

В. И. РЫДНИК

**Что
такое**

вантовая

Механика

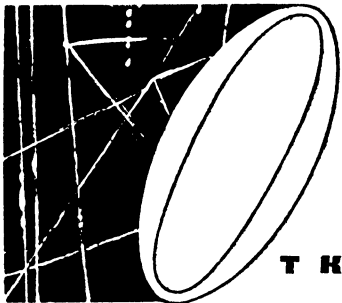
На пороге двадцатого столетия физика проникла в удивительный мир невидимого и неслышимого — мир атомов, атомных ядер и элементарных частиц. На пороге нашего века возникла и теория, которая уже шестьдесят с лишним лет служит физикам путеводителем, — квантовая механика.

Ландшафты нового мира резко отличаются от очертаний мира, привычного нам. Настолько резко, что физикам порой «не хватает слов» для их описания. Квантовая механика была вынуждена создавать новые представления о сверхмалых вещах — представления на первый взгляд странные, «непредставимые» воочию.

В новом мире часто перестают действовать привычные нам законы. Частицы теряют свои размеры, приобретают свойства волн, волны в свою очередь начинают походить на частицы. Электроны и другие кирпичики вещества могут проникать сквозь непреступные барьеры, могут вообще исчезать, оставляя на своем месте фотоны.

Эти поразительные явления блестяще объяснила квантовая механика. Ее возникновению и развитию посвящена эта книга. В ней рассказывается об основных представлениях квантовой механики, о том, как новая теория разгадала секреты строения атомов, молекул, кристаллов, атомных ядер, о том, как квантовая механика пытается решить вопрос о самом фундаментальном свойстве материи — о взаимодействии частиц, о взаимоотношениях вещества и поля.

Книга рассчитана на широкий круг читателей, интересующихся успехами современной физики.



Т классической механики — к квантовой механике

Вместо введения

Атомная энергия. Радиоактивные изотопы. Полупроводники. Элементарные частицы. Квантовые генераторы. Эти слова сегодня известны каждому. Но самому старшему из них едва четверть века. Их вызвала к жизни физика двадцатого столетия.

В наше время человеческое знание развивается с фантастической быстротой. И с каждым его крупным достижением взорам людей открываются новые миры.

Старые науки словно обретают вторую молодость. Буквально на наших глазах стремительно вырвалась вперед физика и заняла передний край наступления на неизвестное. Она ведет это наступление все более широким фронтом, со все возрастающим натиском, замедляя свое движение лишь затем, чтобы подтянуть силы для нового решительного броска вперед.

Сильное оружие нужно физике, чтобы раскрывать тайны природы. И физика выковала такое оружие. В ее арсенале — мощная артиллерия точных и убедительных экспериментов. В штабах ее — сотни и тысячи теоретиков, планирующих пути, по которым ведется наступление, тщательно изучающих трофеи, добытые в экспериментах. Это наступление физика ведет не вслепую. Она освещает поле боя с неизвестным прожекторами могучих физических теорий. И наиболее сильные прожекторы современной физики — теория относительности и квантовая механика.

Квантовая механика — ровесница нашего бурного, стремительного века. Ровесница буквальная: историки науки отсчитывают возраст квантовой механики начиная от 17 декабря 1900 года. В этот день немецкий ученый-

физик Макс Планк сделал на заседании Физического общества Берлинской академии наук сообщение о своей попытке преодолеть одно из затруднений теории излучения.

В науке затруднения возникают на каждом шагу. И каждый день ученые пытаются преодолевать их. Но попытка, сделанная Планком, имела особое значение: она предопределила развитие физики на многие годы вперед.

Из семени нового представления о вещах, которое высказал Планк, на сегодняшний день вымахало во весь гигантский рост дерево нового знания. Из этого семени родились такие поразительные открытия, которые было не под силу предугадать самым проницательным писателям-фантастам. Из представлений Планка возникла квантовая механика, которая открыла взорам людей совершенно новый мир. О нем дотоле люди смутно догадывались и еще более смутно представляли его себе. Это—мир сверхмалых вещей: атомов, атомных ядер и элементарных частиц.

Контуры нового мира

Неужели люди не знали ничего о существовании мира атомов до двадцатого века? Нет, знали, а лучше сказать, догадывались.

Пытливому человеческому уму свойственно размышлять и о таких вещах, которые ему неведомы, предугадывать то, что облечется в плоть и кровь лишь многие столетия спустя.

В древнейшие времена, еще задолго до того, как первые путешественники двинулись по торным дорогам нашего мира, человек догадывался, что есть и люди, и звери, и земля за пределами того узенького мирка, в котором протекала его жизнь.

И еще задолго до того, как человек начал познавать мир сверхмалых вещей, он догадывался о его существовании. Для поисков нового мира не надо было отправляться в далекие путешествия. Он был под руками, вокруг людей, во всех вещах.

Древних мыслителей занимал вопрос, как удалось природе из чего-то, казалось бы, совершенно бесформенного создать окружающий нас мир и населить его великим разнообразием вещей. А может быть, природа поступает как строитель, который возводит большие дома из маленьких кирпичей? И каковы эти кирпичи?

Огромные горы, разрушаясь под действием воды, ветра, таинственных вулканических сил, превращаются в каменные глыбы. Камни со временем дробятся в гальку. Проходят сотни и тысячи лет — и уже нет гальки: от нее остаются лишь песок и мелкая пыль.

Есть ли предел дроблению вещества? Есть ли такие предельно мелкие тельца, которые уже сама природа не может раздробить? Да, есть, учили

древние философы Эпикур, Демокрит и некоторые другие. Название их — «атомы» — отражает главное их свойство: невозможность дальнейшего дробления. Ведь «атом» по-гречески и означает «неделимый».

А как выглядят атомы? Этот вопрос оставался в те времена без вразумительного ответа. Может быть, атомы выглядят как твердые непроницаемые шарики, а может быть, совсем по-другому. Сколько разновидностей их? Может быть, тысячи, а может быть, одна. Некоторые философы (например, греческий философ Анаксимандр) считали, что скорее всего четыре. Они полагали, что весь мир состоит из четырех главных «стихий» — воды, воздуха, земли и огня, и эти стихии в свою очередь состоят из атомов.

С таким багажом сведений далеко не продвинешься, может сказать наш современник.

Он будет и прав, и неправ. Первые шаги науки — это скорее движение вширь, а не вглубь. Сколько вещей окружает человека! И сначала надо разобраться в том, как связаны эти вещи друг с другом. А уже потом заняться вопросом, как они устроены.

Мысль о существовании атомов для того времени, когда наука еще лежала в пеленках, была, конечно, гениальной догадкой. Но все же только догадкой, не вытекающей ни из каких наблюдений, не подтверждающейся никакими опытами.

Потом об атомах надолго забыли.

О них вспомнили, а правильное сказать, их снова «придумали» лишь в начале девятнадцатого века. Причем не физики, а химики.

Начало девятнадцатого века — время, интересное и для историка вообще, и для историка науки. Под гром наполеоновских пушек перекраивались не только границы европейских государств. В тиши лабораторий, столь немногочисленных в то время, решительно перекраивались и представления о природе вещей. Представления, которые дотоле казались совершенно невыблемуемыми.

Юнг в Англии, Френель во Франции создавали основы волновой теории света. Абель в Норвегии и Галуа во Франции клали первые камни в могучее здание современной алгебры. Француз Лавуазье и англичанин Дальтон показали своими работами, что химия способна на чудеса. Химики, физики, математики того времени делали немало выдающихся открытий, подготовивших бурный расцвет точных наук во второй половине девятнадцатого века.

Малоизвестный английский ученый Пргут в 1815 году высказал предположение о существовании мельчайших частиц, которые еще могут, не разрушаясь и не воссоздаваясь, принимать участие в самых различных химических реакциях, — предположение об атомах.

И в те же годы весьма известный французский ученый Лагранж придал законченную и изящную форму классической механике, в которой, как впоследствии выяснилось, не оказалось места для атомов.

Храм классической механики

В науке ничто не появляется на пустом месте.

Квантовую механику можно с полным основанием назвать детищем классической механики, которая сама берет «официальное» начало от Ньютона.

Правда, приписывать заслугу создания классической механики одному Ньютону не совсем справедливо. Много великих умов эпохи Возрождения занимались теми вопросами, которые потом вошли в качестве костяка в классическую механику: итальянец Леонардо да Винчи, Галилео Галилей, англичанин Симон Стевин, француз Блез Паскаль. Из всех разрозненных исследований движения тел Ньютон создал единую стройную теорию.

Известна и «официальная» дата рождения классической механики. Это 1687 год, когда в Лондоне вышла ньютоновская книга «Математические начала натуральной философии». В те времена естественные науки еще называли философией.

В своей книге Ньютон впервые сформулировал три основных положения классической механики, которые впоследствии получили название трех законов Ньютона. Сегодня они известны каждому школьнику.

Здание механики Ньютона гораздо обширнее этих трех «парадных входов». Постройка его в основном закончена уже давно. Сегодня, на высотах современной науки, мы можем обозреть его с «птичьего полета».

...В огромном пустом пространстве, заселенном множеством разнообразных предметов — от гигантских звезд до крохотных пылинок, — некогда не было движения. Весь мир пребывал в нерушимом покое.

Затем господь бог, очнувшись от изумления при виде своего творения, дал первый «толчок», вдохнул в мир жизнь. После этого обязанности бога, собственно говоря, можно было считать исчерпанными.

Будучи приведены в движение божественной десницей, все тела в мире в дальнейшем стали двигаться и взаимодействовать друг с другом по определенным законам. Законов этих много, но все их можно в конце концов свести к нескольким основным. В их числе — три закона Ньютона.

С этой минуты в мире нет и не может быть никаких случайностей. Все предопределено заранее. Никакой произвол невозможен. Мировая симфония разыгрывается как по нотам, и в мировом оркестре испокон веку царит полнейшая гармония.

Еще более чем столетие спустя после Ньютона эта сверхупорядоченность мира в ньютоновской механике доставляла высшее удовлетворение физикам. Они приобретали успокоение лишь тогда, когда еще какой-то не познанный до того кусочек мира удавалось втиснуть в рамки этой теории. И природа до некоторого времени покорно позволяла укладывать себя в прокрустово ложе.

Это долго длиться не могло. Ученые убедились в том, что нет ничего

менее прочного, чем застывшие догмы. С абсолютной неизбежностью появлялись факты, которые уже не удавалось втиснуть в предназначенные им рамки.

В конце девятнадцатого века разразился кризис ньютоновской механики. Постепенно стало ясно, что этот кризис означает ниспровержение всеобщей предопределенности в мире, называемой научно принципом механического детерминизма. Все в мире оказалось не так просто и не на веки задано.

Квантовая механика принесла не только познание нового мира. Она совершенно по-новому осмыслила явления в нем. Впервые в науку на полных правах была допущена случайность.

И, может быть, не вина физиков, что они растерялись при встрече с этой неожиданной гостьей. Рушилась только придуманная ими же извечная предопределенность. Физикам же показалось, что рушится вообще всякая определенность, что в мире царит абсолютная анархия, что вещи не подчиняются никаким точным законам.

Немало времени прошло, пока физика вышла из этого глубокого кризиса.

Храм рушится

Кошку погубило любопытство...

Пожалуй, эта поговорка приложима к любой теории. Даже если на сей день эта теория кажется совершенно правильной и все объясняющей.

На определенном этапе развития науки, когда ею изучен некоторый круг явлений, рождается теория. Она предназначена для объяснения этих явлений с одной точки зрения.

Но та же теория оказывается недостаточной и даже попросту неверной, когда открываются новые факты, никак не желающие укладываться в тесные для них рамки старой теории.

Классическая механика была вполне удовлетворительна, пока физика была только механикой. Но уже девятнадцатый век стал свидетелем бурного вторжения физики в огромный круг новых явлений. Быстро начали развиваться ее отрасли, изучающие тепловые процессы — термодинамика, световые явления — оптика, электрические и магнитные явления — электродинамика. Одно время в физике все обстояло более или менее благополучно. Все вновь открываемые явления спокойно укладывались в предназначенные им рамки.

Однако по мере того как строилось здание классической физики, по его грандиозному фасаду все чаще пробегали зловещие трещины. Здание явно трещало под обстрелом новых фактов.

Одним из таких серьезных фактов явилось удивительное постоянство

скорости света. Самые тщательные, самые пристрастные опыты показали, что свет ведет себя в корне отлично от того, что наблюдалось во всех других известных к тому времени явлениях.

Чтобы уложить поведение света в рамки классической физики, пришлось придумать некую среду — эфир, обладающую совершенно фантастическими свойствами, с точки зрения самой же классической физики. Об эфире мы еще будем говорить подробнее. Но эфир не мог спасти и, действительно, не спас старую физику.

Другим камнем преткновения для классической физики оказалось тепловое излучение нагретых тел.

И, наконец, самой зияющей пропастью, в которую предстояло заглянуть классической физике в последние годы ее безраздельного царствования, было открытие радиоактивности. В таинственных процессах радиоактивности рушились не только атомные ядра. Рушились коренные, казавшиеся совершенно очевидными с точки зрения здравого смысла положения старой физики. И сквозь трещины в ее здании бурно проросли семена новых теорий — теории относительности и теории квантов.

0 названии новой теории

Так на пороге двадцатого века родилась квантовая механика.

Прежде всего, почему ее так называют? В сущности, это название очень слабо отражает содержание тех вещей, которыми занимается новая физика.

Надо сказать, что расплывчатости в терминах не избежала, пожалуй, ни одна область физики. Причин тут много, и в первую очередь причин исторического характера.

Для примера достаточно упомянуть о невероятном разнообразии «сил». Большинство из них не имеет решительно никакого отношения к силе в ее собственном смысле. Тут и лошадиная сила (а это не сила, но мощность!), тут и «живая сила» (а это кинетическая энергия), тут и сила тока, и сила света, и многие другие «силы».

Физика постепенно избавляется от них. Но все же этот процесс идет очень медленно.

Так случилось и с названием «квантовая механика». Во-первых, почему механика? Ничего механического в новой теории нет и, более того, как мы увидим, вообще быть не может. Единственное оправдание в том, что слово «механика» используется здесь в общем смысле. В том, в каком мы говорим, например: «у этих часов хороший механизм» или «государственный механизм», обозначая этим словом устройство или принцип работы. Круг понятий квантовой механики лучше подходит под широкое определение самой физики.

Во-вторых, почему квантовая? «Квант» по-латыни означает «порция», «количество». Новая наука, как мы увидим далее, действительно имеет одним из своих основных положений утверждение о «порционности» свойств окружающего нас мира. Правда, лучше говорить не о порционности, а о прерывности этих свойств. С другой стороны, как мы узнаём, эта прерывность далеко не всеобща, встречается не всюду и не всегда.

А кроме того, она есть только одна из сторон медали. Ничуть не менее своеобразной стороной является двойственность свойств материи. Она заключается в том, что в одном и том же предмете извечно соединены свойства частиц и свойства волн.

Усовершенствованное название новой науки — волновая механика. Но и здесь отражена только «половинка» ее содержания, а где же упоминание о квантах?

Итак, ни одно из наименований новой физической теории не является удовлетворительным. Неужели нельзя придумать чего-либо более соответствующего ее содержанию?

Придумывать названия в науке — дело, однако, хлопотное и неблагодарное. Новые названия входят в обиход науки медленно, а меняются — и того медленнее. Физикам ясен новый смысл, который вкладывается в эти слова. Нам же предстоит с ним познакомиться.

Физики в роли модельеров

Легко ли представить себе движение шарика на веревке, которую вы крутите рукой? Конечно, легко.

Смешным даже кажется говорить здесь о каком-то представлении. Движение шарика можно увидеть собственными глазами. Классическая физика и родилась из наблюдений над непосредственно окружающими нас предметами и происходящими с ними явлениями.

Вы бросаете шарик на гладкий горизонтальный стол. Он продолжает двигаться и после того, как прекратилось действие руки на него, то есть окончилось действие силы. Из этого и подобных ему наблюдений был установлен закон инерции, который потом был введен Ньютоном в качестве первого основного закона в его механику.

Шарик не придет в движение, пока его не толкнуть рукой, не ударить по нему другим шариком. Движение шарика по гладкому столу и пребывание его в покое имеют то общее, что в обоих случаях на шарик в это время не действуют никакие силы.

При вращении же шарика на веревке на него все время действует какая-то сила, сводящая его с прямолинейного пути, который присущ свободному движению. Тот же шарик, неподвижно лежавший на столе, под действием силы руки выходит из покоя, приобретает скорость, и тем боль-

шую, чем больше действующая на него сила. Из этого наблюдения рождается второй закон Ньютона.

Но вот исследователь — кстати говоря, тот же Ньютон — выходит из рамок повседневности. Он обращает свой взор к небесам и ищет разгадку «гармонии небесных сфер», над которой бились еще древние философы. Что заставляет планеты двигаться вокруг Солнца так, а не иначе?

Само слово «гармония» говорит об упорядоченности, о действии некоего закона, регулирующего движение небесных тел. О «сферах», конечно, нет и речи. Но вот закон, по которому планеты, в том числе и наша Земля, вращаются вокруг Солнца, а спутники — вокруг своих планет, — этот закон, несомненно, должен существовать.

И тут ученому на память, возможно, приходит шарик, вращающийся на веревке. Движение планет вокруг Солнца действительно похоже на равномерное вращение шарика, только разве что совершается куда медленнее, да и никакой веревки, конечно, нет. Значит, если в одном случае действует сила, то разумно считать, что она действует и в другом.

Непосредственно ощутить действие силы, управляющей движением планеты, конечно, невозможно: это не веревка в руке! Но эта сила есть. И Ньютон открывает ее. Мы знаем, что это — сила взаимного притяжения тел. Гениальная прозорливость Ньютона позволила ему найти общее между движением шарика и вращением планет.

Но для нашего рассказа важно другое. Шарик на веревке — это, пожалуй, одна из первых физических моделей. Понимание такого грандиозного явления природы, как движение планет, приходит через изучение куда меньшего по масштабам явления. И, конечно, при смелом предположении, что оба явления подчиняются сходным законам.

Можно ли так поступать всегда и везде? Правомерно ли переносить законы одного явления на другое, неизмеримо более крупное или мелкое по своим масштабам?

Такой вопрос, если и задавался во времена Ньютона, получал вполне «житейский» ответ. Раз наблюдение подтверждает картину протекания крупного явления, вычисленного заранее на основе маленького, или наоборот, — то все правильно.

Примерно такой же ответ можно часто услышать и в наши дни. Правда, понимается он по-другому. Ньютон считал, что, во-первых, Вселенная едина и, во-вторых, законы, управляющие ее жизнью и в привычном нам, и в большом мире звезд и планет, одинаковы.

С первым мы сегодня, с высот современной науки, соглашаемся вполне.

Со вторым же... Ну, конечно же, нельзя делать вывод, что из одинакового внешнего вида явлений обязательно следует одинаковый вид их внутренних пружин.

Попугай повторяет слова человека. Но было бы слишком наивным полагать, что попугай, когда произносит слова, тоже думает!

Вся сложность познания и состоит в том, что в иерархии миров вещей — сверхмалый, обычный, сверхбольшой — действуют совершенно разные законы, и распространять законы обычного мира вещей на миры других масштабов можно лишь в очень ограниченной степени.

Непониманием этого важного заключения и объясняются сетования многих из тех физиков, которые столкнулись с упомянутым уже непокорством малых вещей. Убедившись в том, что микроскопические частицы отказываются укладываться в рамки обычных понятий, эти физики стали кричать об анархии, отсутствии законов в природе. Разумеется, как мы увидим, ничего подобного нет.

Модельные представления сыграли и продолжают играть огромную роль в развитии естественных наук. С помощью моделей, построенных руками человека или, чаще, существующих только в его голове, поскольку их невозможно осуществить, были сделаны величайшие открытия.

Шарик на веревке — это очень простая модель. Со временем модели, которыми пользовались физики, становились все сложнее, все необычнее. Но сколь бы ни были эти модели необычными, они все же имеют одно общее свойство. Они как бы составлены из элементов обычного, окружающего нас мира, видимого глазами и ощущаемого руками.

Такова особенность человеческого ума. Самые невероятные его абстракции, обобщения всегда исходят из реальной почвы, хотя и могут «воспарить», уйти от этих вещей так далеко, что начинают казаться фантазией.

Не всему можно придумать модель!

С конца девятнадцатого века старый модельный подход к исследованию новых явлений природы стал давать одну осечку за другой. Так случилось, например, с моделью эфира. По замыслу его создателей он должен был сыграть роль спасательного пояса для «тонущей» классической физики, которая никак не могла объяснить удивительное постоянство скорости света.

