолютный» смысл, и все это вполне правильно. Когда мы обсуждали долгую жизнь движущегося мю-мезона, в качестве примера мы пользовались его прямолинейным движением сквозь атмосферу. Но можно породить мю-мезоны и в лаборатории и заставить с помощью магнита их двигаться по кругу. И даже при таком ускоренном движении они проживут дольше, причем столько же, сколько и при прямолинейном движении с этой скоростью. Можно было бы попытаться разрешить парадокс опытным путем: сравнить покоящийся мю-мезон с закрученным по кругу. Несомненно, окажется, что закрученный мю-мезон проживет дольше. Такого опыта еще никто не ставил, но он PI не нужен, потому что и так все прекрасно согласуется. Конечно, те, кто настаивает на том, что каждый отдельный факт должен быть непосредственно проверен, этим не удовлетворятся. А мы все же уверенно беремся предсказать результат опыта, в котором Пауль кружится по замкнутому кругу.

Преобразование скоростей

Главное отличие принципа относительности Эйнштейна от принципа относительности Ньютона заключается в том, что законы преобразований, связывающих координаты и времена в системах, движущихся относительно друг друга, различны. Правильный закон преобразований (Лоренца) таков:

$$x' = \frac{x - ut}{\sqrt{1 - u^2/c^2}},$$
$$y' = y,$$
$$z' = z,$$
$$t' = \frac{t - ux/c^2}{\sqrt{1 - u^2/c^2}}. \qquad (16.1)$$

Эти уравнения отвечают сравнительно простому случаю, когда наблюдатели движутся относительно друг друга вдоль общей оси x. Конечно, мыслимы и другие направления движения, но самое общее преобразование Лоренца выглядит довольно сложно: в нем перемешаны все четыре числа. Мы и впредь будем пользоваться этой простой формулой, так как она содержит в себе все существенные черты теории относительности.

Рассмотрим теперь дальнейшие следствия этого преобразования. Прежде всего интересно разрешить эти уравнения относительно x, y, z, t. Это система четырех линейных уравнений для четырех неизвестных, и их можно решить — выразить x, y, z, t через x', y', z', t'. Результат этот потому интересен, что он говорит нам, как «покоящаяся» система координат выглядит с точки зрения «движущейся». Ясно, что из-за относительности движения и постоянства скорости тот, кто «движется», может, если пожелает, счесть себя неподвижным, другого — движущимся. А поскольку он движется в обратную сторону, то получит то же преобразование, но с противоположным знаком у скорости. Это в точности то, что дает и прямое решение системы, так что все сходится. Вот если бы не сошлось, было бы от чего встревожиться!

$$\begin{aligned} x &= \frac{x'+ut'}{\sqrt{1-u^2/c^2}}, \\ y &= y', \\ z &= z', \\ t &= \frac{t'+ux'/c^2}{\sqrt{1-u^2/c^2}}. \end{aligned} \tag{16.2}$$

Теперь займемся интересным вопросом о сложении скоростей в теории относительности. Напомним, что первоначально загадка состояла в том, что свет проходит 300 000 *км/сек* во всех системах, даже если они движутся друг относительно друга. Это — частный случай более общей задачи. Приведем пример. Пусть предмет внутри космического корабля движется вперед со скоростью 200 000 *км/сек;* скорость самого корабля тоже 200 000 *км/сек.* С какой скоростью перемещается предмет с точки зрения внешнего наблюдателя? Хочется сказать: 400 000 *км/сек,* но эта цифра уж больно подозрительна: получается скорость большая, чем скорость света! Разве можно себе это представить?

Общая постановка задачи такова. Пусть скорость тела внутри корабля равна v (с точки зрения наблюдателя на корабле), а сам корабль имеет скорость u по отношению к Земле. Мы желаем знать, с какой скоростью v_x это тело движется с точки зрения земного наблюдателя. Впрочем, это тоже не самый общий случай, потому что движение происходит в направлени x. Могут быть формулы для преобразования скоростей в направлении y или в любом другом; если они будут нужны, их всегда можно вывести. Внутри корабля скорость тела равна $v_{x'}$. Это значит, что перемещение x' равно скорости, умноженной на время:

$$x' = v_{x'} t'. \tag{16.3}$$

Остается только подсчитать, какие у тела значения x и t с точки зрения внешнего наблюдателя, если x' и t' связаны соотношением (16.3). Подставим (16.3) в (16.2) и получим

$$x = \frac{v_{x'} t' + ut'}{\sqrt{1 - u^2/c^2}}.$$

(16.4)

Но здесь x выражено через t'. А скорость с точки зрения внешнего наблюдателя — это «его» *расстояние,* деленное на *него» время,* а *не на время другого наблюдателя!* Значит, надо и время подсчитать с его позиций:

$$t = \frac{t' + u(v_{x'} t')/c^2}{\sqrt{1 - u^2/c^2}}.$$

(16.5)

А теперь разделим x на t. Квадратные корни сократятся, останется же

Это и есть искомый закон: суммарная скорость не равна сумме скоростей

$$v_x = \frac{x}{t} = \frac{u + v_{x'}}{1 + uv_{x'}/c^2}.$$

(16.6)

(это привело бы ко всяким несообразностям), но «подправлена» знаменателем $1 + uv/c^2$.