Как должен выглядеть эфир? Абсолютно твердое и вместе с тем абсолютно прозрачное тело. Это чем-то напоминает небьющееся стекло. Однако, несмотря на его твердость, в эфире могут совершенно беспрепятственно двигаться любые тела. И более того, они могут увлекать за собой эфир в этом движении, создавая эфирный «ветер». Причем этот ветер куда нежнее того «ночного зефира», который струил «эфир» в известном стихотворении Пушкина!

Физики в течение нескольких лет пытались как-то понять столь фантастические свойства эфира. Увы, сделать этого так и не удалось. Эфир действительно оказался совершенной выдумкой, не имеющей никаких корней в реальной действительности.

И так случилось не только с представлением об эфире. Никакие модели классической физики для атомов не могли объяснить таинственное выделение энергии ураном, радием и другими химическими элементами — выделение, идущее бесперебойно подчас многие тысячи и миллионы лет без всякого подвода энергии со стороны.

Еще один удар по старым модельным представлениям нанесла гипотеза фотонов Эйнштейна, о которой мы вскоре будем говорить подробно. Конечно, сложновато, но все же можно вжиться в классическую модель, представляющую свет как электромагнитные волны, распространяющиеся по всем направлениям от их источника.

Мы привыкли к тому, что волна — это есть всегда какое-то движение вещественной среды. Например, такой средой является вода для морских волн, воздух — для звуковых волн. А вот электромагнитные волны могут распространяться в абсолютной пустоте!

В этом смысле проще попытаться вообразить свет, как это делал Ньютон, в виде потоков мельчайших световых частиц. Эти частицы испускаются раскаленными телами, летят во все стороны, а попадая в глаз, раздражают зрительные нервы и вызывают ощущение света. Здесь мы уже можем без труда представить, как эти частицы летят сквозь пустоту.

Но вот представить себе свет, имеющий одновременно свойства и волн, и частиц, как утверждает Эйнштейн, — это при всем желании нам не удастся.

В первой модели атома, созданной Бором и Резерфордом, можно все же усмотреть некоторую наглядность. Маленькие частички — электроны вращаются по определенным орбитам вокруг столь же крошечного ядра. Размеры этих орбит в десятки тысяч раз больше размеров электронов и ядер.

При некотором усилии воображения можно представить себе такую «пустотелую» конструкцию атома. Ведь мы сами живем в планетной системе, где размеры «электронов» — планет — в тысячи раз меньше размеров их орбит вокруг «ядра» — Солнца.

Однако уже спустя несколько лет эту картину совершенно «запутал» де Бройль. Он высказал мысль, что электроны, ядра и вообще все вещественные «кирпичи» нашего мира имеют ту же двойственность, что и введенные Эйнштейном фотоны, что они также обладают одновременно свойствами и волн, и частиц. В результате, как ранее частицы света, так теперь частицы вещества, в том числе и атомы, потеряли всякую наглядность.

Мир, который не пощупать и не увидеть

Физикам стало трудно работать. Раньше они протапывали тропки в новый мир, заранее зная, что этот мир отличается от привычного им только в деталях, но не в своей сущности. Теперь же они оказались в положении древних путешественников, со страхом пускавшихся в дальнюю

дорогу и ожидавших ужасных встреч с чудовищными полузверями, полуплюдьми. Ведь фантазия о неведомом не знает пределов!

Физикам приходилось даже хуже, чем этим путешественникам. Открывая новые края, путешественники всегда были приятно разочарованы. Там оказывались такие же люди, как они сами, такие же земля, горы, моря. Разве только все это было «скомпановано» по-иному. Физики же в новом мире все более определенно видели таких «чудищ», что и названия им не придумаешь. Да что там названия! И представить себе было даже трудно всю необычность нового мира атомов!

Но выработать эти представления, какими бы необычными они ни были, требовала развивающаяся наука. Трудно было создавать квантовую механику, но надо было.

Спору нет, куда легче создавать теории, имея перед собой наглядные модели по образцу окружающего мира. Но если мир сверхмалых вещей устроен так, что не может быть описан никакими подобными моделями? Опустить руки и сдаться?

Нет! Невозможно придумать наглядные модели, — значит, придется работать с не наглядными. Прошло немного лет — и эти модели в самом деле стали настолько «ненаглядны», настолько дороги физикам, что те теперь, пожалуй, ни за что от них не откажутся. А жаль! Забегая вперед, скажем, что, видимо, спустя какое-то время от многих из этих моделей придется отказаться, заменив их еще более необычными, еще более трудными для понимания. Ничего не поделаешь: таков закон развития науки!

В том и заключается величайший подвиг физиков нашего века, что они смогли пробраться к цели в дебрях абстракций, в мире моделей, которые не имеют даже отдаленного сходства с привычными нам вещами, что они смогли создать стройную теорию нового мира сверхмалых вещей. Более того, физики смогли на основе этой теории добиться наиболее выдающегося достижения во всей истории человечества. Они открыли секрет освобождения могучего джина — внутриядерной энергии — из той бутылочки, где он обитал в течение веков, не привлекая ничьего внимания.

Да, атомная энергетика и электроника были бы безусловно невозможны без существования квантовой механики.

Трудно — но интересно!

Необычность, ненаглядность представлений квантовой механики делали трудным ее понимание. В этих трудностях, правда, частью «виновата» и сама квантовая механика. Дело не только в том, что ее охват непрерывно расширяется, методы ее непрерывно совершенствуются, а писать о развивающейся, да еще столь бурно, теории труднее, чем об уже установившихся теориях. Дело еще и в том, что среди физиков и по сей день не утихают

жаркие споры о самом смысле квантовой механики, о том, какие стороны мира сверхмалых вещей описываются ею.

Человечество встало на порог космической эры. Обучение людей «правилам поведения» в космосе требует от них отличного знания физики. Физика же космического пространства резко отличается от «земной» физики именно тем, что в ней на первый план самым решительным образом выдвигается мир сверхмалых вещей.

В космосе находит широчайшее подтверждение древняя мысль, что великое и малое сходятся. Огромные звезды и крошечные атомы не только сходятся, но и существуют как единое целое.

Трудно, а то и вовсе невозможно популярно писать о науке без наглядных представлений. Поэтому, рассказывая о квантовой механике, мы все же будем пользоваться если и не моделями, то аналогиями с явлениями в привычном нам мире. Но глубокого или сколько-нибудь точного смысла эти аналогии не имеют. Они лишь облегчают понимание.

Например, как мы убедимся, слова «электрон вращается вокруг атомного ядра» в сущности имеют не больше смысла, чем для жителя тропиков слова «снег—это что-то белое, вроде соли, и сыплется с неба». Движение электрона в атоме, да и сама сущность электрона неизмеримо сложнее того, что мы представляем себе и знаем о них сегодня. И не только сегодня, но и завтра, и тысячу лет спустя!

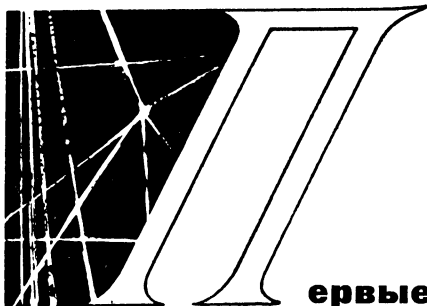
И действительно, развитие квантовой механики подтверждает мысль о неограниченном разнообразии, о настоящей неисчерпаемости свойств электрона. Да разве только одного электрона!

Мы сегодня еще не очень хорошо знаем непосредственно окружающую нас природу. Мы только начинаем по-настоящему проникать в земную кору, океан, атмосферу, только начинаем понимать жизнь полей, лесов, гор, рек, пустынь.

Можно ли требовать такого же знания о куда более трудном для наблюдения мире атомов, атомных ядер и элементарных частиц! Здесь науке хватит напряженнейшей работы на многие сотни и тысячи лет. А пока мы находимся лишь у истоков этой могучей реки знания.

Но зато какие поразительные явления развертываются перед взорами исследователей этого недавно открытого мира! Какие вдохновляющие, поистине фантастические перспективы открывает новая наука для техники, промышленности, сельского хозяйства, медицины!

Атомные электростанции, радиоактивные изотопы, солнечные батареи... Канун освобождения термоядерной энергии в мирных целях и решительного вторжения в космос... Все эти величайшие свершения светлого настоящего и ослепительного будущего родились в наш век из небольшого зернышка, брошенного шестьдесят лет назад в плодородную ниву научного знания Максом Планком и заботливо возвращенного целой плеядой выдающихся ученых.



ервые шаги новой теории

Тепло и свет

Хорошо в зимний вечер посидеть у топящейся печки. Потрескивают дрова, чуть тянет дымком...

А почему, собственно говоря, тепло около печки? Горячая печка дает знать о себе уже за несколько метров. Для этого даже не нужно видеть ее топку, которая так уютно освещает комнату трепетным светом.

Печка испускает, кроме света, какие-то невидимые лучи, которые и создают ощущение тепла. Эти лучи называются тепловыми, или инфракрасными.

Осмотревшись, нетрудно убедиться в том, что тепловое излучение весьма широко распространено в природе. Излучают тепло и свет маленькая свеча, и большой костер, и огромное Солнце. Даже страшно далекие звезды посылают тепловые лучи на Землю.

Если нагретый предмет светится, то он обязательно испускает и тепловые лучи. Излучение света и тепла — процесс единый. Поэтому ученые назвали тепловым все излучение тел, возникающее при их нагревании, — и световое, и собственно тепловое.

Физики еще в прошлом веке подметили основные закономерности теплового излучения. Для вас эти закономерности не в новинку. Напомним две из них.

Во-первых, чем сильнее нагрет предмет, тем ярче он светится. Количество испускаемого им в каждую секунду излучения очень резко меняется с изменением температуры тела. Если повысить температуру предмета всего лишь втрое, то излучение будет интенсивнее почти в сто раз!

Во-вторых, по мере повышения температуры тела меняется цвет его свечения. Посмотрите на кусок железной трубы, по которому бьет пламя паяльной лампы. Сначала он совершенно темный, но вот появляется слабое малиновое свечение, оно переходит в красное, затем в оранжевое, желтое. И, наконец, нагретый кусок трубы начинает испускать белый свет.

Опытный сталевар на глазок по цвету свечения довольно точно определит температуру раскаленной трубы. Он скажет, что слабый малиновый свет соответствует температуре около 500 градусов по Цельсию, желтый — уже около 800 градусов, а яркий белый — за 1000 градусов.

Физиков же не удовлетворяет лишь качественное описание явления, на глазок, им подавай точные цифры. Запись в журнале «день был холодный» говорит физику столь же мало, как любому из вас фраза «у человека было большое лицо». Вам хотелось бы, чтобы были описаны своеобразные черты этого лица — и нос, и губы, и лоб.

Физики встречались со значительным разнообразием тел и условий, в которых тела испускают тепловое излучение. Но это разнообразие условий их вовсе не устраивало. Им нужно было некоторое «стандартное» тело, на котором легче было бы устанавливать законы излучения нагретых тел. Тогда излучение света другими телами они рассматривали бы как отклонения от этого «стандарта». Вам, конечно, покажется странным такое описание: «Нос у человека был длиннее стандартного, лоб — уже, подбородок — более вытянут, глаза — зеленее обычного, но размерами меньше нормы». Физик же таким описанием остался бы только доволен. И вот почему.

Чернее черного

Попробуйте подобрать несколько предметов по возможности совершенно одинакового цвета. Разложите их перед собой и попытайтесь установить, будут ли чем-нибудь они отличаться по окраске.

Приглядевшись, вы сможете заметить отличия. Одни из предметов будут иметь какую-то бледноватую окраску, другие, напротив, цвет глубокий и насыщенный.

Это отличие связано с тем, сколько падающего на него света предмет поглощает, а сколько отражает. Соотношения между этими двумя «сколько» могут меняться в широчайших пределах. Вот два крайних случая: блестящая поверхность металла и кусок черного бархата. Металл отражает почти весь падающий на него свет, а бархат почти весь этот свет поглощает и почти ничего не отражает.

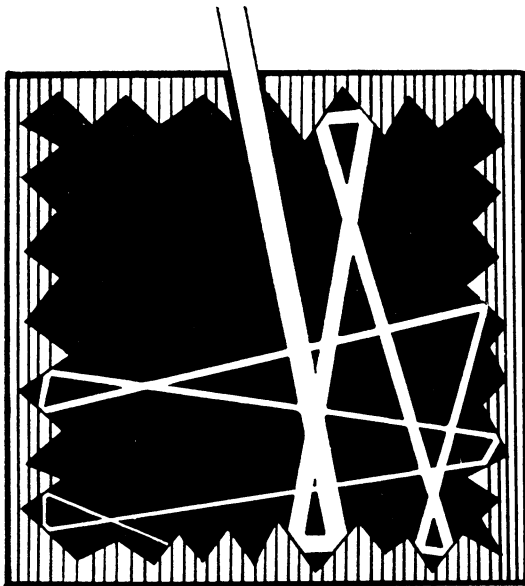
Фокусники очень ценят это свойство бархата. Ведь если предмет почти не отражает света, то он практически невидим. Ящик на сцене, обитый черным бархатом, совершенно не заметен на черном фоне, и с помощью его можно проделывать самые поразительные трюки с внезапным появлением и исчезновением платков, голубей и даже самого фокусника.

Для физиков это свойство черных тел тоже оказалось очень ценным. В поисках упоминавшегося стандартного тела они решили остановиться именно на черном теле. Ведь оно поглощает наибольшее количество излучения и, значит, нагревается этим излучением до наибольшей, среди прочих тел, температуры.

И наоборот: когда черное тело, будучи нагрето до высокой температуры, само становится источником света, то оно при данной температуре нагрева излучает сильнее всех других тел. С помощью такого излучателя наиболее удобно устанавливать количественные законы теплового излучения.

Однако оказалось, что и сами черные тела испускают излучение по-разному. В самом деле, скажем, сажа бывает то чернее, то светлее черного бархата, в зависимости от топлива, из которого она получена. Да и сам бархат бывает разный. Эти различия не очень велики, но хотелось бы избавиться и от них.

Тогда физики додумались до «самого черного» тела. Им оказался... ящик. Ящик, понятно, особенный, предназначенный для особого багажа — теплового излучения. И конструкцию он должен иметь своеобразную: ребристую, с внутренними стенками, покрытыми, например, сажей. Посмотрите на рисунок: луч света, проникший в ящик через малюсенькую дырочку в его стенке, никогда уже не выпорхнет наружу. Он пойман навеки. Физик скажет, что такой ящик поглощает всю проникающую в него уличную энергию.



А теперь сделаем сам ящик источником света, для чего, собственно, ящик и предназначен. При достаточном нагреве стенки ящика раскалятся, и он начнет испускать видимый свет. При заданной температуре тепловое и световое излучение такого ящика, как мы уже сказали, будет наиболее сильным среди всех других тел. Эти последние, чтобы отличить от нашего ящика, условно назвали серыми.

Все законы теплового излучения были установлены именно для «самых

черных» ящиков, которые получили собирательное наименование абсолютно черного тела. С соответствующими поправками эти законы удалось применить и к серым телам.

Вместо „на глазок“ — точный закон

Что это за законы? Они уже упоминались выше. Но — «на глазок». Сформулируем их теперь на языке физики.

Первый из них гласит, что излучательная способность абсолютно черного тела, то есть энергия, испускаемая им в виде света и тепла каждую секунду, пропорциональна четвертой степени его абсолютной температуры¹. Этот закон открыли в конце прошлого века немецкие ученые Стефан и Больцман.

Второй закон гласит, что с повышением температуры абсолютно черного тела длина волны, соответствующая максимальной яркости света, испускаемого им, должна становиться все более короткой, смещаясь к фиолетовой части спектра. Этот закон получил в честь открывшего его австрийского физика название закона смещения Вина.

Итак, в распоряжении физиков оказались два универсальных закона теплового излучения, применимых решительно ко всем телам. Первый из них правильно описывает повышение яркости свечения по мере нагревания тела. Может показаться, что закон Вина плохо согласуется с наблюдениями. Ведь по мере повышения своей температуры тело испускает все более белый цвет. Белый, а не фиолетовый!

Но присмотримся к этому получше. Закон Вина говорит лишь о цвете, соответствующем максимальной яркости излучения света, и ничего больше. Он молчаливо полагает, что наряду с этим излучением остаются уже начавшиеся раньше, при меньшей температуре, излучения с большей длиной волны, то есть другого цвета. При нагреве тела его излучение расширяет свой спектральный состав, словно сдергивается ширма с тех участков спектра, которые дотоле в нем не проявлялись. И в результате, при достаточно высокой температуре, возникает полный видимый спектр свечения.

Это похоже на то, как один за другим вступают инструменты оркестра, берущие все более высокие ноты. И вот, наконец, оркестр зазвучал в могучем аккорде — от глубоких «красных» басов тромбонов до высочайших «фиолетовых» пронзительных звуков флейт! А одновременно «звучащий» полный спектр — это и есть белый свет. С правильностью закона Вина все в порядке. Но природа нанесла удар исследователям теплового излучения — и совсем на другом фронте.

¹ Температуры, отсчитываемой не от 0 градусов по Цельсию, а от так называемого абсолютного нуля, лежащего примерно на 273 градуса ниже.

Ультрафиолетовая катастрофа

У физиков есть неодолимая тяга к универсальным законам. Как только выясняется, что одно и то же явление с разных сторон описывается несколькими законами, тут же делается попытка объединить их в один общий, который охватывал бы одновременно все эти стороны.

Подобную попытку в отношении законов теплового излучения предприняли английские физики Рэлей и Джинс. Полученный ими объединенный закон гласил, что интенсивность излучения, испускаемого нагретым телом, прямо пропорциональна его абсолютной температуре и обратно пропорциональна квадрату длины волны испускаемого им света.

Этот закон, казалось, хорошо соответствовал опытным данным. Но неожиданно выяснилось, что согласие существовало только для средней части видимого спектра — там, где располагаются зеленые и желтые цвета. По мере приближения к синим, фиолетовым и ультрафиолетовым лучам оно все более нарушалось.

Из закона Рэрея — Джинса следовало, что чем короче длина волны, тем большей должна быть интенсивность теплового излучения. Ничего подобного на опыте не наблюдалось. Более того, самое неприятное заключалось в том, что эта интенсивность излучения при переходе ко все более коротким волнам должна была расти совершенно неограниченно!

Но этого же не происходит! Нет, и не может быть никакого неограниченного роста интенсивности волн. Если какой-либо физический закон приводит к слову «неограниченно», — это его крах. В природе есть большое, очень большое, невообразимо большое, но нет ничего неограниченного. Не имеет границ только сама Вселенная.

Положение, создавшееся в теории излучения, физики образно окрестили «ультрафиолетовой катастрофой». Никто из них тогда, в конце девятнадцатого века, и думать не мог, что это не просто катастрофа одного, в общем-то довольно частного закона. Оказалось, что это — катастрофа всей теории, породившей этот закон, — классической физики!

Классическая физика в тупике

В те годы кое-кому из физиков казалось, что препятствие, на которое натолкнулась классическая физика в лице ее теории излучения, не является существенным. Но для теории любое препятствие существенно. В ней все связано одно с другим. Если она дает чему-либо неправильное объяснение, то это ставит под удар и объяснения, данные ею другим явлениям. Если теории не удастся перешагнуть через маленькое препятствие, то что и говорить о большом!

Физики предприняли многочисленные попытки преодолеть затруднения

теории излучения. Сегодня в этих попытках можно усмотреть мало логической последовательности. Удивляться не приходится.

Теория, когда она попадает в критическое положение, напоминает кошку в горящем доме, из которого один выход — в реку. Кошка бестолково мечется из угла в угол, но прыгнуть в воду ей и в голову не приходит. Ведь это же означало бы полное крушение кошачьих инстинктов!

Нечто подобное происходит и с учеными, когда начинает гореть тот «дом», в котором они творили всю свою жизнь. Дом, который для них столь же привычен и ясен, как воздух. Физики пытались потушить «пожар», но, когда это не удалось, — они и в мыслях не имели покинуть свой «дом».

Однако наиболее проницательным ученым все же стало ясно, что классическая физика зашла в тупик. Теория теплового излучения оказалась не единственным таким тупиком. В те же годы рухнула теория эфира.

Слишком быстро все это обрушилось! Среди физиков воцарилась растерянность. Что оставалось делать?

Если факты не хотят лезть в теорию — тем хуже для фактов! Значит, природа не подчиняется никаким законам! Природа непознаваема! Так возопили некоторые слабонервные ученые.

Если факты не объясняются теорией — тем хуже для теории! Тем решительнее надо ее перестраивать в самой основе! Так заявили ученые-материалисты.

История еще раз доказала, что великая необходимость рождает великих людей. Выход из тупика классической физики с ее незыблемыми догмами был найден Максом Планком в 1900 году, введшим в науку представления о квантах, и Альбертом Эйнштейном в 1905 году, создавшим теорию относительности.

Выход из тупика найден

В чем же состояло открытие Планка?

На первый взгляд, его даже трудно назвать открытием. Было два закона теплового излучения нагретых тел, порознь вполне справедливых. Объединили их в один закон — и возникла «ультрафиолетовая катастрофа». Все равно, что встретились два человека с примерно общим образом мыслей, поговорили — и договорились до «сумасшедших» вещей!

Планку было уже за сорок лет. Многие годы он посвятил исследованию теплового излучения. На его глазах теория зашла в тупик, и он, как его коллеги, напряженно искал выхода из этого тупика. Уже проверен весь ход рассуждений, уже он окончательно убежден в том, что здесь не кроется ошибки. Планк ищет дальше и в другом направлении.

Никогда, много лет спустя вспоминал Планк, он не работал с таким поистине юношеским вдохновением, как в эти годы кануна нового века.

Самые невероятные вещи начинали казаться ему возможными, с упорством одержимого просчитывал Планк один вариант теории за другим.

Вначале Планком руководит довольно простая идея. Рэлей и Джинс соединили два закона теплового излучения в один и получили при этом нелепый результат. Нельзя ли как-то «сшить» эти законы иначе, чтобы избежать нелепицы?

Планк пробует найти для опытного материала некую общую формулу, которая бы не противоречила этому материалу. После некоторых поисков такая формула найдена. Она имеет довольно сложный вид. В нее входят выражения, которые не имеют очевидного физического смысла — так, случайная на вид комбинация не связанных друг с другом величин. Но удивительно, почему эта словно «высосанная из пальца» формула так хорошо согласуется с опытом!

Более того, из нее удастся вывести и закон Стефана — Больцмана и закон Вина. А в целом — в этой формуле уже нет никаких «неограниченностей». Как говорят физики: формула вполне корректна.

Победа? Выход из тупика?

Нет, еще рано радоваться. Планк, как и подобает настоящему ученому, склонен сомневаться в ценности найденной им формулы.

Ведь если двадцать раз ткнуть пальцем в клавиши рояля, то может случайно выйти мелодия. Как доказать, что она получилась закономерно?

Еще надо полученную формулу из чего-то вывести. Для науки не существует правила: победителей не судят. Судят, и еще как пристрастно! Пока не обоснован каждый шаг победителя в сражении с природой, победа не засчитывается.

И как раз здесь Планку ничего не удастся. Формула не желает выводиться из законов классической физики. А с другой стороны — она прекрасно отвечает опытным данным.

Драматическое положение! На чью сторону станет Планк? На сторону классической теории против фактов или же вместе с фактами против старой теории? Планк делает выбор в пользу фактов.

Кванты энергии

Что же в классической физике было такого, что не позволяло получить из нее формулу Планка? Ни много, ни мало, как одно из фундаментальных ее положений. Привычное и незыблемое для тогдашних физиков положение о непрерывности энергии.

Что означает это положение? На первый взгляд оно кажется даже противоречащим духу классической физики, которая с момента своего возникновения опиралась на признание прерывности вещей. В самом деле, раз в мире существует пустое пространство, то все предметы должны быть от-

делены друг от друга, должны иметь свои границы. Вещи не переходят непрерывно друг в друга, где-то каждая из них кончается.

Ну, а внутри вещей? И здесь не видно непрерывности. Классическая физика конца девятнадцатого века вынуждена признать существование молекул и пустого пространства между ними. Молекулы имеют четкие границы, непрерывна лишь пустота, в которой они «плавают».

Впрочем, молекулы умудряются каким-то образом воздействовать друг на друга через пустоту. Классическая физика пытается со времени Фарадея объяснить это взаимодействие существованием некоей промежуточной среды, через которую и передается взаимное влияние молекул.

А энергия? Считается, что молекулы при взаимных ударах обмениваются ею в самых разнообразных количествах. Этот обмен энергией осуществляется в точности по тем же законам, что и при ударах бильярдных шаров. Летит молекула, ударяет другую, неподвижную, отдает ей часть своей кинетической энергии,— и летят теперь две молекулы в разных направлениях. А при прямом ударе налетевшая молекула может остановиться; тогда вторая полетит с ее скоростью. И молекулы обмениваются энергией непрерывно.

Найден еще один вид энергии, не связанный явно с движением молекул,— энергия волнового движения. С тех пор, как Максвелл доказал, что свет — электромагнитные волны, энергия светового излучения, в частности теплового происхождения, должна подчиняться общим для любых волн законам.

И эта энергия тоже непрерывна. Она распространяется вместе с движущейся волной. Эта энергия течет наподобие воды из крана, и данное отмеренное количество энергии расходуется столь же непрерывно и неделимо, как вода, пока она не наполнит сосуда.

Когда мы режем кусок масла на части, мы не задумываемся о прерывности этого куска. Мы полагаем, что от него можно отделить даже сколь угодно малый кусочек. Когда в науку было введено представление о молекулах, стало ясным, что куска масла меньше, чем молекула масла, «отрезать» не удастся.

А вот в отношении энергии такого представления о ее дробимости не существовало. Казалось, атомарное строение вещества не влечет за собой атомарности энергии.

В самом деле, посмотрим на горящую свечу. Она освещает комнату, испуская световую энергию ровно и бесперебойно. Столь же спокойно и беспрерывно светит Солнце. Непрерывно набирает скорость, а с нею и энергию, поезд, катящийся под уклон, камень, летящий в пропасть. Ровной грядой движутся в море волны, которым передает свою энергию ветер.

А что было бы, если бы энергия приобреталась и отдавалась телами непрерывно, а некими порциями? Тогда все наблюдаемое нами в действительности резко бы изменилось, как на экране старинного кино. Мелькала бы

свеча, то вспыхивая, то угасая. Солнце тоже светилось бы словно вспышками: отдавало порцию световой энергии и потухло до следующей вспышки. Толчками двигался бы поезд под уклон, рывками набирал бы скорость камень, летящий в пропасть.

Экая чушь! Такого сроду не бывало!

Возможно, именно так и ответил Планку первый человек, с которым он поделился своей мыслью. Мыслью о том, что энергия излучения, так же, как и вещество, атомарна, что она отдается и приобретается не непрерывно, а прерывно, отдельными «атомами», порциями. Планк назвал эти порции квантами — словом, означающим по-латыни просто «количество». Если бы он только знал, какое качество вырвется из этого «количества»!

Кванты для формулы Планка были жизненной необходимостью: без них она бы завяла, как дерево без воды, и ее пришлось бы сдать в пыльный архив науки. В этом архиве много формул, которым так и не удалось найти надлежащего обоснования.

С предположением о квантах энергии формула Планка получила надежный фундамент. Но сам этот фундамент... висел в воздухе: для него не было места в почве классической физики!

Именно это обстоятельство очень смущало такого осторожного ученого, как Планк. Ох, как трудно покинуть «дом», в котором работал всю жизнь, ради того чтобы «повиснуть в воздухе»!

„Неуловимые“ кванты

Квант света — чрезвычайно малая порция энергии. Уловить ее не легче, чем взвесить атом. В мельчайшей пылинке — миллиарды атомов. В ничтожном количестве энергии, которую излучает крохотный светлячок, — миллиарды квантов.

Какова же величина этих отдельных порций энергии? Планк делает следующее исключительно важное открытие. Он устанавливает, что эти порции различны для разных видов излучений. Чем короче длина волны света, то есть чем выше его частота (иными словами, чем «фиолетовее» свет), тем больше порция энергии.

Математически это выражается с помощью известного соотношения Планка между частотой и энергией кванта:

$$E = h\nu.$$

Здесь E означает энергию, заключенную в кванте, ν — частоту кванта. Величина h играет роль коэффициента пропорциональности. Этот коэффициент оказался одним и тем же для всех видов энергии, известных до настоящего времени. Он получил название постоянной Планка, или «кванта действия». Его значение для физики крайне велико, а величина — столь же мала: она равна примерно $6 \cdot 10^{-27}$ эрга на секунду!

Вот эта-то ничтожная величина кванта и делает понятным, почему свеча или Солнце и вообще все привычные нам источники света горят «непрерывно». Подсчитаем, к примеру, сколько квантов содержится в энергии, излучаемой 25-ваттной лампочкой в секунду. Считая, что лампочка испускает желтый свет, находим по соотношению Планка число $6 \cdot 10^{19}$, то есть 60 миллиардов миллиардов порций энергии в секунду. А ведь лампочка в 25 ватт — это не бог весть какой яркий источник света!

Выходит, что мы не в состоянии уловить действительное мелькание лампочки или свечи потому, что глаз нечувствителен к столь крошечным порциям энергии? Это, однако, ошибочная мысль.

Глаз — неимоверно чувствительный прибор. Со всей убедительностью это было доказано опытами советского физика С. И. Вавилова. Выдерживая наблюдателя достаточное время в темноте (для повышения чувствительности его глаза), Вавилов затем включал исключительно слабый источник света, дававший считанные кванты в секунду. И глаз регистрировал их чуть ли не поодиночке!

Все дело не в величине квантов, а в той огромной скорости, с которой они следуют друг за другом. Мы уже видели, что даже слабенькая лампочка испускает их миллиардами миллиардов в секунду.

А человеческому глазу, как и любому прибору, присуща инерционность. Он не в состоянии регистрировать раздельно явления, очень быстро следующие друг за другом. На этой инерционности глаза, в частности, основано кино. Для зрителя движение на экране происходит непрерывно, хотя он прекрасно знает, что снято оно прерывно, кадрами.

Кванты энергии же, испускаемые источниками света, следуют друг за другом куда быстрее, чем кинокадры. Именно поэтому реакции глаза на каждый квант сливаются в одно непрерывное впечатление света.

Свои опыты С. И. Вавилов поставил уже в тридцатых годах нашего столетия, когда мысль Планка о квантах давно уже стала общепризнанной. Сам же Планк доказать прямым опытом истинность своего открытия не смог.

То что формула оправдывается на опыте, но не вытекает из теории, всегда поначалу кажется сомнительным. Тем более — формула, полученная из представлений, находившихся в резком противоречии с общепринятой точкой зрения. Поэтому, когда Планк сделал свое сообщение в Берлинской академии наук, оно не вызвало особого энтузиазма в научных кругах. Ученые — те же люди. Им тоже нужно время, чтобы осмыслить нечто из ряда вон выходящее.

Планк сам отлично сознавал всю дерзость своего покушения на классическую физику и энергично искал оправданий этой попытке. Но он, конечно, не мог представить те грандиозные свершения, которые несколько лет спустя перевернули всю физику.

... 1901, 1902, 1903, 1904 годы... Теория квантов не привлекает особого внимания физиков. Научные работы пока насчитываются единицами...

Непонятное явление

Но вот в 1905 году никому дотоле не известный сотрудник швейцарского бюро патентов Эйнштейн публикует в немецком журнале «Физическое обозрение» свою теорию фотоэлектрического эффекта в металлах.

К тому времени, когда им занялся Эйнштейн, этот эффект имел солидный с научной точки зрения «возраст». Называемое коротко фотоэффектом явление было открыто в 1872 году профессором Московского университета А. Г. Столетовым.

В колбе, из которой был выкачан воздух, Столетов поместил две металлические пластинки и присоединил их к полюсам электрической батареи. Разумеется, ток через безвоздушный промежуток не шел. Но стоило только бросить на одну из пластинок свет ртутной лампы, как в электрической цепи моментально возникал ток. Выключалось освещение — тут же прекращался и ток.

Столетов сделал правильное заключение, что в колбе появились переносчики тока — электроны — и что они возникали только при освещении пластинок.

Было совершенно очевидно, что эти электроны вылетали из освещаемого металла наподобие того, как молекулы выпрыгивают в воздух из нагреваемой жидкости. Однако здесь слова «наподобие того» скорее говорят о том, что ничего подобного нет, что вылет электронов из металла имеет совершенно иную, притом в то время непонятную природу.

В самом деле, свет — это электромагнитная волна. Трудно представить себе, как волна может выбить электроны из металла. Это ведь не удар одной энергичной молекулы по другой, в результате чего одна из них может вылететь за поверхность жидкости.

Было установлено еще одно интересное обстоятельство. Для каждого из исследовавшихся металлов, оказалось, существует некоторая граничная длина волны освещающего света. Стоило свету приобрести еще большую длину волны, как электроны в колбе внезапно исчезали, ток в цепи прекращался, сколько бы при этом ни увеличивалась яркость освещения.

Это было совсем уже странно. Понятно, что электроны вылетают из металла потому, что свет каким-то образом передает им энергию. Чем ярче освещение, тем сильнее ток. В металл при этом входит больше энергии и большее число электронов может из него вылететь.

Но какой бы ни была длина волны света, — в металл ведь все равно поступает энергия. Пусть с увеличением длины волны эта энергия будет меньше, меньше электронов будет вылетать из металла. Но все же ток,

хотя и малый, а должен существовать. На опыте же ток прекращался вовсе. Словно электроны переставали усваивать световую энергию!

Как можно было понять эту внезапную привередливость электронов к их энергетической «пище»? Физики разводили руками: это было выше их понимания!

ФОТОНЫ

Эйнштейн подошел к явлению фотоэффекта иначе. Он попытался представить себе сам процесс выбивания электрона из металла светом.

В обычных условиях над металлом не витают облака электронов. Значит, электроны связаны в металле какими-то силами. Чтобы освободить их из плена металла, им надо подбросить некоторую энергию. В опытах Столетова эта энергия подводилась световыми волнами.

Но световая волна имеет заметную длину, порядка долей микрона, а энергия ее словно концентрируется в ничтожном объеме, занимаемом электроном. Выходит, световая волна в фотоэффекте ведет себя как некое подобие маленькой «частицы», которая, ударяя по электрону, выбивает его из металла.

Как же представлять себе эту частицу? Она, очевидно, частица света, корпускула, как называл ее Ньютон (полагавший, что свет — это не волны, а потоки световых частиц). А какова энергия одной такой частицы? Подсчет показывает, что она невелика. Почему бы не предположить, что она равна как раз тому самому кванту, который был «изобретен» Планком пять лет назад?

И Эйнштейн делает предположение: свет — это не что иное, как поток квантов энергии, причем для данной длины волны света все его кванты совершенно одинаковы, то есть несут одинаковые порции энергии. Кванты световой энергии впоследствии были названы фотонами.

И сразу все удалось просто объяснить. Фотон несет с собой очень небольшую энергию. Но при «ударе» фотона по электрону ее вполне достаточно, чтобы разорвать связи электрона в металле и выбросить его наружу.

С другой стороны, очевидно, если энергия фотона недостаточна, чтобы разорвать эти связи, электроны из металла не вылетят, тока не будет. Согласно формуле Планка, энергия кванта определяется его частотой, а она тем меньше, чем больше длина волны света. Отсюда сразу понятно существование границы фотоэффекта. Просто, если длина волны света слишком велика, фотоны оказываются чересчур неэнергичными, чтобы вырывать электроны из металла.

При этом неважно, какую яркость имеет освещение, тысяча или один такой фотон влетают в металл и бомбардируют его электроны; эти электроны равно глухи ко всем ним. Другое дело, если фотоны достаточно энергичны. Здесь, чем ярче освещение, чем больше фотонов входит в металл за секунду,

тем больше электронов выбивается из него за то же время, тем сильнее ток.

Итак, объяснение странному явлению найдено. Но и это объяснение, подобно гипотезе Планка, подрывает основные устои классической физики. Ведь для нее свет — это электромагнитные волны, а вовсе не какие-то «новомодные» фотоны. Теория Эйнштейна снова разжигает среди физиков двухвековой спор о сущности света.

Что же такое свет?

Этот спор по существу никогда не прекращался в физике. Вопрос о природе света возник на заре классической физики и прожил бурную жизнь. Это вопрос: что такое свет — волны или частицы?

Оба представления о свете появились в физике почти одновременно. Тела светятся, выбрасывая потоки световых частиц, корпускул, — утверждал Ньютон. Тела светятся, пульсируя и образуя волны в окружающей их эфирной среде, — учил современник Ньютона голландец Гюйгенс.

Нашлись сторонники и того, и другого объяснения. С первых же лет существования обеих теорий между ними началась борьба не на жизнь, а на смерть. Временами перевес был то на одной, то на другой стороне. Так продолжалось более ста лет.

Наконец, в начале девятнадцатого века опыты Юнга, Френеля, Франгофера приносят, казалось бы, решительную победу волновой теории света. Обнаруживаются явления интерференции, дифракции и поляризации света, прекрасно объясняемые теорией Гюйгенса и совершенно непонятные с точки зрения теории Ньютона.

С этого момента начинается бурное развитие оптики. Создаются блестящие по своей стройности теории оптических явлений, рассчитываются сложнейшие оптические инструменты. И, наконец, Максвелл достраивает здание оптики, доказывая электромагнитный характер световых волн. Торжество волновой теории полное и неоспоримое.

Не проходит, однако, и полувека, как корпускулярная теория света снова поднимает голову. Фотоэффект, о который ломает зубы волновая теория, — какое, казалось бы, небольшое досадное пятнышко на торжественном фоне! — отлично объясняется ее противницей.

И снова вспыхивает век назад затихший спор. Но теперь борьба теорий идет на новой основе. Обе противницы устали и готовы к примирению. Постепенно в головах физиков утверждается поразительная и вместе с тем неизбежная мысль: свет одновременно и волны и частицы!

Но почему же свет нигде не проявляется всей своей «двухсторонней» сущностью? Почему в одних явлениях он выступает только как частицы, а в других — только в виде волн? На этом важнейшем вопросе нам предстоит остановиться несколько позже.

Второй вопрос, который встал с появлением теории Эйнштейна, тоже не прост. В фотоэффекте привередливые электроны усваивают далеко не любую порцию подбрасываемой им энергии. Пока эта порция не сравняется с некоторой определенной величиной или не станет больше ее, световая энергия не найдет своего потребителя.

Всегда ли это так? Оказывается, что электрон, не связанный никакими силами со своими соседями, перестает и привередничать, усваивает любые порции энергии. Но стоит только ему, скажем, оказаться в металле, как появляется и прихотливость.

С чем это связано? Разгадка пришла спустя двадцать с лишком лет.

Визитные карточки атомов

А пока что молодой датский физик Нильс Бор попытался применить малоизвестные представления о квантах к такой заслуженной уже в то время области науки, как спектроскопия. Число работ в этой области к началу двадцатого века исчислялось многими сотнями. Спектральный анализ шагал семимильными шагами, оказывая огромные услуги химии, астрономии, металлургии и другим наукам.

Открытием спектров мы обязаны многогранному гению Ньютона. Но спектральный анализ родился лишь век назад. В 1859 году выдающийся немецкий химик Бунзен повторил старый опыт Ньютона, поставившего стеклянную призму на пути солнечных лучей и разложившего их в спектр. В опыте Бунзена роль Солнца играла горящая тряпочка, смоченная в растворе соли. Ньютон обнаружил, что луч солнечного света растягивается в разноцветную полосу. Бунзен никакой полоски не увидел. В том случае, когда на тряпочке была поваренная соль, он нашел в спектре только несколько узеньких линий — и ничего больше. Среди этих линий была яркая желтая линия.

Бунзен заинтересовал этим другого крупного немецкого ученого — Кирхгофа. Оба они правильно рассудили, что роль стеклянной призмы сводится только к тому, что она «сортирует» падающие на нее лучи света по их длинам волн. Растянутая полоска солнечного спектра говорила о том, что в нем есть все длины волн видимого света. Желтая линия в случае, когда в качестве источника света использовалась горящая тряпочка, указывала на наличие в спектре поваренной соли соответствующей ей одной длины волны света.

Формула поваренной соли — NaCl — хорошо известна. Какому же из элементов — натрию или хлору — принадлежала желтая линия? Проверить это оказалось очень легко. Натрий в поваренной соли можно заменить водородом. Тогда получится хлористый водород HCl , который при растворении в воде дает соляную кислоту. Смочили тряпочку в соляной кислоте, поместили ее в пламя газовой горелки и снова сняли спектр.

Желтая линия бесследно исчезла. Значит, она принадлежала натрию. Это проверили еще раз. Взяли другое вещество, в котором на сей раз не было хлора, но присутствовал натрий,— едкий натр NaOH . В спектре его сразу же заметили знакомую линию. Сомнений не оставалось. В какое бы вещество ни входил натрий, он всюду приносит с собой свою «визитную карточку» — яркую желтую спектральную линию.

Позже выяснилось, что натрий в этом отношении — не исключение. Каждый химический элемент имеет свой, характерный для него, и только для него, спектр. Эти спектры были, как правило, посложнее натриевого — состояли не из одной, а порой из очень многих линий. Но в какое бы соединение ни входил элемент, в каких бы веществах ни находились его атомы, — его спектр всегда можно отличить. Так иногда по фотографии, сделанной в юности, мы можем узнать человека много лет спустя.