Что же теперь будет получаться? Пусть ваша скорость внутри корабля равна половине скорости света, а скорость корабля тоже равна половине скорости света. Значит, и u равно $\frac{1}{2}c$, и v равно $\frac{1}{2}c$, но в знаменателе uv равно $^1/_4$, так что

$$v = \frac{\frac{1}{2}c + \frac{1}{2}c}{1 + {^1/_4}} = \frac{4c}{5}.$$

Выходит по теории относительности, что $^1/_2$ и $^1/_2$ дают не 1, а $^4/_5$ Небольшие скорости, конечно, можно складывать, как обычно, потому что, пока скорости по сравнению со скоростью света малы, о знаменателе $(1 + uv/c^2)$ можно забыть, но на больших скоростях положение меняется.

Возьмем предельный случай. Положим, что человек на борту корабля наблюдает, как распространяется *свет.* Тогда $v = c$ Что обнаружит земной наблюдатель? Ответ будет такой:

$$v = \frac{u + c}{1 + uc/c^2} = c\frac{u + c}{u + c} = c.$$

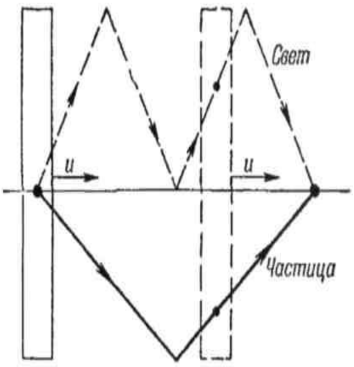
Значит, если что-то движется со скоростью света внутри корабля, то, с точки зрения стороннего наблюдателя, скорость не изменится, она попрежнему будет равна скорости света! Это именно то, ради чего в первую очередь предназначал Эйнштейн свою теорию относительности.

Конечно, бывает, что движение тела не совпадает по направлению с равномерным движением корабля. Например, тело движется «вверх» со скоростью $v_{y'}$ по отношению к кораблю, а корабль движется «горизонтально». Проделывая такие же манипуляции (только x надо заменить на y), получаем:

$$y = y' = v_{y'} t',$$

так что при $v_{x'}=0$

$$v_y=\frac{y}{t}=v_{y'}\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}. \tag{16.7}$$



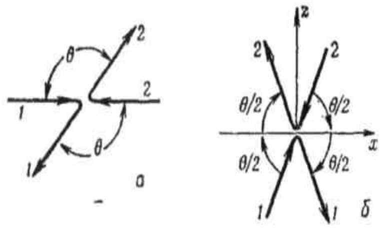
Фиг. 16.1. Траектории светового луча и частицы внутри движущихся часов.

Итак, боковая скорость тела уже не $v_{y'}$, а $v_{y'}\sqrt{1-u^2/c^2}$. Этот результат мы получили, пользуясь формулами преобразований. Но он вытекает и прямо из принципа относительности по следующей причине (всегда бывает полезно докопаться до первоначальной причины). Мы уже раньше рассуждали о том, как могут работать движущиеся часы; свет кажется распространяющимся наискось со скоростью с в неподвижной системе, в то время как в движущейся системе он просто движется вертикально с той же скоростью. Мы нашли, что *вертикальная компонента* скорости в неподвижной системе меньше скорости света на множитель $\sqrt{1-u^2/c^2}$.

Пусть теперь материальная частица движется в тех же «часах» взад-вперед со скоростью, равной $1/n$ скорости света (фиг. 16.1). Пока частица пройдет туда и обратно, свет пройдет этот путь ровно n раз *(n* — целое число). Значит, каждое тиканье «часов с частицей» совпадет с n-м тиканьем «световых часов». *Этот факт должен остаться верным и тогда, когда тело движется*, потому что физическое явление совпадения остается совпадением в любой системе. Ну а поскольку скорость c_y меньше скорости света, то скорость v_y частицы должна быть меньше соответствующей скорости в том же отношении (с квадратным корнем)! Вот почему в любой вертикальной скорости появляется корень.

Релятивистская масса

Из предыдущей главы мы усвоили, что масса тела растет с увеличением его скорости. Но никаких доказательств этого, похожих на те рассуждения с часами, которыми мы обосновали замедление времени, мы не привели. Сейчас, однако, мы можем доказать, что (как следствие принципа относительности и прочих разумных соображений) масса должна изменяться именно таким образом. (Мы должны говорить о «прочих соображениях» по той причине, что нельзя ничего доказать, нельзя надеяться на осмысленные выводы, не опираясь на какие-то законы, которые предполагаются верными.) Чтобы не изучать



Фиг. 16.2. Упругое столкновение одинаковых тел, движущихся с равными скоростями в противоположных направлениях, при различном выборе систем координат.

законы преобразования силы, обратимся к *столкновениям* частиц. Здесь нам не понадобится закон действия силы, а хватит только предположения о сохранении энергии и импульса. Кроме того, мы предположим, что импульс движущейся частицы — это вектор, всегда направленный по ее движению. Но мы не будем считать импульс *пропорциональным* скорости, как это делал Ньютон. Для нас он будет просто некоторой *функцией* скорости. Мы будем писать вектор импульса в виде вектора скорости, умноженного на некоторый коэффициент

$$\mathbf{p} = m_v \mathbf{v}. \tag{16.8}$$

Индекс v у коэффициента будет напоминать нам, что это функция скорости v. Будем называть этот коэффициент «массой». Ясно, что при небольших скоростях это как раз та самая масса, которую мы привыкли измерять. Теперь, исходя из того принципа, что законы физики во всех системах координат одинаковы, попробуем показать, что формула для m_v должна иметь вид $m_0/\sqrt{1-v^2/c^2}$.