Можно было бы искать в толпе человека, проверяя паспорта у всех подряд, как это делают химики, выискивая в образцах элементы химическими методами анализа. Гораздо проще искать человека по его фотографии. Именно так и ищут элементы с помощью спектрального анализа. Причем находят там, где до «паспорта» элемента никак не дотянуться, не пощупать химическими методами, — например, на Солнце и других звездах, в раскаленных доменных печах, в плазме.

Разумеется, чтобы найти всех нужных людей, надо обладать достаточным количеством их фотографий. Сегодня известно чуть больше сотни химических элементов. Почти на всех них уже давно заведены «фотокарточки» их характерных спектров.

Почему тела испускают свет?

Колоссальны были успехи спектрального анализа, но колосс был на глиняных ногах.

Здание спектроскопии, воздвигнутое на фундаменте теории теплового излучения, несло на себе печать основной неудачи этой теории. Неудачи в ее попытках ответить на вопрос: а почему вообще тела начинают светиться при нагревании?

Чем испускается этот свет? Очевидно, составными частями тел — атомами и молекулами. Повышение температуры вызывает более интенсивное движение молекул. Они начинают сильнее сталкиваться друг с другом, быстрее колебаться после ударов и при этих весьма частых колебаниях испускать свет. Так говорила старая физика. Но почему же тогда тела, пусть хоть и слабо, но не светятся при комнатной температуре? Ведь и при этой температуре не прекращаются движение и столкновения молекул! Объяснение пришлось оставить.

Когда в 1889 году английский ученый Томсон создал первую модель

атома, разгадка свечения тел казалась близкой. В этой модели принималось, что атомы представляют собой облака положительного заряда, в которых плавают компенсирующие этот заряд отрицательные электроны. Электроны притягиваются положительными облаками и тормозят свое движение.

Но, согласно классической физике, заряженные частицы при замедлении их движения обязательно должны испускать электромагнитное излучение. Это излучение и есть, видимо, тот свет, который испускается нагретыми телами. Что ж, на первый взгляд такое объяснение может показаться правдоподобным. Чем сильнее нагрето тело, тем энергичнее движутся электроны в его атомах, тем резче они тормозятся притяжением облаков положительного заряда, тем интенсивнее их излучение.

Все это могло бы быть так, если бы электроны, излучая, не расходовали свою энергию. Но, испуская свет, электроны должны чрезвычайно быстро тормозиться. Спустя ничтожные доли секунды они должны были бы полностью «завязнуть» в положительных облаках, как изюм в пудинге.

Объяснения не получилось. Проходит несколько лет, и становится все более очевидным, что томсоновская модель атома неверна и в других отношениях. На слишком многие вопросы она не дает ответа, и прежде всего на тот, почему электроны не сливаются с положительным облаком, полностью нейтрализуя свой заряд. А те ответы, которые все же удается получить от этой модели, в большинстве случаев резко противоречат опыту.

И в 1911 году замечательный английский физик Эрнест Резерфорд предлагает новую модель атома. Резерфорд бомбардировал атомы веществ открытыми незадолго до того альфа-лучами радиоактивных веществ. Уже было известно, что эти лучи состоят из положительно заряженных частиц.

Изучая картины рассеивания альфа-частиц атомами, Резерфорд вынужден был прийти к выводу, имевшему далеко идущие последствия. Рассеивание альфа-частиц происходило так, как если бы они отталкивались не всем положительным облачком томсоновского атома, а лишь какой-то ничтожно малой частью атома, сосредоточенной где-то в его центре. Причем в этой ничтожной части атома оказывался заключенным весь его положительный заряд!

Резерфорд назвал эту часть атома ядрышком. Где же в таком случае место электронов в атоме? Прежняя мысль о том, что электроны связаны с положительным зарядом в атоме электрическими силами притяжения, не подвергается сомнению. Но раз электроны существуют на известном удалении от ядрышка, значит, должна быть какая-то сила, противодействующая электрической силе взаимного притяжения электронов и ядра.

Понятно, что эта сила должна действовать не одно мгновение. Атомы существуют достаточно длительное время, так что эта противодействующая сила явно не менее постоянна, чем сила электрического притяжения электронов и ядра.

Разумно предположить, что ею может быть центробежная сила. Она

возникает, если электроны вращаются вокруг атомного ядрышка. Можно и подсчитать, достаточно ли велика она, чтобы не допустить сближения электронов с ядром. Подсчет показывает, что вполне достаточно, если электроны вращаются вокруг ядра со скоростями порядка многих десятков тысяч километров в секунду и на расстоянии от него порядка стомиллионных долей сантиметра.

Так рождается модель атома Резерфорда. Вращение шарика на веревке, косвенным образом натолкнувшее Ньютона на мысль о тяготении планет, теперь приводит Резерфорда к остроумной и совершенно правильной, как показало будущее, мысли о «планетарном» строении атома.

Теперь можно и вернуться к прежнему вопросу о том, почему светятся тела, и поискать его разгадки в новой модели атома. Что ж, новая модель любезно предоставляет свои услуги. Движение электронов вокруг ядра является ускоренным (электроны вращаются по замкнутой кривой). Значит, должно существовать и электромагнитное излучение электронов. Классические законы равно применимы и к томсоновской и к резерфордовской моделям атома. Но, увы, применимы с тем же «успехом». Излучая свет, электрон расходует свою энергию! При этом он замедляет свое вращение и очень быстро, за миллионные доли секунды, должен неминуемо упасть на ядро. Совсем как спутник, который, затормозившись в атмосфере, падает на Землю. Для электрона это такая же катастрофа, как и для спутника. Смотришь, сначала один электрон упадет на ядро, потом другой, и вот прекратит существование сам атом!

Но, как мы знаем, в окружающем нас мире атомы живут весьма долго и не обнаруживают желаний умирать. Значит, чтобы атом мог жить, его электроны не должны тратить своей энергии, не должны излучать света. Но откуда же тогда опять-таки берется свечение тел при их нагревании?

Биография атома, написанная Нильсом Бором

Снова классическая физика зашла в тупик. И тупик даже более глухой, чем могло показаться. Мало того, что у нее ничего не получалось со свечением нагретых тел. Она не могла объяснить и существования спектров.

Вспомним тряпочку, вымоченную в растворе соли. Спектр этой соли — одна-единственная желтая линия — говорит о том, что в излучении атомов соли есть только одна длина волны.

Даже если допустить, что эта линия испущена электроном, тормозящимся в атоме, то мы тут же столкнемся с новой трудностью. По законам классической физики такой электрон должен испускать не одну линию, а целый спектр линий со всеми длинами волн, без всяких разрывов в этом спектре.

Спектр электрона не должен отличаться от спектра Солнца! А у нас — одна-единственная желтая линия!

Бор задумывается. Что-то тут не так. Может быть, не верна модель атома Резерфорда? Нет, отказываться от этой модели преждевременно. Так же считает и учитель Бора, Эрнест Резерфорд. Надо попробовать как-то видоизменить, подправить эту модель, чтобы в ней электрон, вращаясь вокруг ядра, мог испускать свет и при этом не падать на ядро.

Шел 1912 год, и у всех физиков в памяти еще была свежа сенсация, которую произвел Эйнштейн своими фотонами. И только за три года до этого тот же Эйнштейн завершил создание своей теории относительности, которая произвела не меньший фурор. Разумеется, все эти покушения на классическую физику не могли не подогреть молодых физиков, не могли не придать им смелости в мыслях.

Бор продолжает размышлять. И вот блеснула догадка. Почему электрон в атоме должен излучать свет непрерывно? Потому что он все время движется ускоренно? Откажемся от этой мысли. Электрон в атоме, даже двигаясь ускоренно, может и не излучать света!

Как же такое возможно? Оказывается, для этого электрон должен двигаться в атоме не как попало, а по особым путям — орбитам — вокруг ядра. Не излучая на них свет, электрон может жить в атоме сколь угодно долго.

Из классической физики это положение не следует «ни при какой погоде». Оно не следует также ни из какой другой теории. Доказать его поэтому Бор не в состоянии. И это положение как недоказанное Бор скромно называет постулатом. Отметим, что Бору так и не удастся доказать его в рамках своей теории. Доказательство придет десятилетием позже и окажется совсем неожиданным. Но об этом — потом. А пока что: много ль может быть таких орбит, на которых электрон движется, не излучая света? Может быть, и много, подсчитывает Бор, даже бесконечно много. Чем же они различаются? Средним расстоянием до ядра: есть близкие к ядру орбиты, есть и удаленные. Но дело не столько в расстоянии, сколько в энергии, которой обладает электрон на орбите. Понятное дело: чем ближе электрон к ядру, тем энергичнее он должен двигаться по орбите, чтобы не упасть на ядро. И напротив, далекий электрон притягивается ядром слабо, а значит, может двигаться не столь энергично, чтобы удержаться на своей орбите.

Отсюда ясно, что пути, по которым движется электрон в атоме, различаются энергией электрона. До сих пор электрон только движется и никак не излучает света. Пока электрон находится на орбите, излучение для него — «табу».

И теперь Бор идет дальше, ко второму постулату. Двигался электрон по орбите и вдруг перескочил на другую, на которой его энергия меньше. Куда исчез излишек энергии? Энергия исчезнуть, превратиться в ничто не может.

Ищите ее вне атома!— заявляет Бор.

Она выделилась из атома в виде кванта. Того самого кванта световой энергии, который Эйнштейн назвал фотоном!

А излучивший электрон движется на орбите, теперь уже на другой, и опять не испускает света. Он выбросил фотон в тот неуловимо короткий миг, когда прыгал с одной орбиты на другую.

А фотон тем временем пробирается меж других атомов и наконец вырывается из вещества. Он может влететь прямо в наш глаз. Можно его уловить через стеклянную призму спектрального прибора на фотопластинку. Не одно превращение испытывает энергия, заключенная в фотонах, пока мы увидим их овеществленное изображение в виде черной линии на фотопластинке!

О чем говорит эта линия? Во-первых, измерив ее положение на фотопластинке, можно узнать длину волны фотона или же его частоту. Дальше берется соотношение Планка между частотой и энергией фотонов и определяется энергия фотона. Она-то как раз и равна разнице в энергиях электрона на старой и на новой орбитах в атоме!

А почернение фотопластинки в месте этой спектральной линии говорит о том, сколько фотонов попало в это место: чем больше их число, тем чернее линия. А фотонов тем больше, чем ярче светило испускавшее их тело.

Какое простое и красивое объяснение спектров!

Все атомы какого-либо вещества похожи друг на друга как две капли воды. А значит, и электроны живут в них в одинаковых условиях. Одинаковы поэтому испускаемые ими фотоны при перескоках с одной и той же старой орбиты на одну и ту же новую орбиту. Все перескоки электронов между этими двумя орбитами дадут в конечном счете одну-единственную спектральную линию.

Таких старых и новых орбит для каждого из электронов в атомах довольно много, хотя, как мы уже говорили, и не бесконечное число. Электрон поочередно может находиться на любой из них.

Каждый такой перескок с более энергичной на менее энергичную орбиту будет сопровождаться рождением фотона. Но поскольку разница в энергиях между разными орбитами различна, то фотоны соответственно будут получаться с разной энергией и частотой. На фотопластинке тогда появится целый ряд узеньких спектральных линий.

Именно так выглядит, например, спектр газообразного водорода. В нем несколько десятков линий с различными длинами волн.

Вообще-то говоря, такой простенький спектр, как упоминавшийся выше спектр атомов натрия, состоящий из одной линии (позднее выяснилось, что это две очень близкие друг к другу линии), — скорее редкость. Обычно спектры насчитывают многие десятки линий, и нередко — тысячи линий. Спектральная картина, даваемая иным химическим соединением, выглядит

подчас столь запутанно, что в ней черт ногу сломит. Черту это позволено: ведь он не знает тех закономерностей, по которым образовался этот спектр.

Физики до появления теории Бора ломали головы, пытаясь расшифровать сложные спектры. Когда же Бор доказал, что спектр — это биография атомов, точнее — атомных электронов, ученым стало куда легче. Сиди и комбинируй себе различные орбиты электронов в атоме, пока не «накомбинируешь» наблюдаемые линии в спектре!

И, наоборот, делай по наблюдаемому спектру все нужные заключения об условиях, в которых находятся атомные электроны. А это очень важно! В сущности почти все, что мы знаем об электронных оболочках атомов, накоплено по кусочкам из тщательного, кропотливого изучения их спектров.

Как отсчитывать энергию?

Итак, благодаря трудам Бора физикам удалось понять, как атом излучает свет. После «как» можно обратиться к «почему». Почему тела начинают светиться только при высокой температуре и не испускают света, скажем, при комнатной температуре?

Прежде чем ответить на этот вопрос, нам придется несколько отвлечься. Столь убедительную картину жизни атома, нарисованную выше, нужно... перевернуть вверх ногами. Нет, не пугайтесь, все описанное правильно! За исключением порядка следования орбит электрона.

Вспомним, что энергичными мы считали орбиты, близкие к ядру, а неэнергичными — далекие от ядра. Отсюда следовало, что фотон испускается, когда электрон прыгает на орбиту подальше от ядра. На самом же деле все наоборот. И вот почему.

Выроьем в земле ямку и положим в нее шарик. А рядом, возле ямки, положим второй шарик. Какой из этих двух шариков имеет большую энергию?

Человек искушенный не попадет на удочку этого вопроса. Он скажет: «В вашем вопросе две неясности. Первая — о какой энергии идет речь? О потенциальной или кинетической? Вторая — от какого уровня отсчитывать потенциальную энергию? Если от уровня земли, то потенциальную энергию шарика над ямкой можно принять за нуль, но тогда шарик в ямке должен иметь потенциальную энергию меньше нуля, то есть отрицательную. Если же отсчитывать потенциальную энергию от дна ямки, то тогда шарик над ямкой будет иметь потенциальную энергию больше нуля. Поскольку оба шарика неподвижны, их кинетическая энергия в обоих случаях равна нулю». Примем первый способ отсчета.

А если шарик не лежит спокойно, но движется? Тогда к его потенциальной энергии добавится еще кинетическая энергия. Однако сумма обеих

энергий, называемая полной энергией, очевидно, так и останется отрицательной, если шарик не выскочит из ямки. Напротив, она станет положительной, если шарик выскочит вверх да еще покатится по земле.

Мы просим извинения у читателей за это утомительное рассуждение. Но оно важно для нашего рассказа и сейчас, и позже. Дело в том, что с точки зрения энергии электрон в атоме — это тот же шарик в ямке. А свободный, самостоятельный электрон — это шарик на земле. Энергию этих электронов физики условились отсчитывать, приняв за нуль полную энергию свободного, но неподвижного электрона.

Что может быть общего между электроном и шариком? Почти что ничего! Кроме того, что и тот и другой связаны, ограничены в своих движениях. Шарик сам по себе не может покинуть ямку, а электрон не может вылететь из атома. Именно поэтому и существуют атомы.

Чем шарик ближе к выходу из ямки, чем дальше он от ее дна, тем большую полную энергию он имеет (а значит, тем меньше эта энергия по своей отрицательной величине). Точно так же и электрон. Чем дальше он от ядра, тем выше его полная энергия; чем ближе он к ядру, тем меньше его энергия (но, разумеется, больше по своей отрицательной величине).

Теперь уже вам понятно, что электрон, прыгая на орбиту поближе к ядру, уменьшает свою энергию. Так что фотоны испускаются именно при таких перескоках электронов. И напротив, чем дальше орбита от ядра, чем она ближе к «выходу» из атома, тем больше энергия электрона на ней. А теперь вернемся к нашему рассказу.

Возбужденные атомы

Однако шарик не хочет уходить из рассказа. Вот он лежит на земле и спрашивает невинно: «Почему я не падаю?»

А куда ему, собственно говоря, падать? Вот если сбросить его с лестницы, он будет падать.

В положении этого шарика оказывается атомный электрон при невысокой температуре. Ему некуда прыгать. Он находится на самой близкой к ядру орбите, откуда только один путь — в ядро. Путь, понятное дело, столь же невозможный, как для шарика — провалиться сквозь землю.

Энергия электрона на этой орбите оказывается наименьшей. Из нее он уже не может ничего потерять. А значит — не может и излучать свет.

Выходит, сначала электрон должен очутиться на далекой от ядра орбите, откуда он сможет перепрыгнуть на более близкую к ядру. Как же электрон попадает на далекую орбиту? А как шарик оказывается на верху лестницы? Его перенесли туда, то есть сообщили ему некоторую энергию.

Точно так же забросить электрон на далекую орбиту можно, лишь сообщив ему какую-то энергию. Впрочем, «какую-то» — не то слово. Электрону надо передать энергию не меньше, чем разница в энергиях между орбитой, на которой он был, и орбитой, на которой он окажется.

Сообщить эту энергию электрону можно по-разному. Чаще всего такая передача происходит, когда в результате теплового движения один атом, разогнавшись или раскачавшись, достаточно энергично «ударит» по другому. При комнатной температуре такие удары не редкость, но на атомные электроны они не производят никакого впечатления. Слишком мала энергия удара. Другое дело — температура в сотни и тысячи градусов. Тут при ударах электрону уже передается энергия, достаточная для его прыжка.

И вот электрон оказывается на удаленной орбите. Волнения, казалось бы, окончились, и электрон может сколь угодно долго крутиться по этой орбите вокруг ядра. Но нет: осесть надолго на новой орбите электрон не может. Не дает ядро. Оно стремится притянуть к себе обратно удравший электрон, и тот покорно повинуется. Следует прыжок электрона в глубь атома, — и на свет появляется фотон. Тот самый фотон, который, попавшись на глаза, заставляет нас сказать: «тело светится».

Да, тело начало испускать свет. Продолжаем поднимать температуру и смотрим, что будет дальше. Тепловое движение атомов становится все более энергичным, все чаще и энергичнее они ударяют друг по другу. Все меньше времени электрон может провести спокойно на самой глубокой своей орбите. Все чаще атомы приходят в состояние, образно названное физиками «возбужденным». Все чаще они после этого возвращаются в «нормальное» состояние, чтобы тут же снова покинуть его.

Фотоны начинают рождаться уже не единицами, а тысячами и миллионами в секунду. Тоненький их ручеек по мере повышения температуры быстро превращается в могучий поток (вспомним закон Стефана—Больцмана).

Но растет не только число фотонов. Растет и длина электронных прыжков. Первые робкие перескоки на соседние орбиты и обратно сменяются рекордными прыжками на удаленные от ядра орбиты. И, прыгая назад, электроны рождают все более энергичные фотоны. А мы уже знаем, что чем выше энергия фотона, тем больше его частота и тем меньше длина волны. Свет становится не только более ярким, но и приобретает все более «фиолетовые» цвета (вспомните закон смещения Вина).

Так теория Бора смогла сразу объяснить основные законы теории теплового излучения и спектроскопии. После этого ее огромного успеха квантовая природа света, квантовый характер процессов в атомах стали совершенно очевидными. Прошло немного времени, и это было признано большинством ученых.

Первые поражения

Но говорить о полном торжестве теории Бора было бы преждевременным. Последующие за ее появлением десять лет — время бурного развития теории. Стремительно расширяет она охват явлений. Среди них — тончайшие процессы испускания и поглощения света атомами, детали строения атомов и молекул. В 1914 году Коссель закладывает основы квантовой химии — те самые основы, которые вошли сейчас во все учебники химии. В 1916 году Зоммерфельд дает более точную теорию происхождения атомных спектров, которая и по сей день помогает расшифровывать самые сложные из них. Получают в новой теории объяснение только что открытые к тому времени магнитные и электрические свойства атомов и молекул.

И одновременно обнаруживаются многочисленные подводные камни теории Бора. Все очевиднее становится ее недостаточность для объяснения новых фактов. Фактов, толчком к открытию которых она же послужила.

Первая из этих трудностей оказалась лежащей в спектрах. Но ведь теория Бора впервые объяснила происхождение спектров! Да, это так. И все же, как мы увидим, объяснение оказалось неполным.

Мы уже говорили, что спектральные линии характеризуются не только своей длиной волны, но и яркостью. По теории Бора удалось найти расстояния между ступеньками энергетической лесенки электронных орбит в атоме, то есть длины волн фотонов, рождавшихся при перескоках электронов со ступеньки на ступеньку этой лесенки. Но вот насчет определения яркости спектральных линий эта теория никаких указаний не давала. Как рассчитать число фотонов в спектре — это оставалось неясным.

Было бы слишком рано праздновать победу теории Бора над классической физикой! Изгнав «классику» с парадного хода, теории Бора пришлось впустить ее с черного хода. Это вынужден был сделать сам же Бор с помощью так называемого принципа соответствия.

В чем он заключается? Классическая физика умела рассчитывать яркости спектров, хотя и не могла объяснить их происхождения. Квантовая механика, наоборот, объяснила существо спектров, но не сумела рассчитать яркость спектральных линий. Значит, решил Бор, обе теории, старую и новую, надо сопрячь вместе. Это сопряжение следовало произвести там, где обе теории, хотя бы приблизительно, но совпадают.

Где же это может быть? Ведь, согласно классической физике, электрон, вращаясь вокруг ядра, все время сблизается с ним, пока не упадет на ядро. При этом, как уже говорилось, он излучает непрерывный спектр, в котором даже нет намека на отдельные линии.

А согласно квантовой механике, электрон в атоме излучает отдельные линии, или, как говорят иначе, дискретный спектр. Что может быть общего между обоими спектрами? Оказывается, общее все же есть.

Ступеньки энергетической лестницы электронных орбит имеют разную высоту. Эта высота тем меньше, чем дальше ступенька, чем удаленнее орбита от ядра. Энергетическая лесенка в атоме имеет такой вид, какой имеет длинная обыкновенная лестница, если смотреть на нее снизу вверх. Поднимая глаза, вы увидите, что ступеньки лестницы как бы сближаются, пока не сливаются вовсе. Разница в том, что сближение ступенек настоящей лестницы — это обман зрения, вызванный перспективой, а в атоме это сближение имеет место действительно.

Но высота энергетической ступеньки соответствует энергии фотона или длине волны его спектральной линии. Таким образом, длинноволновые линии спектра, соответствующие перескокам электронов между далекими от ядра орбитами, должны быть весьма близко расположены друг от друга. А это уже выглядит как почти непрерывный спектр!

Значит, длинноволновый участок «квантового» спектра не должен практически существенно отличаться от такого же участка «классического» спектра. Яркость в этом участке первого из спектров можно было попытаться рассчитать по классической физике. А затем этот расчет распространить на весь «квантовый» спектр. В этом и состоит принцип соответствия.

Что ж, мысль остроумная. Попытались применить ее на практике... и физиков постигла неудача. Опыт часто давал одни яркости линий, а теория — совсем другие.

Собственно говоря, иного было трудно ожидать. Не очень-то сильна та теория, которая не может объяснить какое-либо явление, не прибегая к помощи извне. А тем паче — к помощи теории, отвергнутой ею же!

Вводить в квантовую механику идеи классической физики — это все равно, что по понедельникам, средам и пятницам исповедовать «классическую религию», а по вторникам, четвергам и субботам — «квантовую религию». Так насмешливо говорил английский физик Брэгг. Хотя в науке подобное «двоебожие» не считается криминальным и даже иногда приносит пользу, оно все же — «грех» теории, свидетельство ее слабости.

Если присмотреться внимательнее, то окажется, что принцип соответствия — не единственное «грехопадение» теории Бора. В сущности, с самого своего начала, на всех своих основных положениях она несла явный отпечаток классической физики.

Теория Бора отказывалась от классических представлений о движении электрона. И вместе с тем она ввела понятие электронных орбит в атоме. Она с полной серьезностью считала, что электрон вращается в атоме вокруг ядра. И вкладывала в это такой же физический смысл, как, скажем, во вращение Земли вокруг Солнца.

Бор «запретил» электрону излучать на орбите, но никакого серьезного обоснования под этот запрет подвести не смог. Теория Бора правильно объяснила, как возникают фотоны в атомах, но сам этот процесс остался

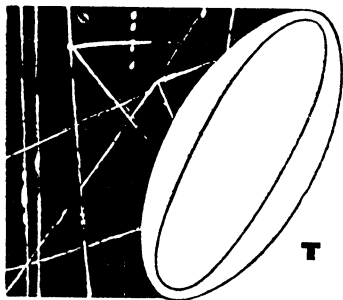
для нее совершенно таинственным. Он не вытекал ни из каких ее положений.

И такой половинчатый характер теории Бора не замедлил проявиться. Она быстро спасовала перед многими новыми фактами, которые не желали лезть в уготованные им рамки. Но отдадим ей должное.

Теория Бора была огромным шагом вперед в деле познания мира атомов. И все же шагом ограниченным. Многие объяснила она из того, что было непонятно и недоступно классической физике. Но не меньшее оказалось для нее непосильным объяснить.

Пришло время новых шагов. И вскоре они были сделаны.

Первый из них принадлежит французскому физiku Луи де-Бройлю.



т теории Бора — к квантовой механике

Удивительная статья

В сентябрьском номере английского физического журнала «Философичесал мэгэзин» за 1924 год появилась статья, подписанная малоизвестным именем: Луи де-Бройль. В этой статье автор излагал некоторые тезисы своей диссертации, посвященной обоснованию возможного существования волн материи.

Волны материи? Разве это не звуковые, не световые и тому подобные волны, которые уже давным-давно физики называли «своими именами», волны, вполне материальные, воспринимаемые нашими органами чувств или улавливаемые приборами?

Оказывается, нет. Речь в статье шла о совершенно других волнах. Мысли, высказанные де-Бройлем, были настолько необычными и парадоксальными, что они вполне могли соперничать с высказанной за четверть века до этого идеей Планка о квантах энергии. И не только по их значению для физики, но и по тому открытому недоверию, с которым они были вначале восприняты очень многими физиками.

Что же это за волны материи?

Прежде чем начать рассказ о них, нам придется коротко остановиться на «обыкновенных» волнах. К тому времени, когда Луи де-Бройль выступил со своей статьей, эти волны были изучены совсем неплохо.

Немного об обыкновенных волнах

Бросьте камень в воду — и от него пойдут круги. Эти круги — поверхностные волны на воде. Кстати говоря, поверхностные волны — практически единственный род волн, непосредственно видимых в своем движении.

Может показаться, что с кругами от камня удаляется и вода. Но это не так. Кто из вас в детстве не пытался подогнать к берегу игрушечный кораблик, далеко отплывший в лужицу? Детский ум подсказывал выход — бросать камешки в воду позади кораблика.

Волны от камешков проходили под корабликом, а он лишь покачивался на них вверх и вниз, почти не двигаясь с места. Это означает то, что вода, взбудораженная падением камня, не движется от места его падения, а лишь колеблется в волне вверх и вниз.

В высоких волнах, вызванных падением больших камней, вода все же удаляется от камня, хотя каждый раз и на незначительное расстояние. Набравшись терпения и располагая запасом камней, кораблик в конце концов удастся подогнать к берегу.

Это «несущее» свойство высоких поверхностных волн с большим искусством используют любители своеобразного спорта, распространенного в Австралии. Спортсмены выходят в море, когда на нем появляется крупная и регулярная волна. Ступив с катера на широкую нетонущую доску, они дожидаются момента, когда появляется высокий вал. «Оседлав» этот вал, спортсмены несутся на нем к берегу со скоростью чуть ли не курьерского поезда! Но малейшее неточное движение — и спортсмен оказывается не на гребне, а во впадине волны, и его с головой захлестывает вал.

В этом рискованном и захватывающем спорте волна выполняет роль носителя спортсмена, она словно пилотирует его к берегу. Запомните это сочетание слов — «волна-пилот». Мы к нему вернемся в дальнейшем рассказе.

В прошлом веке физики выяснили, что волновым движением является и звук. Звуковые волны могут распространяться и в воздухе, и в воде, и в твердых телах. Что же колеблется в звуковых волнах? Частички среды, по которой распространяется звук, — молекулы воздуха, воды, атомы твердых веществ.

Но уберите воздух, воду, землю, — и звуковые волны исчезнут. В безвоздушном пространстве звука нет. Будущим астронавтам, наверное, предстоит увидеть ни с чем не сравнимое зрелище — грандиозные извержения вулканов на далеких, лишенных атмосферы планетах, — извержения, происходящие в гробовой тишине! Только почва качается под ногами! Рев двигателей космической ракеты, невыносимый для человеческих ушей на Земле, полностью исчезнет на Луне.

В прошлом веке физикам удалось также понять природу электромагнитных волн, создаваемых движением электрических зарядов.

На Землю приходят свет и радиоволны от далеких звезд и туманностей. Они начали свое путешествие тысячи и миллионы лет назад. На своем пути они преодолевают огромные и почти пустые межзвездные пространства. На Луне, в совершенном безмолвии, астронавты увидят струи ослепительного огня, вырывающегося из днища космической ракеты.

Значит, можно видеть там, где ничего не слышно,— в пустоте. В этом— важнейшее отличие электромагнитных волн от механических, в том числе и звуковых. Для распространения электромагнитных волн промежуточной среды не требуется. Напротив, эта среда только замедляет их движение.

Первое знакомство с „волнами материи“

Но вернемся к «волнам материи».

Де-Бройль в своей работе утверждает, что эти волны порождаются при движении любого предмета, будь то планета, камень, пылинка или электрон. Волны эти, подобно электромагнитным волнам, способны распространяться в совершенной пустоте. Значит, они не механические волны.

Но они могут создаваться при движении любых, в том числе и электрически не заряженных, тел. Значит, они и не электромагнитные волны!

Других же волн в то время физика не знала. Выходит, что «волны материи»— действительно какие-то новые, дотоле не известные волны. Совершенный вздор, говорили старые физики, покачивая головами.

Они глубоко убеждены в том, что все волны, какие только могут существовать, уже известны физике. Этот молодой человек Луи де-Бройль говорит о волнах материи, а разве механические и электромагнитные волны — не волны материи? Без материи не то что волн,— ничего не существует!

Де-Бройль действительно придумал не очень-то удачно название для своих волн. Но что поделать? Открываемые явления часто получают «ярлычок» гораздо раньше, чем сами же ученые начинают правильно понимать сущность своих открытий.

Так получилось и с де-Бройлем. Сущность «волн материи» оказалась настолько необычной, настолько сложной, что физики уже поломали целый лес копий, споря о ней. Да и сегодня еще ломают!

Нам предстоит познакомиться с этой сущностью поближе. Именно мысль де-Бройля легла в основу современной квантовой механики.

Почему мы не замечаем волн де-Бройля?

Этот вопрос, вероятно, был одним из первых, поставленных недоуменными физиками перед де-Бройлем. Ответ на него хорошо бы начать с вопроса: а как мы вообще замечаем волны? Речь идет, конечно, не только о на-

ших органах чувств. Они в этом отношении не могут блеснуть своим могуществом.

Наше ухо улавливает звуки с частотами примерно от 20 до 16 000 колебаний в секунду. Эти частоты соответствуют длинам звуковых волн в воздухе примерно от 17 метров до 2 сантиметров. Глаз наш реагирует на световые волны с длинами примерно от 0,4 до 0,8 микрона. Таковы те «окна», которые предоставила нам природа для познания волн (если не считать, конечно, поверхностных волн, например волн на море).

С помощью специальных приборов физики преобразуют непосредственно не улавливаемые нами волны в те, длины которых лежат в области упомянутых двух «оконов». Это весьма значительно расширяет доступную нашему познанию область волновых явлений. С помощью радиоприемников можно улавливать и изучать радиоволны длиной в несколько метров и сантиметров, приходящие на Землю из глубин Вселенной. Сцинтилляционные счетчики¹ дают возможность обнаруживать гамма-лучи, испускаемые атомными ядрами,— электромагнитные волны с длинами в миллиардные доли миллиметра.

Как видно, диапазон улавливаемых длин волн действительно весьма большой. Почему же не удалось бы уловить волны де-Бройля?

А чем их улавливать? Механические, например, звуковые волны длиной в несколько метров мы можем уловить ухом. Но эти же волны не уловит никакой радиоприемник, даже настроенный на нужную длину волны. Он ловит только радиоволны. И, наоборот, радиоволны, даже длиной в эти несколько метров, не уловит ни ухо, ни любой другой механический прибор.

Каждый род приемника отзывается только на «свой» род волн: ухо — на звуковые волны, глаз — на электромагнитные. Чем же в таком случае улавливать волны де-Бройля? Ведь они — ни те и ни другие!

Это, если угодно, первый ответ на поставленный выше вопрос. Более полный ответ вы найдете в дальнейшем рассказе.

Второй ответ последует, если мы попытаемся выяснить длину «волн материи». Де-Бройль получил соотношение, связывающее длину новых волн с массой и скоростью движущихся тел. Оно выглядит так:

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

В этом соотношении буквой λ («лямбда») обозначена длина дебройлевской волны, m и v — соответственно масса и скорость тела, h —... а это наша старая знакомая — постоянная Планка.

¹ В сцинтилляционных счетчиках для регистрации ядерных частиц и гамма-квантов используются специальные кристаллы. Попадание в них частиц или квантов излучения вызывает вспышку света, которая регистрируется с помощью чувствительных приборов.

Появление ее здесь весьма многозначительно. Оно говорит о том, что волны де-Бройля имеют действительно особый, квантовый характер. На этом важном вопросе мы остановимся позже, а пока выясним, какие длины волн соответствуют, согласно де-Бройлю, движению окружающих нас предметов. Сделаем несложный подсчет для планеты, камня и электрона.

Но еще до обращения к цифрам видно, что длины этих волн должны быть необычайно малы. Ведь в числитель соотношения де-Бройля входит постоянная Планка, величина которой, как мы помним, исключительно мала: $6,6 \cdot 10^{-27}$ эргов на секунду.

Возьмем в качестве планеты Землю. Масса ее составляет $6 \cdot 10^{27}$ граммов, скорость движения по орбите вокруг Солнца — примерно $3 \cdot 10^6$ сантиметров в секунду. Внося эти цифры в соотношение де-Бройля, находим длину земной волны:

$$\lambda = \frac{6,6 \cdot 10^{-27}}{6 \cdot 10^{27} \cdot 3 \cdot 10^6} = 3,6 \cdot 10^{-61} \text{ сантиметра.}$$

Величина сверхничтожно малая! Никакими существующими или теми, которые появятся в ближайшем будущем, приборами зарегистрировать волну такой длины, конечно, нечего и надеяться! Чтобы почувствовать малость этой величины, не помогут никакие волны сравнения.

Посмотрим, каково положение с длиной волны камня. Пусть камень весом 100 граммов брошен со скоростью 100 сантиметров в секунду. По формуле де-Бройля находим:

$$\lambda = \frac{6,6 \cdot 10^{-27}}{100 \cdot 100} = 6,6 \cdot 10^{-31} \text{ сантиметра.}$$

Положение ничуть не лучше, чем с земной дебройлевской волной! Уловить такую волну — по-прежнему дело совершенно безнадежное. Эта длина волны — все еще в миллиард миллиардов раз меньше размеров столь ничтожного, не видимого ни в какие микроскопы предмета, как атомное ядро.

А теперь обратимся к электрону. Масса его составляет приблизительно 10^{-27} грамма. Если электрон начинает двигаться в электрическом поле с разностью потенциалов в 1 вольт, то после прохождения ее он набирает скорость около $6 \cdot 10^7$ сантиметров в секунду. Подстановка этих цифр в соотношении де-Бройля дает:

$$\lambda = \frac{6,6 \cdot 10^{-27}}{6 \cdot 10^7 \cdot 10^{-27}} = 10^{-7} \text{ сантиметра.}$$

Теперь положение совсем другое! 10^{-7} сантиметра соответствует примерно длинам волн рентгеновых лучей, а их ученые уже умеют обнаруживать. Это означает, что электронная волна де-Бройля может быть в принципе как-то уловлена.

Волна есть!

Но как это можно сделать?

Не так-то это просто. Перефразируя известную поговорку, можно сказать: «Видит разум, да око неймет!» Волна де-Бройля существует в теории, а никаким «оком», никаким известным прибором, казалось бы, не поймать ее. Ведь она, как уже сказано, по самому своему характеру должна ускользать от любых известных приемников.

Но не надо опускать рук. Волна есть волна. Обязательно должно найтись явление, в котором волна, какую бы она ни имела природу, проявит свои свойства. Ученые решили попробовать поймать волну де-Бройля на давно известном явлении дифракции.

Дело в том, что дифракция — сугубо волновое явление. Заключается оно в том, что волна, наталкиваясь на какое-либо препятствие на своем пути, обходит его. При этом волна отклоняется от прямолинейного пути своего распространения и частично заходит в область «тени» за препятствием.

Картина дифракции волн от круглого препятствия или от круглого отверстия в непрозрачном для волн экране имеет характерный вид системы перемежающихся темных и светлых колец. Их можно заметить, например, глядя на уличный фонарь через запыленное стекло. В морозные ночи вокруг Луны образуются несколько светлых и темных колец: это лунный свет испытывает дифракцию на мельчайших кристалликах льда, парящих в воздухе.

Там, где обнаруживается дифракция, можно уверенно сказать: «здесь — волна!» Именно открытие дифракции света в начале девятнадцатого века явилось одним из самых убедительных аргументов в пользу волновой теории света.

Однако длины световых волн в сотни и тысячи раз превышают те, которые должны были иметь дебройлевские волны электронов. Устройства, придуманные для создания дифракции света, — все эти щели, экраны, дифракционные решетки, — оказываются явно слишком грубыми. Ведь размеры препятствий, на которых наблюдается дифракция волны, должны быть сравнимы с ее длиной или же быть меньше ее. Что хорошо для света, то не годится для дебройлевских волн.

На каких же предметах можно было пытаться обнаружить дифракцию дебройлевских электронных волн? К 1924 году такие предметы были известны. Еще за двенадцать лет до этого немецкий ученый Лауэ обнаружил дифракцию рентгеновых лучей на кристаллах. На фотопластинке, облученной рентгеновыми лучами, прошедшими через кристалл, Лауэ отметил ряд темных и светлых пятен. А еще через несколько лет Дебай и Шеррер, повторив опыт Лауэ на мелкокристаллических образцах порошков, получили и сами дифракционные кольца. Дифракция в этих случаях оказалась

возможной потому, что расстояния между атомами в кристаллах (своего рода «щели» в непрозрачном для рентгеновых лучей «экране») имели тот же порядок величины, что и длины волн рентгеновых лучей: 10^{-8} сантиметра.

Но длины дебройлевских волн для электронов лежат как раз в этой области! Значит, если эти волны действительно существуют, то, проходя через кристалл, электроны должны давать на фотопластинке такую же дифракционную картину, как и рентгеновы лучи.

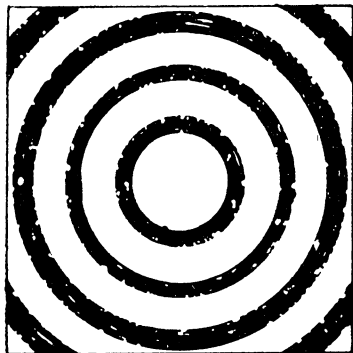
Спустя несколько лет после того, как де-Бройль высказал свою идею, американские ученые Дэвиссон и Джермер и советский физик П. С. Тартаковский проверили ее прямым опытом — опытом по дифракции электронов на кристалле.

Одной лишь аналогии между «электронными» и рентгеновыми лучами при этом оказалось недостаточно. Постановка опыта потребовала от ученых большой изобретательности и остроумия.

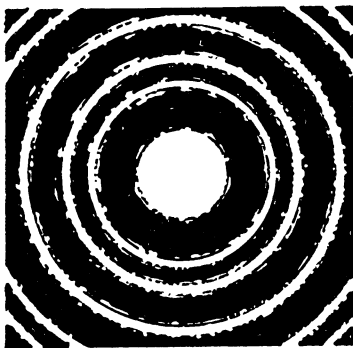
Рентгеновы лучи проходили через кристалл почти беспрепятственно. Электроны же полностью поглощались в слое кристалла толщиной всего лишь в доли миллиметра. Поэтому следовало либо взять очень тонкие кристаллические пластинки, например металлические фольги, либо же, как говорят физики, работать не на просвет, а на отражение. При этом пучок электронов направлялся под малым углом к грани кристалла, так что электроны как бы скользили по ней, не заходя глубоко в кристалл и отражаясь от него обратно. В результате электроны испытывали дифракцию только на атомах самых внешних слоев кристалла. Для регистрации испытавших дифракцию элект-

тронов были использованы фотопластинки¹.

Тартаковский посылал пучок электронов на тончайшую фольгу, состоящую из множества мельчайших кристалликов... Несколько минут выдержки.



РЕНТГЕНОГРАММА



ЭЛЕКТРОНОГРАММА

¹ Электроны могут засвечивать фотопластинку так же, как видимый свет или рентгеновы лучи.

И вот экспонированную на электронном пучке фотопластинку унесли в темное помещение и положили в проявитель. Медленно, медленно проступают на ней контуры снимка. Нетерпение ученых все возрастает. Не дожидаясь конца проявления, пластинку извлекают из воды, подносят к свету...

Есть! Есть дифракционные кольца!

Слабенькие, еле заметные на глаз, они бесконечно радуют сердца ученых. Как бесценное сокровище пересылают эти первые пластинки в крупнейшие физические лаборатории мира. Снимки придиричиво, внимательно изучают, — но сомнений больше нет!