Пусть у нас есть две частицы (к примеру, два протона), которые между собой совершенно одинаковы и движутся навстречу друг другу с одинаковыми скоростями. Их общий импульс равен нулю. Что с ними случится? После столкновения их направления движения должны все равно остаться противоположными, потому что если это не так, то их суммарный вектор импульса будет отличен от нуля, т. е. не сохранится. Раз частицы одинаковы, то и скорости их должны быть одинаковы; более того, они просто должны остаться прежними, иначе энергия при столкновении изменится. Значит, схема такого упругого обратимого столкновения будет выглядеть, как на фиг. 16.2, *а*: все стрелки одинаковы, все скорости равны. Предположим, что такие столкновения всегда можно подготовить, что в них допустимы любые углы θ и что начальные скорости частиц могут быть любыми. Далее, напомним, что одно и то же столкновение выглядит по-разному, смотря по тому, как повернуты оси. Для удобства мы так повернем оси, чтобы горизонталь делила пополам угол между направлениями частиц до и после столкновения (фиг. 16.2,*б*). Это то же столкновение, что и на фиг. 16.2,*а*, но с повернутыми осями.

Теперь начинается самое главное: взглянем на это столкновение с позиций наблюдателя, движущегося на автомашине со скоростью, совпадающей с горизонтальной компонентой скорости одной из частиц. Как оно будет выглядеть?

Наблюдателю покажется, что частица *1* поднимается прямо вверх (горизонтальная компонента у нее пропала), а после столкновения падает прямо вниз по той же причине (фиг. 16,3, *а).* Зато частица *2* движется совсем иначе, она проносится мимо с колоссальной скоростью и под малым углом (но этот угол и до и после столкновения *одинаков).* Обозначим горизонтальную компоненту скорости частицы *2* через u, а вертикальную скорость частицы *1* — через w .

Чему же равна вертикальная скорость $u\operatorname{tg}\alpha$ частицы 2?

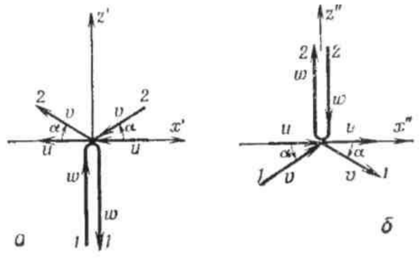
Зная это, можно получить правильное выражение для импульса, пользуясь сохранением импульса в вертикальном направлении. (Сохранение горизонтальной компоненты импульса и так обеспечено: у обеих частиц до и после столкновения эта компонента одинакова, а у частицы *1* она вообще равна нулю. Так что следует требовать только сохранения вертикальной скорости $u\operatorname{tg}\alpha$.) Но вертикальную скорость *можно* получить, просто взглянув на это столкновение с другой точки зрения! Посмотрите на столкновение, изображенное на фиг. 16.3, *а* из автомашины, которая движется теперь налево со скоростью u. Вы увидите то же столкновение, но перевернутое «вверх ногами» (фиг. 16.3, б). Теперь уже частица *2* упадет и подскочит со скоростью w, а горизонтальную скорость u приобретет частица *1*. Вы уже, конечно, догадываетесь, чему равна горизонтальная скорость $u\operatorname{tg}\alpha$; она равна $w\sqrt{1-u^2/c^2}$ [см. уравнение (16.7)].

Кроме того, нам известно, что изменение вертикального импульса вертикально движущейся частицы равно

$$\Delta p = 2m_w w$$

(двойка здесь потому, что движение вверх перешло в движение вниз). У частицы, движущейся косо, скорость равна v, ее

компоненты равны u и $w\sqrt{1-u^2/c^2}$, а масса ее m_v. Изменение *вертикального* импульса этой частицы $\Delta p' = 2m_v w\sqrt{1-u^2/c^2}$, так как в соответствии с нашим предположением (16.8) любая компонента импульса равна произведению одноименной компоненты скорости на массу, отвечающую этой скорости.



Фиг. 16.3. Еще две картины того же столкновения (видимые из движущихся автомашин).

Но суммарный импульс равен нулю. Значит, и вертикальные импульсы должны взаимно сократиться, отношение же массы, движущейся со скоростью *w*, к массе, движущейся со скоростью v , должно оказаться равным

$$\frac{m_w}{m_v} = \sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}. \qquad (16.9)$$

Перейдем к предельному случаю, когда w стремится к нулю. При очень малых w величины v и u практически совпадут, $m_w \to m_0$, а $m_v \to m_u$. Окончательный результат таков:

$$m_u = \frac{m_0}{\sqrt{1-u^2/c^2}}. \qquad (16.10)$$

Проделайте теперь такое интересное упражнение: проверьте, будет ли выполнено условие (16.9) при произвольных w, когда масса подчиняется формуле (16.10). При этом скорость v, стоящую в уравнении (16.9), можно найти из прямоугольного треугольника

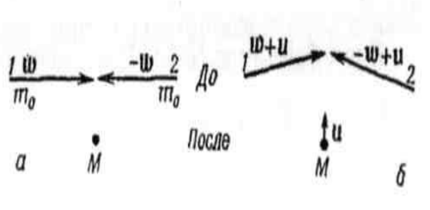
$$v^2 = u^2 + w^2\left(1-\frac{u^2}{c^2}\right).$$

Вы увидите, что (16.9) выполняется тождественно, хотя выше нам понадобился только предел этого равенства при $w \to 0$.