Невероятно смелая гипотеза де-Бройля о «волнах материи» блестяще подтверждается опытом. Электроны обнаруживают, помимо свойств частиц, еще и свойства волн!

Двуликие частицы

Ученые — народ нетерпеливый. Они пытаются понять сущность волн де-Бройля еще до осуществления этих решающих экспериментов. Как же можно представить себе такое «двусмысленное» поведение частиц, в том числе и электронов?

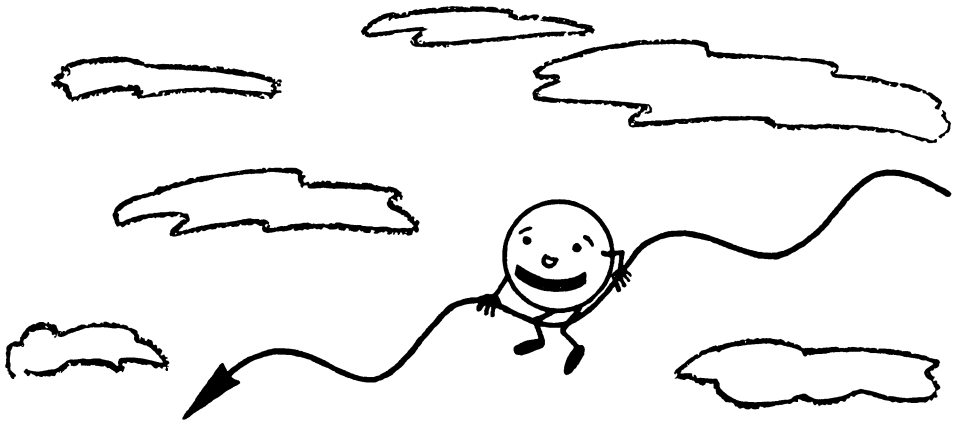
Физики того времени знали, что они подразумевают под словом «электрон». Очень маленькую и очень легкую частицу вещества, несущую на себе столь же малый электрический заряд. До поры до времени не ставился вопрос, какую форму имеет эта частичка и что происходит внутри нее. Ученые не располагали никакими средствами увидеть электрон воочию, а тем паче разобраться в его внутренней структуре.

Но раз электрон частица—так пусть он обладает только ее свойствами! Откуда же взялись у электрона совершенно другие, более того — исключющие первые, волновые свойства?

Первая попытка осмыслить сущность «волн материи» принадлежит самому де-Бройлю. Она ясно показывает, что, проникнув в мир сверхмалых вещей, физики по привычке еще продолжают «цепляться» за наглядные представления. Атом в теории Бора — Резерфорда можно было представлять себе как некое подобие планетной системы, в которой планеты-электроны кружатся вокруг солнца-ядра, только, в отличие от планет, могут время от времени менять свои орбиты.

Но вот световой квант — фотон? Он ведь тоже, как показал Эйнштейн, обладает свойствами и волны, и частицы. Как можно было внедрить в сознание такой двуликий образ? Здесь уже нечего и пытаться придумать наглядную модель!

Так в физике выявилась первая «непредставимая» вещь. Теперь же, с открытием де-Бройля, предстояло распространить эту «невообразимость»



и на частицы вещества, — от ничтожного электрона до огромных небесных тел! Было от чего попятиться!

И как можно даже вообразить, что электрон, летящий на препятствие, в результате дифракции сам по себе огибает его и оказывается позади препятствия! Нет, волна и частица — это две взаимоисключающие сущности. Либо волна — либо частица!

А все же волны де-Бройля существуют. Значит — не «либо—либо», а «и—и»! Надо как-то соединить несоединимое. И не в каком-то отдельном случае дифрагирующего электрона. Раз имеет волновые свойства электрон, то их неизбежно должны иметь и все предметы в нашем мире, как мельчайшие, так и огромные.

С чего же начинать этот необычный синтез? Де-Бройль предлагает представление о «волне-пилоте».

„Волна-пилот“

Вспомним увлекательный спорт — катание на волнах. Вот спортсмен прыгнул на гребень высокой волны и несется на ней к берегу. Волна как бы ведет, пилотирует доску со спортсменом.

Мысль де-Бройля состоит в том, что «волны материи» пилотируют движущиеся частицы вещества каким-то внешне подобным образом. Словно сидит частица в волне, как в мягком кресле, и движется туда, куда влечет ее «волна материи».

Длина этой волны, полагает де-Бройль, может быть очень большой. При небольших скоростях движения электрона длина электронной волны оказывается во много тысяч раз больше его «размеров». По мере убыстрения движения частица как бы вбирает в себя волну, волна становится

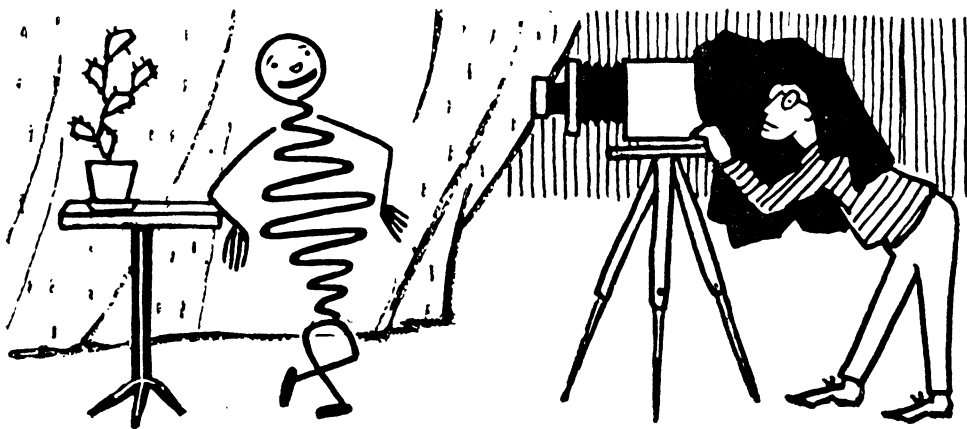
короче. Но все равно, даже при колоссальных скоростях движения длина электронной волны все еще в десятки раз больше «размеров» самого электрона.

Не так уж существенно, кто кого ведет — электрон волну или волна электрон. Важно, что эта волна связана с электроном навеки и неразрывно. Электрон — не спортсмен, который может оседлать волну и спрыгнуть с нее в любой момент. Электронная волна исчезает, только когда электрон останавливается. В этот момент знаменатель в соотношении де-Бройля обращается в нуль, а длина волны — в бесконечность. Другими словами, гребень и впадина волны расходятся друг от друга так далеко, что электронная волна перестает быть волной.

Что ж, представлению де-Бройля нельзя отказать в некоторой наглядности. Электрон, усевшийся в своей собственной волне, можно даже изобразить на бумаге. Но откуда взялась сама эта волна? Она существует вместе с частицей даже тогда, когда последняя движется и в совершенной пустоте. Значит, эта волна может быть порождением только самой частицы. Как же происходит это порождение?

Гипотеза де-Бройля по этому поводу ничего не может сказать. Ну, хорошо может быть, тогда пусть гипотеза объяснит, каково взаимодействие между частицей и ее волной, как волна движется вместе с частицей, как разделяет судьбу частицы при ее взаимодействиях с другими частицами и полями, например при налетании частиц на препятствия или при попадании их на фотопластинку? Нет, и этого гипотеза не объясняет достаточно убедительно.

В поисках выхода из этого положения де-Бройль пытается выбросить из игры частицу. Почему бы не представить себе, что сама волна и есть ча-



стица! Иными словами, что частица представляет собой некое компактное образование из своих волн — «волновой пакет», как его называли физики. «Пакет» должен состоять из небольшого числа довольно коротких волн, а потому при встрече двух или более «пакетов» они будут вести себя подобно частицам. Совсем как коротковолновый фотон, когда он выбивает электрон из металла! При этом сколь бы компактным ни был «пакет», сколь он ни походил бы по свойствам на частицу, он все-таки состоит из волн. А значит, найдутся явления, в которых он сможет обнаружить свою «первозданную» волновую сущность.

Однако и такое предположение отвергает неумолимая природа. Оказывается, что из волновых пакетов, какими они компактными ни были бы, составить частицу невозможно принципиально. Дело в том, что эти пакеты, даже в полной пустоте, быстро расплываются со временем! Уже за ничтожные промежутки времени пакет настолько размазывается в пространстве, что прежде компактная частица оказывается в поистине «гомеопатическом» разведении! Между тем, как известно, частицы вполне устойчивы, и нет даже намека на их расплывание со временем.

Итак, и эту «наглядную» модель приходится оставить. Механическое соединение взаимоисключающих сущностей волны и частицы в одном образе не удалось. Как выяснилось впоследствии, такое соединение и не могло утаться. Однако де-Бройль продолжал отстаивать своего «кентавра» с головой частицы и телом волны.

Прошло два года. Летом 1927 года физики всего мира съехались в Брюссель на Сольвеевский конгресс. На этом конгрессе представление де-Бройля о связи волн и частиц получило полное и сокрушительное непризнание. На многие годы восторжествовало совершенно другое представление об этой связи, которое высказали на съезде молодые немецкие физики Вернер Гейзенберг и Эрвин Шредингер.

Вместе или поодиночке?

Гейзенберг и Шредингер, похоронив представления де-Бройля, сказали над ними, однако, столь громкое «надгробное слово», что оно определило все дальнейшее развитие квантовой механики.

Основная идея де-Бройля о волнах, сопровождающих движение тел, была быстро подхвачена молодыми учеными в ряде стран. Не прошло и года с момента появления первой статьи де-Бройля, как немецкий физик Макс Борн предложил свое понимание дебройлевских волн.

Заинтересовался этим вопросом и ученик Борна Гейзенберг, тогда еще только начинавший свой путь в науке. Оживленно обсуждали работы де-Бройля и в небольшом кружке физиков, в котором участвовал Шредингер.

И вот... Но пусть читатель не посетует на то, что мы не будем в нашем рассказе придерживаться хронологической последовательности событий.

Так, заключительные эпизоды фильма, показанные в самом его начале, помогают лучше уяснить происходящее, сообщают особый драматизм действию.

Вспомним опыт, доказавший дифракцию электронов. В нем пучок электронов падал на кристалл (или на очень тонкую металлическую фольгу). Электроны пучка, испытав дифракцию на атомах кристалла, попадали на фотопластинку и засвечивали ее. На пластинке образовывались дифракционные кольца.

К сказанному можно еще добавить, что пучок электронов, создаваемый раскаленной металлической нитью, специально формировался. Между источником и кристаллом располагалась диафрагма с небольшим круглым отверстием. В результате после прохождения диафрагмы электронный пучок имел вполне определенные поперечные размеры.

Что произошло бы, если мы прервали бы этот опыт в самом начале, когда количество прошедших через диафрагму электронов не превысило, скажем, нескольких десятков? На проявленной фотопластинке мы увидели бы нечто похожее на мишень, по которой стрелял неопытный новичок. Темные пятнышки, соответствующие попаданиям отдельных электронов, разбросаны по пластинке совершенно случайно.

Удлиняя продолжительность опыта, мы заметили бы все более отчетливо проявляющуюся регулярность в расположении мест попадания электронов. И после нескольких тысяч попаданий на фотопластинке появились бы четкие темные и светлые кольца, которые и были обнаружены исследователями.

Интересное обстоятельство! Напрашивается мысль, что пока в дифракции участвует мало электронов, никаких волновых свойств они не обнаруживают, что эти свойства возникают лишь для большого числа электронов. Иными словами, можно было бы думать, что волновые свойства частиц проявляются только в больших их «коллективах».

Так ли это? Ответ дает опыт. Это — все тот же опыт с дифракцией электронов. Но, оказывается, его можно поставить по-разному. Можно взять мощный источник электронов и экспонировать на них фотопластинку короткое время. Дифракционная картина тогда образуется быстро.

А можно взять слабый источник электронов и соответственно удлинить выдержку. Но если в обоих случаях на пластинку попадет одно и то же число электронов, то получатся совершенно одинаковые дифракционные картины.

Это очень важно. В первом случае, когда электроны испытывают дифракцию на кристалле «все вдруг», еще можно говорить о каком-то их «коллективе». Но во втором случае, когда электроны падают на кристалл чуть ли не поодиночке, понятие «коллектива» к ним вряд ли можно применить.

Не назовете же вы бригадой нескольких рабочих, если один из них сва-

ривал стык пути сегодня, другой передвинул шпалу через неделю, а третий закрепил болты через месяц!

Картина оказывается одинаковой и тогда, когда электроны претерпевают дифракцию одновременно тысячами, и тогда, когда они это делают единицами. Значит, из этого можно получить только один вывод. Каждый из электронов проявляет свои необычные свойства независимо от других. Так, как если бы этих других электронов не существовало вовсе.

Мы едем на стрельбище

Вернемся к нашей «испорченной мишени». Она создана небольшим числом электронов, упавших на пластинку. На вид электроны ударились о пластинку где попало, совершенно случайно.

Одно сразу привлекает внимание. Проведем щель в диафрагме, из которой вылетают электроны, и перенесем ее контуры на нашу мишень. Кажется бы, все электроны, как бы случайно они ни попадали на фотопластинку, должны «уложиться» внутри этого контура. А на самом деле? Места попадания электронов подчас далеко выходят за предписанные им границы.

И вот что еще интересно. Если присмотреться внимательнее, то можно заметить, что электроны попадают на пластинку все-таки не совсем случайным образом. Даже когда число «пробойн» на мишени еще не велико, на ней можно увидеть места, где нет ни одной пробойны, а также места, где пробойны группируются более или менее скученно. Если провести через эти места линии, то они будут напоминать колечки. Вот одно колечко, второе, третье.

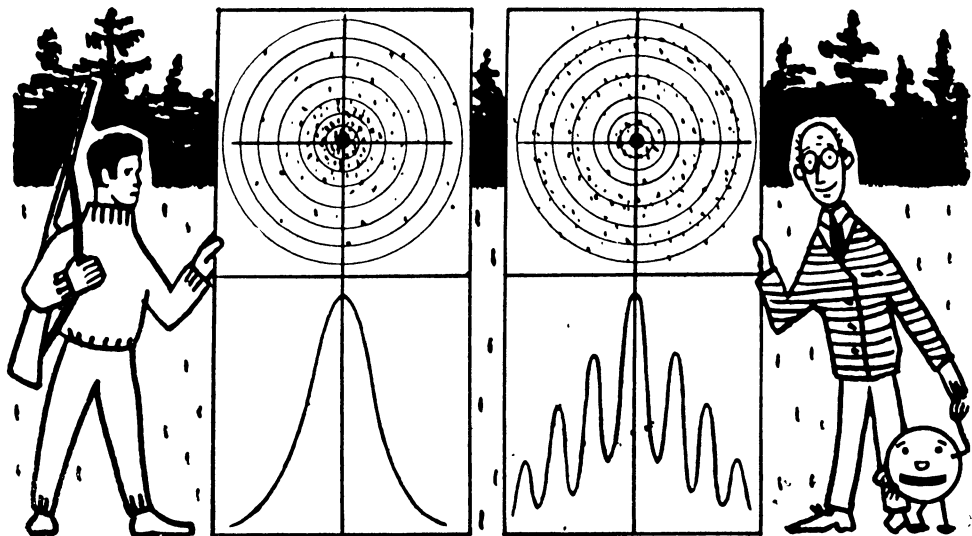
Правда, они проведены еще почти «на ощупь». Им еще предстоит стать настоящими отчетливыми кольцами, когда число электронов, упавших на пластинку, возрастет во много раз.

Задумаем маленькую хитрость. Перенесем точки попадания электронов на обычную стрелковую мишень, продырявив ее в соответствующих местах. И поедem на стрельбище, где тренируются опытные стрелки. Покажем им нашу мишень. Реакция стрелков окажется наверняка необычной.

Первоначальное недоумение их сменяется смехом: «Вы только посмотрите, какой забавный стрелок! Он меткий — вон сколько пуль всадил в десятку. Но почему нет ни одной пули ни в девятке, ни в восьмерке? Ваш стрелок, видно, предпочитает всаживать пули только в десятку, в семерку, в четверку и в единицу. Это что — нарочно?»

Мы не собираемся пока открывать им секрет. А вот и тренер смотрит нашу мишень. Он задумчиво хмурит лоб. Послушаем, что он скажет.

«Какая-то ерунда! Ни один стрелок не сделает такую мишень, как бы он ни старался. Почему, вы спрашиваете? А вот почему.



Если стреляет неопытный стрелок, то пробойны на мишени лягут как попало, но в общем более или менее равномерно по всей мишени. Мишень опытного стрелка выглядит совсем по-другому. Вот смотрите: пробойны гуще всего ложатся ближе к центру мишени, а во внешних ее кольцах их совсем мало. Давайте сосчитаем число пробойн в каждом из колец этой мишени и построим график.

Отложим по одной его оси номер кольца (или, что то же, удаление от центра мишени), а по другой оси — число пробойн между двумя кольцами. Полюбуйтесь, что получилось. Видите — кривая плавно идет вниз при удалении к краям мишени.

А теперь нанесем на график вашу мишень... Ну вот, смотрите. Ваша кривая, вместо того чтобы плавно опуститься от центра мишени к ее краям, колеблется вверх и вниз. Она действительно опускается, но совсем не так, как наша кривая.

У нас, опытных стрелков, все же действуют законы случая. И кривую, которую я вам приводил, так и называют кривой распределения случайных ошибок, или кривой Гаусса. У вас тоже, видимо, действует случай. Но он подчиняется какому-то совсем другому закону. На стрельбище такой закон еще никогда не встречался. Это что-то новое!»

Что же, благодарим тренера и вернемся к нашей «мишени».

Волны вероятности

Тренер был прав. Действительно, нарисованная им волнообразная кривая в практике стрельбы не встречалась, да и никогда не встретится. Электроны — не пули. Пуля имеет слишком большую массу, чтобы обнаружилось ее волновые свойства.

Вот эту-то кривую распределения электронных следов на фотопластинке после их отражения от кристалла Борн и предложил считать волной де-Бройля...

Постойте, но какое отношение имеет «бумажная» волна к настоящей волне, которая должна существовать в реальных условиях? Эта волна движется вместе с электроном, а наша «покоится» на бумаге!

Отношение, однако, существует. График попаданий электронов на фотопластинку не взят из головы. Он как-то отражает существование реальной волны, связанной с движущимся электроном. Но смысл эта волна имеет совершенно отличный от того, какой ей придал де-Бройль.

Как представляет движение электрона классическая, ньютоновская физика? Она говорит вполне определенно: электрон, вылетевший из отверстия диафрагмы, должен двигаться по прямой линии, пока не упадет на кристалл. Затем электрон отражается от атома кристалла, примерно так, как отскакивает шар, посланный под углом к борту бильярда. Наконец, двигаясь от кристалла по прямой, электрон попадает на фотопластинку и оставляет на ней след.

Здесь нет стрелка, у которого может дрожать рука, устать глаз. Здесь нет ветра и потоков нагретого воздуха от земли, которые могут нарушить точность прицеливания. Здесь идеальные условия для стрельбы, а значит, должна быть идеальная меткость, — все попадания в «десятку». Иными словами, электроны должны воспроизвести на фотопластинке точный контур отверстия в диафрагме. Если это отверстие — малюсенькая дырочка, то на снимке тоже должна получиться небольшая точка — и ничего больше.

Но электроны не желают следовать классическому закону. Вместо маленькой точки на пластинке — целая группа светлых и темных колец. И дело здесь не в неметкой стрельбе. Даже если на минуту допустить, что она могла быть, то ведь в этом случае электроны рассеялись бы по пластинке, следуя закону Гаусса. На самом же деле они рассеиваются по совершенно другому — по «волновому» закону.

И график распределения электронов по фотопластинке имеет не просто внешнее сходство с волной. Такой же вид имеет график интенсивности дифракционной картины от света, от рентгеновых лучей. А они-то уж действительно являются волнами!

Волновые свойства электронов, таким образом, проявляются тоньше, чем это мыслилось де-Бройлю. Электронная волна — это не самолет, в ко-

тором пассажиром едет электрон. В данном случае она определяет вероятность попадания электрона в какое-либо место фотопластинки. Поэтому ее уместно назвать «волной вероятности», как это предложил Макс Борн.

Как вероятность была допущена в физику

В классической физике до некоторых пор слово «вероятность» даже не появляется. Движение любой частицы, любого тела считается абсолютно строго и точно predetermined теми силами, которые на них действуют. Положение тела и его скорость в любой момент времени — и через секунду, и через миллион лет — можно предсказать совершенно достоверно, зная эти силы и положение тела в тот момент, от которого мы начинаем отсчет времени.

Но вот в середине девятнадцатого века физика обращается к изучению внутреннего движения в газах. И сразу же выясняется, что применять к движению молекул газа непосредственно уравнения Ньютона — дело совершенно бессмысленное.

Судите сами. Уже в небольших объемах газа содержится колоссальное количество молекул — миллиарды миллиардов. Чтобы точно решить задачу об их движении, потребовалось бы написать уравнения движения для каждой из молекул. Молекулы не стоят на месте: они носятся по сосуду, сталкиваются с другими молекулами, отскакивают от одних, налетают на другие молекулы, и так миллионы раз в секунду.

Выходит, надо писать столько уравнений Ньютона, сколько молекул газа, и решать все их? Смешно даже говорить об этом! Только на выписывание самих уравнений уйдут миллиарды лет! Еще через миллиарды лет получишь их решение. А кому оно нужно, если описываемое им движение давным-давно сменилось совершенно другим?

В поисках разумного подхода к этой задаче физики сообразили, что их не должно интересовать движение каждой отдельной молекулы газа, меняющееся из-за столкновений с другими молекулами с неуловимой быстротой. Скорее следовало интересоваться состоянием всей массы газа: его температурой, плотностью, давлением и другими характеристиками.

Нет нужды определять скорости каждой из молекул. Все характеристики состояния должны относиться ко всей системе молекул в целом. А определяются они в основном средней скоростью молекул газа. Чем выше эта скорость, тем больше температура. Если газ при этом не меняет своего объема, то с ростом температуры газа повышается его давление.

Но чтобы эти зависимости знать точно, нужно было научиться определять среднюю скорость молекул. И тут на помощь физикам пришла теория вероятностей.

Она говорила: «Нечего и думать, что все молекулы в газе в каждый момент времени имеют одинаковую скорость. Напротив, они имеют разные

скорости, и притом быстро и беспорядочно меняющиеся при столкновениях. Однако, несмотря на случайность этих изменений скорости, в каждый момент существует некоторая средняя, устойчивая при данных условиях, скорость молекул. То, что кажется случайностью для одной молекулы, становится закономерностью для большого их числа. Это утверждает вероятностный закон больших чисел. А число молекул в ваших объемах газа действительно столь велико, что этот закон можно применять к ним без малейших сомнений».

Так физики стали рассчитывать поведение больших «коллективов» молекул статистически, по законам теории вероятностей. Но физики не желали согласиться с теорией вероятностей в другом. Они говорили: ни о какой случайности движения молекул не может быть и речи! Каждый удар молекулы о другую, каждое движение молекулы описывается законами Ньютона, и если бы мы пожелали решить миллиарды уравнений, мы бы смогли выразить эти движения с абсолютной точностью, без всяких средних величин! Мы этого не делаем, конечно. Но в принципе — можем! Мы описываем движение газа, пользуясь вероятностными, статистическими законами, но в основе их все-таки лежат точные законы — законы Ньютона!

В этом-то и заключалась «самонадеянность» классической физики! Никаких оснований она не имела обобщать законы Ньютона, распространять их на движение отдельных молекул. Так показало последующее развитие физики. Молекулы — не бильярдные шары, они движутся и сталкиваются по совершенно другим законам!

Осторожные предсказания

Это — новые законы. Законы, которым подчиняются сверхмалые частицы — электроны, атомы, молекулы.

Первыми свое «непокорство» проявили электроны. Они не пожелали лезть в уготованные им классической физикой рамки «благопристойного поведения». Вместо того чтобы попадать в предназначенные им места фотопластины, электроны стали двигаться так...

— ...Как они захотят, как им диктует «свобода воли!» — вскричали некоторые ученые, в самое сердце пораженные непослушанием электронов.

Нетрудно видеть, куда этих ученых завела столь слабая разборчивость в философии. Раз электрон обладает «свободой воли», то ему, как анархисту, любые законы не писаны. А коли так, то к чему наука, ищущая законы, если этих законов и в помине нет? Господь бог наделил своим промыслом электрон (в таком случае — и все вещи в мире) свободой поведения, свободой от всяких законов, за исключением одного — божественного закона своего существования. Но сей закон науке познать не дано, до него можно дойти только верой. Не правда ли, в хорошенькое идеалистическое болото приводит проповедь «свободы воли» электрона?!

— ...Как им диктуют новые законы, справедливые там, где утрачивают правильность законы классической физики! — заявили ученые, стоящие на материалистических позициях.

Такое положение в свое время гениально предвидел Ленин. За двадцать лет до описываемых событий он предупреждал ученых, что, с какими бы удивительными свойствами электронов ни пришлось им встретиться, эти свойства означают только одно — более глубокое и правильное постижение людьми окружающего мира.

Электроны отказываются следовать законам классической физики, но зато подчиняются законам новой, квантовой механики.

Что же это за законы? Прежде всего — это законы вероятностные.

О чем говорят светлые кольца на фотопластинке (негативе) в опыте дифракции электронов? О том, что электроны в эти места пластинки не попадают. Значит, «свободы воли» у электронов все-таки нет: существуют места, куда они не могут попасть.

На фотопластинке наблюдаются и темные кольца, где оказывается больше всего попаданий электронов. Но туда идут не все электроны. Есть на пластинке и переходные «серые» участки между самыми темными и самыми светлыми участками, туда приходит «среднее» число электронов. Это все хорошо видно на том графике распределения попаданий, который нарисовал нам тренер.

И теперь мы переходим к самому важному.

Вот из источника вылетел электрон, прошел через диафрагму, отразился от кристалла и понесся к фотопластинке. Куда, в какое место пластинки попадет именно этот электрон?

«Вот сюда», — показывает классическая физика, произведя кропотливые расчеты углов, расстояний и скоростей. И весьма часто попадает пальцем в небо.

«Не знаю точно, — отвечает квантовая механика, — но с наибольшей вероятностью в места темных колец, с меньшей вероятностью на серые участки и наименее вероятно в места светлых колец».

Осторожное предсказание! Даже странно от науки, претендующей на звание точной, слышать такой ответ. Да полно, наука ли это?

Действительно, физикам того времени все еще куда больше импонировали «абсолютно точные» предсказания классической физики. Но, если вдуматься, какое хвастовство скрывалось за такими предсказаниями, хвастовство и... невежество!

В самом деле, что еще можно сказать о науке, которая только-только начала познавать бесконечно сложный мир, которая не знает еще и ничтожной доли происходящих в нем явлений, — и при всем при том берется делать категорические заявления!

Но мы, пожалуй, слишком строго накинулись на классическую физику. Все-таки надо отдать ей должное: в привычном нам мире больших вещей

она работает совсем неплохо. Да и как она могла знать о своем невежестве до открытия квантов, волновых свойств частиц и многих других поразительных вещей?

Конечно, любая наука стремится к возможно более точному и всестороннему познанию изучаемого ею предмета. Это и есть ее основная цель и девиз. Но ведь никогда не наступит такой день, чтобы ученые могли сказать: «Ну, теперь познано все!» — и наука сложила бы руки на коленях.

Вот что означают осторожные предсказания в науке, все эти «возможно» и «вероятно». Теперь и в физике исчезает «заносчивость» классического ее периода. Эти «вероятно» означают для нее признание того, что на сегодняшний день она знает явление не абсолютно полно и точно.

С какой нескрываемой насмешкой вы посмотрели бы на метеоролога, который изрек бы: «Завтра целый день будет жаркая погода без дождя, температура в 9 часов утра —23,8 градуса, в 12 часов дня —29,6 градуса, в 4 часа дня —27,4 градуса. Ровно в 1 час дня на небе в таких-то районах появятся облака, которые закروют на такое-то время такую-то площадь. В 5 часов вечера облака уйдут в северо-восточном направлении со скоростью 12,3 километра в час».

Ваша насмешка была бы понятна. В образовании погоды участвуют десятки факторов. Учсть все их настолько точно и согласованно, чтобы ручаться головой за абсолютную верность предсказания погоды, современная метеорология не может. Она, к сожалению, весьма нередко ошибается даже в куда менее детальных предсказаниях!

Что же тогда говорить о квантовой механике, которая имеет дело с неизмеримо более труднодоступным миром сверхмалых вещей!

Волны частиц и частицы волн

Итак, волны де-Бройля определяют движение электронов. Но определяют не абсолютно точно, а вероятностно. В опыте по дифракции электронов эти волны указывают, на какие места фотопластинки с наибольшей вероятностью попадут электроны.

Но не ошибся ли Макс Борн, приняв эти «волны вероятности» за волны де-Бройля? Может быть, волны де-Бройля — это что-то совсем другое? Что ж, это нетрудно проверить.

Вспомним соотношение де-Бройля. Из него видно, что при увеличении скорости электрона длина его волны должна уменьшаться. Физикам уже было известно, что чем жестче рентгеновы лучи, чем более короткую длину волны они имеют, тем более сжатой получается их дифракционная картина. Была изучена дифракция электронов, обладающих разными скоростями. И что же, стягивание дифракционных колец по мере увеличения скорости электронов было установлено совершенно отчетливо!

Наконец, от длины волны физики могли переходить к расстоянию меж-

ду кольцами на картине, и наоборот. Подсчет показал, что если по расстоянию между кольцами вычислить длину электронных волн, то получались значения, в точности совпадавшие с найденными по соотношению де-Бройля.

Сомнений больше не могло быть. «Волны вероятности» оказались теми самыми «волнами материи», которые предсказал де-Бройль.

Они проявляются не только в явлении дифракции электронов на кристаллах. Волны де-Бройля оказались универсальными, они сопутствуют движению электронов и других частиц вещества буквально на каждом шагу.

Но обнаружить присутствие этих волн можно не всегда. С ростом массы и скорости частиц длина волн де-Бройля быстро уменьшается и выходит за те пределы, в которых их можно зарегистрировать приборами. Тогда налицо остаются одни лишь корпускулярные свойства частиц.

Вспомним наш разговор о свойствах волн. Ведь волны, например, электромагнитные, тоже до определенного предела не обнаруживают своей второй, корпускулярной сущности: они ведут себя, как и полагается волнам,— интерферируют друг с другом, испытывают дифракцию на препятствиях и т. п. Но как только их длина становится достаточно малой, они начинают совершать действия, характерные именно для частиц, — например, выбивать электроны из металла.

Особенно ярко проявляются свойства частиц у самых коротких из известных в настоящее время электромагнитных волн — у гамма-лучей. Они с замечательной легкостью выбивают частицы вещества!

Открытие де-Бройля связало воедино весь мир физических явлений, перекинув мост между двумя противоположными и, казалось бы, взаимоисключающими сущностями — частицами и волнами. Но если и обнаружилось это единство, то напрасно было бы думать, что противоположности исчезли.

Они как бы ушли в глубь вещей и определили собой поразительно причудливый облик микромира. Описанию этого облика мы посвятим многие страницы нашего дальнейшего рассказа. Мы раскроем перед вами секреты многих удивительных явлений, которые становятся возможными в мире сверхмалых вещей и прекрасно описываются «волнами вероятности».

На пути к волновому закону

Эти волны описывают движение электронов и других частиц микромира. А что, собственно говоря, мы подразумеваем под словом «описывают»?

Описать любой предмет, любое явление можно и качественно и количественно. В жизни мы в основном делаем первое. Достаточно сказать: «Сегодня будет дождь», — чтобы вы захватили с собой зонтик. При этом вас может и не интересовать, сколько времени будет идти дождь, на какой высоте поплывут тучи и еще десятки других деталей.

Наука же, и в особенности точная наука, такая, как физика, качествен-

ным описанием обычно не удовлетворяется. Ей подавай цифры, и притом как можно более точные.

Дифракционную картину от электронов на фотопластинке мы до сих пор в основном описывали качественно, как чередование темных и светлых колец. Можно описать ее и количественно, промерив степень почернения в разных местах пластинки и вычертив график. Такой график и нарисовал тренер на стрельбище.

Теперь, казалось бы, можно дать теорию этому явлению и успокоиться. А где же другие явления? Как быть с их объяснением? Хороша была бы наука, если бы каждому явлению она придумывала самостоятельную теорию!

В том-то и сила настоящей науки, что она создает теории, охватывающие единой цепью сотни не похожих друг на друга явлений. Самые мощные теории — одновременно самые широкие, «всеохватывающие».

В физике строительство новых крупных теорий часто начиналось с поиска одной очень важной формулы. Она называется законом движения.

Один из таких законов вам хорошо известен — это второй закон Ньютона. Он связывает ускорение, приобретаемое телом, с величиной и направлением действующей на него силы. Но сил и ускорений мы непосредственно не видим. Для нас движение под действием сил заключается в видимом перемещении тел в пространстве с течением времени.

Это закон Ньютона и позволяет найти. Ускорение есть изменение скорости движения во времени. А сама скорость есть изменение положения тела во времени. Так что в конце концов закон Ньютона связывает с силой именно перемещение тела. Решая уравнение Ньютона, и находят вид движения тела. Он выражается некоторой кривой, которую описывает тело с течением времени. Эта кривая называется траекторией.

Есть в физике и другой столь же общий и широкий закон. Ему подчиняется не движение тел, а распространение волн. Математически он записывается в виде так называемого волнового уравнения, или уравнения Даламбера, по имени открывшего его знаменитого французского ученого восемнадцатого века.

Оба уравнения — Ньютона и Даламбера — ни из каких еще более общих законов не выводятся. Они, если хотите, придуманы. Придуманы — но не выдуманы! Эти законы не просто взяты из головы — они представляют собой теоретическое обобщение многочисленных опытов и наблюдений, сделанных предшественниками Ньютона и Даламбера.

Гениальность ученого состоит не в том, что он нечто выдумывает, извлекает из головы. Нет, гений тот, кто в сложнейшем переплетении событий угадывает действие скрытой силы, некоего закона, кто извлекает этот закон на свет, очищает его от шелухи многочисленных случайных проявлений, несущественных деталей, шлифует и преподносит благодарным людям, записав его либо словами, либо, как в точных науках, — в

виде формулы. Теперь новый закон выглядит как драгоценный камень знания, радуя сердца людей изяществом своих линий и блеском граней.

С какого же закона следовало начать постройку фундамента квантовой механики? Понятно, что, претендуя на место законов Ньютона и Даламбера, которое те занимали в классической физике, новый закон в квантовой механике должен был быть не менее общим, не менее широким. Более того, этот закон, предназначенный для двуликого мира сверхмалых вещей, один должен был заменить оба закона, его предшественника. Он один должен был описывать и движение частиц и распространение волн!

Ньютону было, как ни говорите, легче! У него под руками уже было много опытных фактов. А что теперь? Ни одного опыта. Еще идет 1925 год, и от решающего опыта до дифракции электронов физиков отделяют почти три года. Соотношение де-Бройля уже существует, но, говоря о длине волны частиц, оно ничего не может сказать о законе их движения.

Уверенность физиков-теоретиков в том, что они стоят на правильном пути, была, однако, столь велика, что они приступили к созданию новой теории, не дожидаясь опытной проверки гипотезы де-Бройля.

С чего же начинать? Видоизменить уравнение Ньютона так, чтобы оно включило в себя волновые свойства частиц? Нет, история рассудила иначе. Физики, следуя де Бройлю, попытались видоизменить волновое уравнение, чтобы оно отразило корпускулярные свойства волн. Это оказалось проще.

Первого успеха добились Эрвин Шредингер и Вернер Гейзенберг. Пути, которые привели их к решению этой основной задачи, были совершенно несхожими. Да и, пожалуй, один из них почти ничего не знал о работах другого. И только, спустя некоторое время после опубликования их работ, Шредингер смог доказать, что оба эти решения задачи, несмотря на полное внешнее несходство, совершенно одинаковы по своему физическому смыслу.

Гейзенберг придумал так называемую матричную форму квантовой механики. Она очень сложна, и о ней здесь невозможно рассказать. Шредингер же изменил волновое уравнение так, что оно учло корпускулярный «вкус» дебройлевских волн. В его честь новое уравнение было названо уравнением Шредингера. Оно самое популярное среди физиков уравнение квантовой механики.

Так основным законом квантовой механики стал волновой закон.

Рассказывает измерительный прибор

Вернемся к волнам де-Бройля. Согласно тому толкованию, которое им придал Борн и которое в конце концов воплотилось в уравнении Шредингера, эти волны, в частности, проявляются в волнообразном распределении мест попадания электронов на фотопластинке. Но чтобы эта картина

возникла совершенно отчетливо, нужно, как мы видели, много электронов.

А какой смысл имеет дебройлевская волна для одного электрона? Это мы также уже знаем: она отклоняет электрон от классического «пути следования». Без этого отклонения дифракционная картина не могла бы появиться вовсе.

Кажется, понятно. Но это объяснение оставляет какое-то чувство неудовлетворенности. После неоднократных высказываний о причудливости мира сверхмалых вещей почему-то хочется, чтобы волновые свойства частиц проявились, что ли, ярче, «незаурядней».

Что ж, микромир охотно может удовлетворить такое желание. Допустим, мы производим в нем измерение. Нас не будет интересовать, какой конкретный вид имеет измерительный прибор. На него возложена задача: следить за электронами, измерять их скорость и положение в пространстве в каждый момент времени.

Электрон — частичка очень маленькая. Чтобы уследить за ней, нужен был бы «сверхсильный» микроскоп. На минуту допустим, что такой микроскоп можно было бы создать.

Первый вопрос — как провести измерение? Чтобы увидеть какой-нибудь предмет, его надо осветить. В полной темноте ничего не увидишь.

А чем освещать? Это зависит от размеров предмета. Ведь первое условие для получения четкого изображения предмета состоит в том, чтобы длина волны освещения была меньше размеров предмета. Обычный световой микроскоп работает на световых волнах с длиной примерно от 0,4 до 0,8 микрона, а потому дает четкие изображения предметов размерами не меньше примерно двух-трех микрон.

А вот предметы размерами, скажем, в полмикрона в таком микроскопе видны расплывчато. Когда эти размеры становятся того же порядка величины, что и длина волны освещения, возникает сильная дифракция света. И вместо четкого изображения предмета получается дифракционная картина — чередование темных и светлых полос, повторяющих его контуры.

Если же попытаться рассмотреть еще более мелкий предмет, то его изображение пропадает вовсе: свет идет мимо предмета так, как если бы его вовсе не было.

Электрон — не пылинка, не бактерия, размеры его (мы дальше увидим, что о них можно говорить лишь условно) чуть ли не в миллиард раз меньше длины световых волн. Чем же его осветить? К счастью, существуют гамма-лучи с очень короткими длинами волн.

Выберем себе электрон для наблюдения, осветим гамма-лучом... и ничего не увидим! Совсем ничего — был электрон и исчез. Даже не оставил дифракционных колец. И сколько раз мы ни будем пытаться увидеть изображение электрона — из этого ничего не выйдет.

В чем же дело? Да, электрон действительно не пылинка, а гамма-квант—

это не световой фотон. Пылинка все-таки имеет заметный вес, а фотон света несет с собой очень небольшую энергию и, значит, небольшой импульс.

Откуда же у фотона импульс? А вот откуда. Мы уже знаем, что фотон может вести себя подобно частице — это еще Эйнштейн показал в своей теории фотоэффекта. Судите сами: фотон имеет в пустоте всегда одну и ту же скорость — скорость света, но вот длина волны у него может быть разная. Применим к фотону соотношение де-Бройля:

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

и положим в нем скорость v равной скорости света c . Тогда можно найти и массу фотона (это, разумеется, масса движущегося фотона; масса покоя фотона строго равна нулю):

$$m = \frac{h}{\lambda c}.$$

А импульс фотона есть произведение его массы на его скорость:

$$p = mc = \frac{h}{\lambda}.$$

Не устали от математики? Нет? Тогда продолжим: из этой формулы видно, что с уменьшением длины волны фотона импульс его быстро растет.

Ударил световой фотон по пылинке, передал ей свой импульс и отразился от нее, пошел дальше через оптическую систему микроскопа — в глаз. А пылинка от этого удара даже не шелохнется. Лежала она неподвижно — и останется лежать, а двигалась — так почти ни на йоту от этого удара не изменит своего движения.

Другое дело — электрон. Масса у него совершенно ничтожная в сравнении с пылинкой, импульс, как мы увидим дальше, даже у чрезвычайно быстрого электрона очень мал. А посылаем мы на него гамма-фотон, у которого импульс чуть ли не в миллиард раз больше, чем у его светового собрата. Ударит такой гамма-фотон по электрону — и поминай как звали! Был электрон где-то здесь, а теперь улетел неизвестно куда. Вот, действительно, жди себе его изображения или дифракционных колечек!

Выходит, дело плохо. Скажем, известно, что электрон летит, а с какой скоростью летит, сказать нельзя: осветили его гамма-фотоном, а электрон от этого изменил скорость. Или, скажем, известно, что у электрона скорость равна нулю, лежит он где-то неподвижно. А найти его место невозможно: осветили его — и электрон снялся и улетел неведомо куда.