Теперь перейдем к дальнейшим следствиям, считая уже, что, согласно (16.10), масса зависит от скорости. Рассмотрим так называемое *неупругое столкновение.* Для простоты предположим, что из двух одинаковых тел, сталкивающихся с равными скоростями ш, образуется новое тело, которое больше не распадается (фиг. 16.4,*а).* Массы тел до столкновения равны, как мы знаем, $m_0/\sqrt{1-w^2/c^2}$. Предположив сохраняемость импульса и приняв принцип относительности, можно продемонстрировать интересное свойство массы вновь образованного тела. Представим себе бесконечно малую скорость u, поперечную к скоростям w (можно было бы работать и с конечной скоростью u, но с бесконечно малым значением *и* легче во всем разобраться), и посмотрим на это столкновение, двигаясь в лифте со скоростью $-u$. Перед нами окажется картина, изображенная на фиг. 16.4, *а.* Составное тело обладает неизвестной массой *М.* У тела *1,* как и у тела £, есть компонента скорости u, направленная вверх, и горизонтальная компонента, практически равная w. После столкновения остается масса *М,* движущаяся вверх со скоростью u, много меньшей и скорости света и скорости w. Импульс должен остаться прежним; посмотрим поэтому, каким он был до столкновения и каким стал потом. До столкновения он был равен $p \approx 2m_w u$, а потом стал $p' = M_u u$ Но M_u из-за малости u, по существу, совпадает с M_0. Благодаря сохранению импульса

$$M_0 = 2m_w. \qquad (16.11)$$

Фиг. 16.4. Две картины неупругого соударения тел равной массы.



Итак, *масса тела, образуемого при столкновении двух одинаковых тел, равна их удвоенной массе.* Вы, правда, можете сказать: «Ну и что ж, это просто сохранение массы». Но не торопитесь восклицать: «Ну и что ж!», потому что *сами-то массы тел были больше, чем когда тела неподвижны.* Они вносят в суммарную массу *M* не массу покоя, а *больше.* Не правда ли, поразительно! Оказывается, сохранение импульса в столкновении двух тел требует, чтобы образуемая ими масса была больше их масс покоя, хотя после столкновения эти тела сами придут в состояние покоя!

Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М.
Фейнмановские лекции по физике. Т.3. – М., 1976.

КВАНТОВОЕ ПОВЕДЕНИЕ

Атомная механика

В последних нескольких главах мы с вамп рассмотрели многие существенные понятия, без которых невозможно разобраться ни в явлении света, ни вообще в электромагнитном излучении. (Некоторые специальные вопросы — теорию показателя преломления плотного вещества и полное внутреннее отражение — мы отложим до будущих времен.) Мы имели дело с так называемой «классической теорией» электромагнитных воли, и для множества явлений она давала достаточно точное описание природы. И нас не очень заботило при этом, что световая энергия всегда доставляется порциями — «фотонами».

Очередной темой, которой мы собираемся заняться, является проблема поведения сравнительно крупных массивов вещества — их механических или, скажем, их тепловых свойств. Знакомясь с этими свойствами, мы увидим, что старая классическая теория здесь немедленно терпит неудачу, терпит по той причине, что вещество на самом деле состоит из частиц атомных размеров. И если все же мы намерены пользоваться старой теорией, то только потому, что это единственное, в чем мы можем разобраться с помощью изученной нами классической механики. Но наши успехи не будут велики. Мы обнаружим, что в отличие от теории света теория вещества на этом пути довольно быстро наталкивается на затруднения. Можно было бы, конечно, обойти все атомные эффекты стороной. Но вместо этого мы решили здесь вклинить небольшой экскурс в основные идеи квантовых свойств вещества, в квантовые представления атомной физики. Надо же, чтоб вы хоть примерно представляли, как выглядит то, что мы обходим. Все равно ведь атомные эффекты до того важны, что нам не миновать познакомиться с ними вплотную.

Стало быть, сейчас мы перейдем к *введению* в предмет квантовой механики. Но по-настоящему проникнуть в суть предмета вы сможете лишь намного позже.

Квантовая механика — это описание поведения мельчайших долек вещества, в частности всего происходящего в атомных масштабах. Поведение тела очень малого размера не похоже ни на что, с чем вы повседневно сталкиваетесь. Эти тела не ведут себя ни как волны, ни как частицы, ни как облака, или биллиардные шары, или грузы, подвешенные на пружинах,— словом, они не похожи ни на что из того, что вам хоть когда-нибудь приходилось видеть.

Ньютон считал, что свет состоит из частиц. А потом оказалось, как мы уже убедились, что свет ведет себя подобно волнам. Позже, однако (в начале XX века), обнаружили, что, действительно, поведение света временами напоминает частицу. Об электроне же, наоборот, сначала думали, что он похож на частицу, а потом было выяснено, что во многих отношениях он ведет себя как волна. Значит, на самом деле его поведение ни на что не похоже. И мы сдались. Мы так и говорим: «Он *ни на что* не похож».

Однако, к счастью, есть еще одна лазейка: дело в том, что электроны ведут себя в точности подобно свету. Квантовое поведение всех атомных объектов (электронов, протонов, нейтронов, фотонов и т. д.) одинаково: всех их можно назвать «частицами-волнами» (годится, впрочем, и любое другое название). Значит, все, что вы узнаете про свойства электронов (а именно они будут служить нам примером), все это будет применимо к любым «частицам», включая фотоны света.

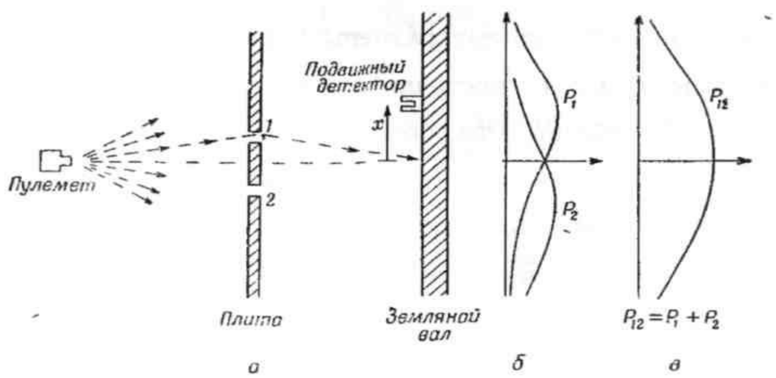
В течение первой четверти нашего века постепенно накапливалась информация о поведении атомов и других мельчайших частиц, и знакомство с этим поведением вело ко все большему замешательству среди физиков. В 1926 — 1927 гг. оно было устранено работами Шредингера, Гейзенберга и Борна. Им удалось в конце концов получить непротиворечивое описание поведения вещества атомных размеров. Основные характерные черты этого описания мы и разберем в данной главе.

Раз поведение атомов так не похоже на наш обыденный опыт, то к нему очень трудно привыкнуть. И новичку в науке, и опытному физику — всем оно кажется своеобразным и туманным. Даже большие ученые не понимают его настолько, как им хотелось *бы,* и это совершенно естественно, потому что весь непосредственный опыт человека, вся его интуиция — все прилагается к крупным телам. Мы знаем, что будет с большим предметом; но именно так мельчайшие тельца и не поступают. Поэтому, изучая их, приходится прибегать к различного рода абстракциям, напрягать воображение и не пытаться связывать их с нашим непосредственным опытом.

В этой главе мы сразу же попробуем ухватить самый основной элемент таинственного поведения в самой странной его форме. Мы выбрали для анализа такое явление, которое невозможно, *совершенно, абсолютно* невозможно объяснить классическим образом. В этом явлении таится самая суть квантовой механики. Но на самом деле в нем прячется только *одна-единственная* тайна. Мы не можем раскрыть ее в том смысле, что не можем «объяснить», как она работает. Мы просто *расскажем* вам, как она работает. Рассказывая об этом, мы познакомим вас с основными особенностями всей квантовой механики.

Опыт с пулеметной стрельбой

Пытаясь понять квантовое поведение электронов, мы сопоставим его с привычными нам движениями обычных частиц, похожих на пулю, и обычных волн, похожих на волны на воде. Сперва мы займемся стрельбой из устройства, схематически показанного на фиг. 37.1. Это пулемет, выпускающий целый сноп пуль. Он не очень хорош, этот пулемет. При стрельбе его пули рассеиваются на довольно широкий угол, как это изображено на рисунке. Перед пулеметом стоит плита (броневая), а в ней есть две дыры, через которые пуля свободно проходит. За плитой расположен земляной вал, который «поглощает» попавшие в него пули. Перед валом стоит предмет, который мы назовем «детектором». Им может служить, скажем, ящик с песком. Любая пуля, попав в детектор, застревает в нем. Если нужно, ящик открывают и все попавшие внутрь пули пересчитывают. Детектор можно передвигать взад и вперед (в направлении x). Этот прибор позволяет экспериментально ответить на вопрос: «Какова вероятность того, что пуля, проникшая сквозь плиту, попадет в вал на расстоянии x от середины?» Заметьте, что мы говорим только о вероятности, потому что невозможно сказать определенно, куда попадет очередная пуля. Пуля, даже попавшая в дыру, может срикошетить от ее края и уйти вообще неизвестно куда. Под «вероятностью» мы понимаем шанс попасть пулей в детектор, который установлен в x метрах от середины. Этот шанс можно измерить, подсчитав, сколько пуль попало в детектор за определенное время, а затем разделив это число на *полное* число пуль, попавших в вал за то же время. Или, полагая, что скорость стрельбы была одинакова, можно считать вероятность пропорциональной числу пуль, попавших в детектор за условленное время.



Фиг. 37.1. Опыт со стрельбой из пулемета.

Для наших целой надо вообразить немного идеализированный опыт, когда пули не дают осколков и остаются целыми. Тогда мы обнаружим, что пули всегда попадают в детектор порциями: если уж мы что-то нащупали в детекторе, то это всегда целая пуля, а не половина и не четвертушка. Даже когда скорость стрельбы становится очень малой, все равно в детекторе за определенное время либо ничего не накапливается либо обнаруживается целое — непременно целое — число пуль. Стало быть, размер порции не зависит от скорости стрельбы. Мы говорим поэтому: «Пули *всегда* приходят равными порциями». С помощью нашего детектора мы измеряем как раз вероятность прихода очередных порций как функцию x. Результат таких измерений (мы, правда, пока еще не провели такого эксперимента и сейчас просто воображаем, каким будет результат) изображен на графике фиг. 37.1*, в.* Вероятность в нем отложена вправо, а x — по вертикали, согласуясь с движением детектора. Вероятность обозначена P_{12}, чтобы подчеркнуть, что пули могли проходить сквозь отверстие 1 и сквозь отверстие 2. Вы, конечно, не удивитесь, что вероятность P_{12} близ середины графика велика, а по краям мала. Вас может, однако, смутить, почему наибольшее значение P_{12} оказалось при $x = 0$. Это легко понять, если один раз проделать опыт, заткнув дырку 2, а другой раз — дырку 1. В первом случае пули смогут проникать лишь сквозь дырку 1 и получится кривая P_1 (см. фиг. 37.1, *б*). Здесь, как и следовало ожидать, максимум P_1 приходится на то *x*, которое лежит по прямой от пулемета через дырку 1. А если заткнуть дырку 1, то получится симметричная кривая P_2 — распределение вероятностей для пуль, проскочивших сквозь отверстие 2. Сравнив части *б* и *в* на фиг. 37.1, мы получаем важный результат

$$P_{12} = P_1 + P_2, \tag{37.1}$$

т. е. вероятности просто складываются. Действие двух дырок складывается из действий каждой дырки в отдельности. Этот результат наблюдений мы назовем *отсутствием интерференции* по причине, о которой вы узнаете после. На этом мы покончим с пулями.

Они приходят порциями, и вероятность их попадания складывается без интерференции.

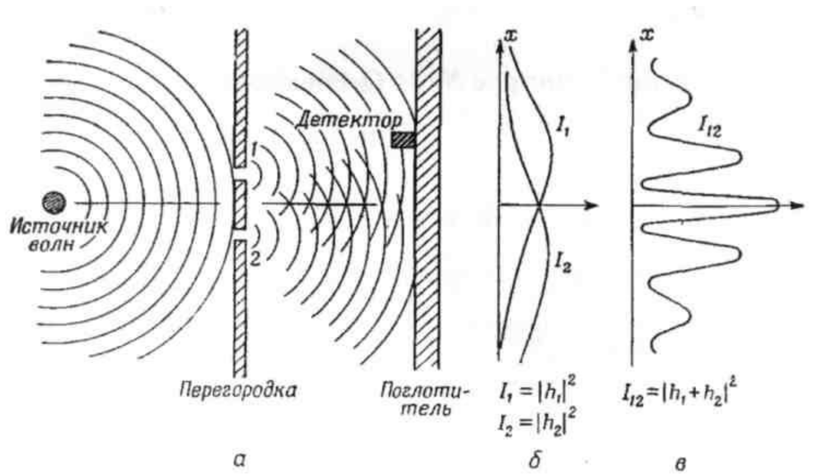
Опыт с волнами

Теперь проведем опыт с волнами на воде. Прибор показан схематически на фиг. 37.2. Это мелкое корытце, полное воды. Предмет, обозначенный как «источник волн», колеблясь при помощи моторчика вверх и вниз, вызывает круговые волны. Справа от источника опять стоит перегородка с двумя отверстиями, а дальше — вторая стенка, которая для простоты сделана поглощающей (чтобы волны не отражались): насыпана песчаная отмель. Перед отмелью помещается детектор; *его* опять, как и раньше, можно передвигать по оси *x*. Теперь детектор — это устройство, измеряющее «интенсивность» волнового движения. Представьте себе приспособление, измеряющее высоту волн. Если его шкалу откалибровать пропорционально *квадрату* высоты, то отсчеты шкалы смогут давать интенсивность волны. Детектор, таким образом, будет определять *энергию,* переносимую волной, или, точнее, долю энергии, доставляемую детектору.

Первое, в чем можно убедиться при помощи такого волнового аппарата,— это что интенсивность может быть *любой величины.* Когда источник движется еле-еле, то и детектор показывает тоже чуть заметное движение. Если же движение возрастет, то и в детекторе интенсивность подскочит. Интенсивность волны может быть какой угодно. Мы уже *не скажем,* что в интенсивности есть какая-то «порционность».

Заставим теперь волновой источник работать стабильно, а сами начнем измерять интенсивность волн при различных значениях *x*. Мы получим интересную кривую (кривая I_{12} на фиг. 37.2*, в),*

Но мы уже видели, откуда могут возникать такие картинки,— это было тогда, когда мы изучали интерференцию электрических волн. И здесь можно видеть, как первоначальная волна дифрагирует на отверстиях, как от каждой щели расходятся круги волн. Если на время одну щель прикрыть и измерить распределение интенсивности у поглотителя, то кривые выйдут довольно простыми (см. фиг. 37.2, *б*).



Фиг. 37.2. Опыт с волнами на воде.

Кривая I_1 — это интенсивность волн от щели 1 (когда ее измеряли, щель 2 была закрыта), а кривая I_2 — интенсивность волн от щели 2 (при закрытой щели 1).

Мы видим со всей определенностью, что интенсивность I_{12}, наблюдаемая, когда оба отверстия открыты, *не равна* сумме интенсивностей I_1 и I_2. Мы говорим, что здесь происходит «интерференция», наложение двух волн. В некоторых местах (где на кривой I_{12} наблюдается максимум) волны оказываются «в фазе», пики волн складываются вместе, давая большую амплитуду и тем самым большую интенсивность. В этих местах говорят о «конструктивной интерференции». Она наблюдается в тех местах, расстояние которых от одной из щелей на целое число длин волн больше (или меньше) расстояния от другой.

А в тех местах, куда две волны приходят со сдвигом фаз π (т. е. находятся «в противофазе»), движение волн представляет собой разность двух амплитуд. Волны «интерферируют деструктивно», интенсивность получается маленькой. Это бывает там, где расстояние от щели 1 до детектора отличается от расстояния между детектором и щелью 2 на нечетное число полуволн. Малые значения I_{12} на фиг. 37.2 отвечают местам» где две волны интерферируют деструктивно.

Вспомните теперь, что количественную связь между I_1, I_2 и I_{12} можно выразить следующим образом: мгновенная высота волны в детекторе от щели 1 может быть представлена в виде (действительной части) $\hat{h}_1 e^{i\omega t}$, где «амплитуда» $\hat{h}_1$, вообще говоря, комплексное число. Интенсивность пропорциональна среднему квадрату высоты, или, пользуясь комплексными числами, $|\hat{h}_1|^2$. Высота волн от щели 2 тоже равна $\hat{h}_2 e^{i\omega t}$, а интенсивность пропорциональна $|\hat{h}^2|^2$. Когда обе щели открыты, высоты волн складываются, давая высоту $(\hat{h}_1 + \hat{h}_2)e^{i\omega t}$ и интенсивность $|\hat{h}_1 + \hat{h}_2|^2$. Множитель пропорциональности нас сейчас не интересует, так что формулу для *интерферирующих* волн можно записать в виде

$$I_1=|\hat{h}_1|^2,\qquad I_2=|\hat{h}^2|^2,\qquad I_{12}=|\hat{h}_1+\hat{h}_2|^2.$$

Вы видите, что ничего похожего на то, что было с пулями, не получается. Раскрыв $|\hat{h}_1+\hat{h}_2|^2$, мы напишем

$$|\hat{h}_1+\hat{h}_2|^2=|\hat{h}_1|^2+|\hat{h}_2|^2+2|\hat{h}_1||\hat{h}_2|\cos\delta, \quad (37.3),$$

где δ — разность фаз. Вводя интенсивности из (37.2), можем написать

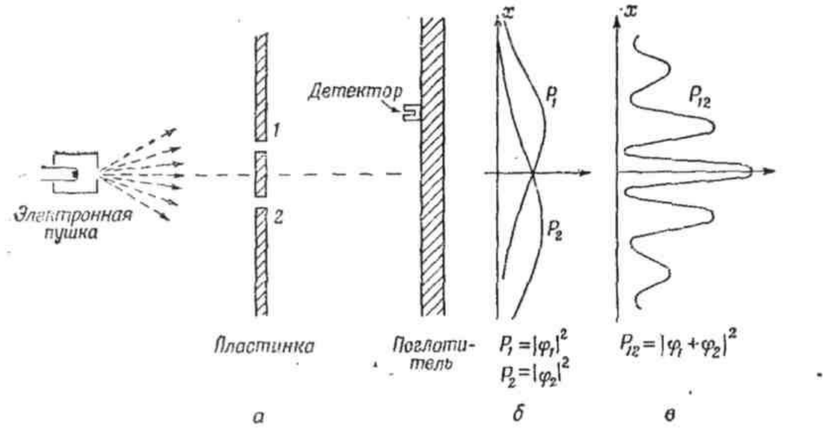
$$I_{12}=I_1+I_2+2\sqrt{I_1I_2}\cos\delta.$$

Последний член и есть «интерференционный член».

На этом мы покончим с волнами. *Интенсивность их может быть любой, между ними возникает интерференция.*

Опыт с электронами

Представим себе теперь такой же опыт с электронами. Схема его изображена на фиг. 37.3. Мы поставим электронную пушку, которая состоит из вольфрамовой проволочки, нагреваемой током и помещенной в металлическую коробку с отверстием. Если на проволочку подано отрицательное напряжение, а на коробку — положительное, то электроны, испущенные проволокой, будут разгоняться стенками и некоторые из них проскочат сквозь отверстие. Все электроны, которые выскочат из пушки, будут обладать (примерно) одинаковой энергией. А перед пушкой мы поставим снова стенку (на этот раз тонкую металлическую пластинку) с двумя дырочками. За стенкой стоит другая пластинка, она служит «земляным валом», поглотителем. Перед нею — подвижный детектор, скажем, счетчик Гейгера, а еще лучше — электронный умножитель, к которому подсоединен динамик.



Фиг. 37.3. Опыт с электронами.

Заранее предупреждаем вас: не пытайтесь проделать этот опыт (в отличие от первых двух, которые вы, быть может, уже проделали). Этот опыт никогда никто так не ставил. Все дело в том, что для получения интересующих нас эффектов прибор должен быть чересчур миниатюрным. Мы с вами ставим сейчас «мысленный эксперимент», отличающийся от других тем, что его легко обдумать. Что *должно* в нем получиться, известно заранее, потому что уже проделано множество опытов на приборах, размеры и пропорции которых были подобраны так, чтобы стал заметен тот эффект, который мы сейчас опишем.

Первое, что мы замечаем в нашем опыте с электронами, это резкие «щелк», «щелк», доносящиеся из детектора (вернее, из динамика). Все «щелк» одинаковы. *Никаких* «полущелков».

Мы замечаем также, что они следуют совершенно не регулярно. Скажем, так: щелк, щелк-щелк... щелк, щелк .... щелк-щелк, щелк ... и т. д. Кому случалось видеть счетчик Гейгера, знает, как он щелкает. Если подсчитать, сколько раз динамик щелкнул за достаточно длительное время (скажем, за несколько минут), а потом снова подсчитать, сколько он отщелкал за другой такой же промежуток времени, то оба числа будут почти одинаковыми. Можно поэтому говорить о *средней частоте,* с которой слышатся щелчки (столько-то «щелк» в минуту в среднем).

Когда мы переставляем детектор, *частота* щелчков то растет, то падает, но величина (громкость) каждого «щелк» всегда остается одной и той же. Если мы охладим проволоку в пушке, частота щелчков спадет, но каждый «щелк» будет звучать, как прежде. Поставим у поглотителя два отдельных детектора; тогда мы сразу заметим, что щелкает *то* один из них, *то* другой, но никогда оба вместе. (Разве что иногда наше ухо не разделит двух щелчков, последовавших очень быстро один за другим.) Мы заключаем поэтому, что все, что попадает в детектор, приходит туда «порциями». Все «порции» одной величины; в детектор (или поглотитель) попадает только целая «порция»; в каждый момент в поглотитель попадает только одна порция. Мы говорим: «Электроны всегда приходят одинаковыми порциями».

Как и в опыте со стрельбой из пулемета, мы попытаемся теперь поискать в новом опыте ответ на вопрос: «Какова относительная вероятность того, что электронная «порция» попадет в поглотитель на разных расстояниях x от середины?» Как и в том опыте, мы получим относительную вероятность, подсчитывая частоту щелчков при стабильно работающей пушке. Вероятность, что порции окажутся на определенном расстоянии x, пропорциональна средней частоте щелчков при этом x. В результате нашего опыта получена интереснейшая кривая P_{12} , изображенная на фиг. 37.3, *в*. Да! Именно так и ведут себя электроны!

Интерференция электронных волн

Попытаемся проанализировать кривую на фиг. 37.3 и посмотрим, сможем ли мы понять поведение электронов. Первое, что хочется отметить, это что раз они приходят порциями, то каждая из порций (ее тоже естественно именовать электроном) проходит либо сквозь отверстие 1, либо сквозь отверстие 2. Мы зафиксируем это в виде «Утверждения».

Утверждение А: Каждый электрон проходит *либо* сквозь отверстие 1, *либо* сквозь отверстие 2.

Если это предположить, то все электроны, достигшие поглотителя, можно разбить на два класса: 1) проникшие сквозь отверстие 1; 2) проникшие сквозь отверстие 2. Значит, полученная кривая — это сумма эффектов от электронов, прошедших сквозь отверстие 1, и электронов, прошедших сквозь отверстие 2. Давайте проверим это соображение экспериментально. Сначала проведем измерения с электронами, которые пройдут сквозь отверстие 1. Закроем отверстие 2 и подсчитаем щелчки в детекторе. Из частоты щелчков мы получим значение P_1 Результат измерений показан на кривой P_1 фиг. 37.3, б. Выглядит это вполне разумно. Точно таким же образом измерим P_2 — распределение вероятностей для электронов, прошедших сквозь отверстие 2. Оно тоже показано на рисунке.

Кривая P_{12}, полученная, когда *оба* отверстия открыты, явным образом не совпадает с суммой $P_1 + P_2$ (суммой вероятностей при только одном работающем отверстии). По аналогии с нашим опытом с волнами на воде мы скажем: «Здесь есть интерференция»:

Для электронов: $P_{12} \neq P_1 + P_2$. (37.5)

Откуда же могла появиться интерференция? Может, надо сказать так: «То, что порции проходят либо сквозь отверстие 1, либо сквозь отверстие 2,— это, по-видимому, *неверно,* ведь если бы это было так, то складывались бы вероятности. Должно быть, их движение сложней. Они разбиваются пополам и...» Да нет же! Это невозможно, они ведь всегда приходят целыми порциями... «Ну ладно, тогда, может, кое-кто из них, пройдя сквозь отверстие 1, заворачивает в 2, а после опять в 1, и так несколько раз, или еще как-то бродит по обоим отверстиям.

Составитель
Павлов Александр Юрьевич

ХРЕСТОМАТИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ «КОНЦЕПЦИИ СОВРЕМЕННОГО ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ»

Учебное пособие для студентов очной, заочной, заочной сокращенной форм обучения направлений 050100.62 «Педагогическое образование», 080200.62 «Менеджмент», 080100.62 «Экономика»

Часть 4

Редактор Е.Ф.Изотова

Подписано к печати 19.06.12. Формат 60×84 1/16.
Усл.п.л. 1,88. Тираж 160 экз. Заказ 121082. Рег. № 167.

Отпечатано в РИО Рубцовского индустриального института
658207, Рубцовск, ул. Тракторная, 2/6.