Со старичком-микроскопом куда легче работать! Двигается в его поле зрения пылинка или бактерия, так мы в любой момент времени можем сказать, и где она находится, и какая у нее скорость. А попробуем мы устано-

вить местоположение электрона, так скорость его не определим, а попробуем определить скорость, так саму частицу потеряем. Вот какие странные вещи творятся на свете!

Соотношение неопределенностей

Да, здесь все описано примерно так, как оно есть на самом деле. Убедимся в этом простеньким расчетом на примере все тех же пылинки и электрона.

Пусть, скажем, пылинка имеет размер 1 микрон (10^{-4} сантиметра), состоит из вещества с плотностью 10 граммов в кубическом сантиметре (это немногим больше плотности железа) и движется в поле микроскопа с очень малой скоростью — 1 микрон в секунду. Тогда ее вес составляет 10^{-11} грамма, а импульс — 10^{-15} грамма на сантиметр в секунду. Если на нее бросить свет с длиной волны, скажем, в полмикрона (это — зеленые цвета в спектре), то его фотоны имеют импульс всего лишь 10^{-22} , то есть в десятки миллионов раз меньше, чем у пылинки. Разумеется, удары фотонов не производят на пылинку ровно никакого впечатления!

Иное положение — в случае электрона. Даже если он движется со скоростью, близкой к скорости света, — 10^{10} сантиметров в секунду, — то его импульс составит всего лишь 10^{-17} грамма на сантиметр в секунду. А используемый для его освещения гамма-фотон с очень короткой длиной волны, например $6 \cdot 10^{-13}$ сантиметра, имеет импульс 10^{-14} , то есть в тысячи раз больше, чем у электрона. Конечно, при ударе такого фотона электрон будет начисто сметен со своего пути. Ведь это буквально стрельба из пушек по воробьям!

В результате, как мы убеждаемся, возможности измерительных приборов в мире сверхмалых вещей весьма существенно меняются. Прибор словно оказывается не в состоянии одновременно и со сколь угодно высокой точностью измерять движение частиц.

Каковы же эти неточности, а лучше сказать (прочитайте дальше, и вы поймете почему), неопределенности измерения? Ответ на этот вопрос дает известное «соотношение неопределенностей», которое вывел Гейзенберг из общих законов квантовой механики в 1927 году. Вот как оно выглядит:

$$\Delta x \cdot \Delta v_x \geq \frac{h}{m}.$$

(На самом деле вместо h должна быть величина $h/2\pi$, но для нашего рассказа это несущественно: обе величины отличаются лишь примерно в 6 раз). В этом выражении Δx — неопределенность измерения положения (координаты) частицы x ; Δv_x — неопределенность измерения ее скорости v_x в направлении x ; m — масса частицы, а знак \geq говорит о том, что произ-

ведение этих неопределенностей не может быть меньше величины, стоящей в правой части написанного соотношения.

«Странные дела», о которых мы так подробно рассказывали выше, заключаются в следующем. Если попытаться измерить абсолютно точно положение частицы, то неопределенность в ее координате Δx должна, понятно, стать равной нулю. Но тогда, согласно непреложным законам математики, неопределенность в ее скорости:

$$\Delta v_x = \frac{h/m}{\Delta x} = \frac{h/m}{0} = \infty,$$

то есть должна обратиться в бесконечность. Иными словами, скорость частицы в тот момент, когда измеряется ее положение, станет совершенно неопределенной. И наоборот, если измерить в какой-либо момент абсолютно точно скорость частицы, то решительно ничего нельзя будет сказать о том, где находилась частица в это время.

Как же быть в таком случае? Может быть, пойти на компромисс, измеряя и положение и скорость электрона с некоторой неточностью, в общем не очень большой?

Посмотрим, каковы эти неточности в случаях тех же самых пылинки и электрона. Для пылинки величина в правой части соотношений Гейзенберга равна примерно 10^{-15} . Выберем «компромиссные» значения неопределенностей: $\Delta x = 10^{-8}$ сантиметра, $\Delta v_x = 10^{-7}$ сантиметра в секунду (перемножив их, мы и получим справа величину 10^{-15}).

Величина Δv_x по отношению к v_x составляет 10^{-7} : $10^{-4} = 10^{-3}$, то есть 1 тысячную часть. Такая неопределенность в измерении скорости нас может вполне удовлетворить: не всякий спидометр способен на подобную точность!

Что касается неопределенности в положении пылинки Δx , то она составляет по отношению к размерам пылинки 10^{-8} : $10^{-4} = 10^{-4}$, то есть 1 десятичную часть. Эта неточность соответствует размерам одного атома в пылинке!

Вот почему, измеряя скорости и положения пылинок, а также более массивных предметов, нельзя даже и догадаться о существовании соотношения неопределенностей.

Иное дело в случае электрона. «Размер» его (еще раз напомним — условный, в духе классической физики, представлявшей электрон в виде заряженного шарика) — примерно 10^{-13} сантиметра, масса — 10^{-27} грамма, скорость не слишком быстрого электрона, по прохождении им разности потенциалов электрического поля в 1 вольт, — порядка 10^7 сантиметров в секунду. Величина в правой части соотношения неопределенностей для него равна примерно 10.

«Составить» эту величину из Δx и Δv_x можно по-разному. Пусть, например, мы хотим определить скорость электрона с такой же точностью, как

это было сделано выше для пылинки, то есть 10^{-3} . Тогда наши неопределенности будут равны: $\Delta v_x = 10^4$ сантиметров в секунду ($10^4 : 10^7 = 10^{-3}$), а $\Delta x = 10^{-3}$ сантиметра. Неопределенность в положении электрона ни много ни мало как в миллиарды раз превысит его «размер»!

Попробуем поступиться точностью в измерении скорости, доведя ее, скажем, до 100 процентов, то есть до величины самой скорости. Это даст, как говорят физики, порядок измеряемой величины. Тогда $\Delta v_x = 10^7$, а $\Delta x = 10^{-6}$ сантиметра, то есть все еще в миллионы раз больше «размеров» электрона.

Вот вам и компромисс! Не хочет идти на него природа мира сверхмалых вещей!

Кто виноват — прибор или электрон?

С подобным положением классическая физика, конечно, никогда не сталкивалась. Она считала, что местоположение и скорость любой частицы в любой момент времени можно измерить, по крайней мере в принципе, с абсолютной точностью. Ведь это же лежит в основе ее «абсолютно точных» предсказаний движения частиц по их местонахождению и скоростям в некий начальный момент времени.

Теперь же выходит, что ни о какой абсолютной точности измерений не может быть и речи, даже в принципе. В чем же дело? Может быть, в приборе?

В самом деле, ни один прибор не в состоянии измерить ни одну величину с абсолютной точностью. Можно сказать, что история развития измерительной техники — это история непрерывно возрастающей точности приборов. Точность измерения во многих областях науки и техники стала сегодня феноменально высокой. И продолжает повышаться далее.

Но вот соотношение неопределенностей как будто кладет предел повышению точности приборов. Оно словно говорит: как бы ни совершенствовались ваши приборы, но через этот рубеж вам не перешагнуть.

В создавшемся положении виноват прибор, утверждал Гейзенберг, а вслед за ним многие физики. Прибор в микромире — это не телескоп во Вселенной. Нужны, конечно, и тот и другой. Наши органы чувств, через которые мы познаем мир, ограничены в своих возможностях. Затем и нужен прибор, чтобы переводить доступные ему явления на «язык» человеческих чувств.

Но если телескоп не оказывает никакого влияния на движение наблюдаемых с его помощью небесных тел, то в микромире все обстоит иначе. Там прибор (скажем, наш идеальный «сверхмикроскоп») активно вмешивается в наблюдаемое с его помощью явление и меняет его «естественный» ход. Причем, к великому сожалению, меняет настолько бесконтрольно,

что выделить явление в чистом виде оказывается невозможным. Пределы «чистоты» наблюдения и ставит соотношение неопределенностей.

В создавшемся положении виноват электрон, заявили другие физики. И в подтверждение привели не менее убедительную аргументацию. Мир сверхмалых вещей живет по своим собственным законам и в измерениях, собственно говоря, для своего существования не нуждается. Что означает наличие волновых свойств у электрона?

Ведь нельзя сказать: частота колебаний маятника в данный момент такая-то! Для определения этой частоты надо проследить за колебаниями маятника в течение некоторого времени. Аналогично этому, нельзя говорить: длина волны в данной точке такая-то. Длина волны по своему смыслу есть характеристика длинного (строго говоря, бесконечно длинного) ряда волн. Какова бы ни была природа этих волн, длина их не может зависеть от положения какой-либо точки в волне.

Вспомним соотношение де-Бройля, но запишем его так, чтобы слева в нем оказалась скорость частицы:

$$v = \frac{h}{m\lambda} \cdot$$

Отсюда сразу следует вывод: раз длина волны λ не зависит от положения какой-либо точки в волне (например, точки, в которой по предположению находится частица), то от положения частицы не может зависеть и ее скорость.

В неудачах прибора повинны именно волновые свойства электрона.

Кто же прав? Те, кто обвиняют прибор в «неприспособленности» к микромиру, или же те, кто винит микромир в «недоступности» измерениям?

Оказывается, правы и те и другие, но лишь наполовину. Истина заключается в том, что в соотношении Гейзенберга проявляется совокупная «вина» и прибора, и электрона. Но вина ложится не только на них...

Попытка с „полунегодными“ средствами

Что мы требуем от прибора? Прежде всего, чтобы он давал нам те сведения, которые мы хотим узнать. Прибор начисто лишен какой-либо самостоятельности, он покорный исполнитель воли человека.

Прибор, с помощью которого мы хотим заглянуть в микромир, в некотором роде «двулик». Он имеет как бы два конца — «вход» и «выход». На входе его разыгрываются явления, подчиняющиеся квантовым законам, а на выходе он выдает сведения, записанные классическим «языком», ибо другого «языка» наши органы чувств не воспринимают.

Мы потребовали от прибора, чтобы он сообщал нам в каждый момент о местонахождении и скорости электрона. Прибор честно признается, что делать это он не в силах. Он может давать либо сведения о скоростях без

указания положений в момент измерения скорости, либо о положениях, но ничего не говоря о скоростях в этот момент.

И, если вдуматься, то во всем этом в первую очередь виноваты сами физики. Они требовали, чтобы прибор передавал сообщения о зависимости скорости электрона от его местоположения, а эти две величины неожиданно оказываются не связанными друг с другом!

В этом-то и состоит одна из «причуд» микромира, одно из проявлений волновой природы частиц. Выходит, что старые классические понятия и величины, которыми сотни лет спокойно пользовались физики, оказываются негодными при вторжении в мир сверхмалых вещей!

Правильнее говоря «полунегодными». Эти понятия продолжают слушать и в микромире, но теперь становится очевидной их неполноценность, ограниченность. Пределы, до которых ими можно пользоваться, и устанавливаются соотношением неопределенностей.

Электрон можно было бы считать точечной частицей и уверенно говорить о том, что он имеет точное положение в пространстве, если бы с ним не была неразрывно сопряжена волна. Она как бы размывает положение электрона: он ведь может находиться в любом месте своей собственной волны.

И в результате для покоящегося электрона длина его волны разрастается до бесконечности, а вместе с этим и должны потерпеть крах все попытки найти его в каком-либо определенном месте. И, с другой стороны, чем быстрее движется электрон, тем точнее он «локализован» в своей волне, но даже и при предельно высоких скоростях движения его «размазанность» все еще во много раз превышает его собственные «размеры».

Неполноценными в мире сверхмалых вещей оказываются не только классические понятия положения и скорости электрона. Эту судьбу с ними разделяют и такие величины, как время, энергия частиц, и многие другие.

Почему же, вправе спросить вы, физики в таком случае не отбросили старые, классические понятия и величины, неудовлетворительно работающие в микромире, и не заменили их новыми, более соответствующими необычным свойствам этого мира?

Вы, наверное, даже и не догадываетесь, сколь исключительно сложен этот вопрос! Ведь он касается самой природы человеческого познания. Об этом мы будем подробнее говорить в конце нашей книги. Пока же скажем, что смена понятий и представлений в физике, как и в любой другой области науки, — процесс необычайно длительный, сложный и тяжелый. Многие тысячи лет прошли, пока люди изменили свои первые наивные представления о Вселенной, о сущности жизни, о неживой природе, о строении атомов. А сколь наивными покажутся наши представления далеким потомкам, которые будут жить через сотни лет после нас!

В наше время человеческое знание развивается с поразительной быстротой. Но все же процесс постижения сущности новых миров, новых явлений

не только остается, но и, пожалуй, становится еще более трудным и противоречивым. Глубоко и правильно охарактеризовал его Эйнштейн: «Драма идей»!

Так получилось и при путешествии с классическим «багажом» в мире сверхмалых вещей.

Еще одно „чудо“

Любимое мальчишеское занятие — лазить в соседские сады за яблоками — вызвало ответную меру: появились высокие глухие заборы. И вот юный озорник стоит перед «искусственной преградой» и страстно мечтает попасть в сад. Но высокий и гладкий забор без единой щелочки делает его мечту почти несуществимой.

Может быть, где-нибудь раздобыть лестницу? Или найти сообщников и по их спинам взлезть на забор? Или разбежаться изо всей мочи и взлететь на забор, подобно молодому петуху? Очень уж заманчив запретный плод!

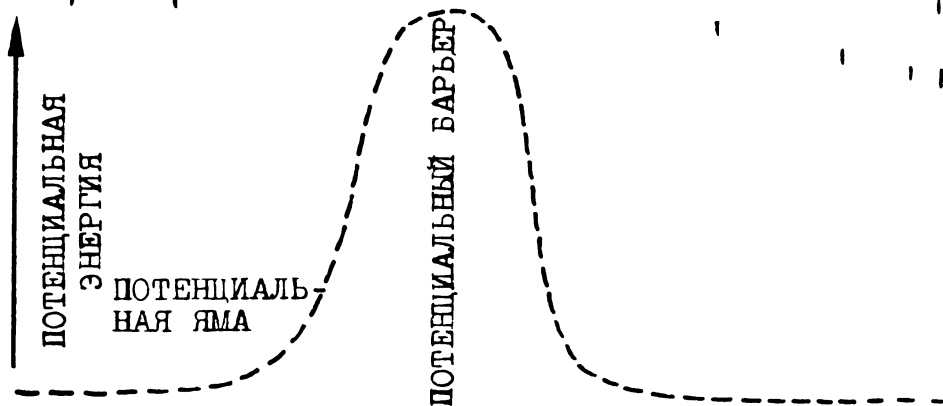
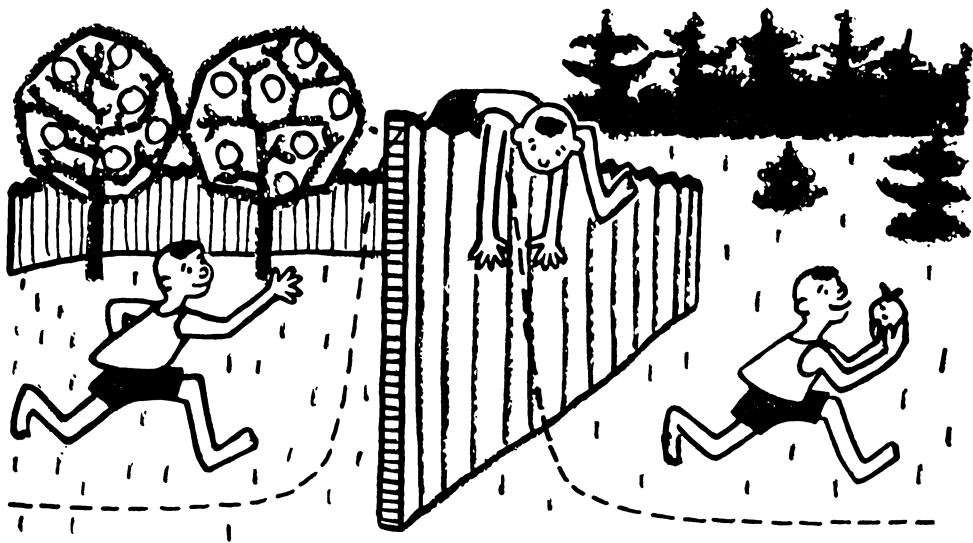
Наш озорник очень бы удивился, даже, наверное, забыл бы и думать о яблоках, если сейчас подойти к нему и сказать: «Жаль мне тебя! Вот будь ты полегче! Тогда тебе не пришлось бы и пальцем шевельнуть, как сам собой ты мог бы очутиться по ту сторону забора».

Сегодняшние мальчишки не верят сказкам. А напрасно! В мире сверхмалых вещей встречаются поистине сказочные события. Одно из них — проникновение частиц сквозь совершенно «глухие» стенки.

Присмотримся к нему повнимательнее. Что, в сущности, означает перелезть или перепрыгнуть через забор? Еще со школьной скамьи вам известно, что чем ниже находится какое-либо тело, тем меньше его потенциальная энергия. Если вы стоите на земле, ваша потенциальная энергия меньше, чем если бы вы уселись на заборе. Известно, и на сколько меньше: эта величина дается произведением веса вашего тела на разность высот центра тяжести тела в этих двух положениях; разность высот приблизительно равна высоте забора минус один метр.

Забор можно преодолеть, если каким-либо образом на время набрать недостающую энергию. Это можно сделать либо за счет работы своих мышц, либо в купе с работой мышц своих сообщников, которые подставят спины. В любом случае эта работа пойдет на увеличение вашей потенциальной энергии, и вы сможете подняться на верх забора.

Дальнейшее уже нетрудно. Спуск с забора не требует усилий. Скорее наоборот — вам потребуется приложить силу, чтобы спуск под действием силы земного притяжения не оказался слишком стремительным и не закончился порванными штанами. А потенциальная энергия по ту сторону забора снова уменьшится и опять станет такой же, какую вы имели перед прыжком через забор.



Если изобразить на графике зависимость вашей потенциальной энергии при преодолении забора, получится «горка». В физике такую «горку» называют потенциальным барьером.

В атомном мире тоже существуют «заборы». К примеру, в металле су-

ществует множество почти свободных, сравнительно слабо связанных со своими атомами электронов. Но, несмотря на их свободу, никто еще не видел, чтобы электроны вылетали из металла сами по себе. Дело в неполной свободе электронов; хотя электроны и слабо связаны с атомами, из которых появились, они все же притягиваются к возникающим при этом ионам (подробнее о том будет идти речь в следующей главе). Совокупное действие всех ионов на все электроны в куске металла можно представлять так, как если бы «двор», по которому разгуливают электроны, был отгорожен от внешнего пространства довольно высоким «забором».

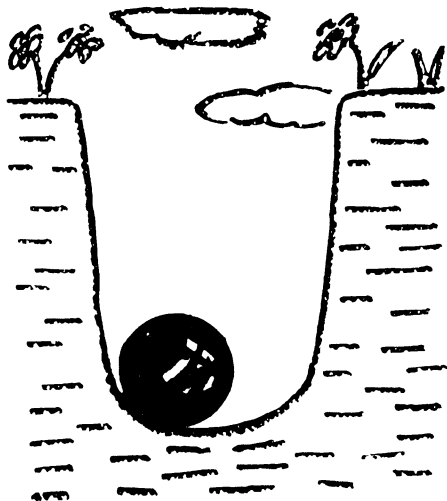
Электроны в куске металла напоминают шарики в ямке, о которых мы уже говорили в связи с теорией Бора. Внутри металла электроны движутся как угодно, а выйти за его пределы не могут, все равно что шарики в ямке. Поэтому условия, в которых пребывают в металле электроны, так и были названы потенциальной ямой.

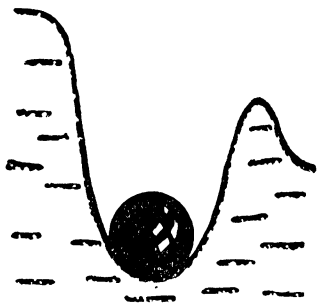
Но все же электроны не заключены в куске металла навек. При некоторых условиях они могут перепрыгивать через забор и оказываться вне металла. Например, это происходит при освещении металла достаточно коротковолновым светом. Энергичный фотон как бы дает «шлепок» электрону, в результате чего тот взлетает на вершину потенциального барьера, перекатывается через него и оказывается уже действительно свободным. Это — обычный, «классический» способ преодоления потенциального барьера, ничем в сущности не отличающийся от способа, которым прыгают люди.

Вы, вероятно, уже заметили, что барьер для электронов в металле пока что не совсем похож на забор: у него есть передняя сторона, но нет задней; это скорее не забор, а ступенька. Забор для шарика в ямке можно сделать, подрыв землю за ее краями. В случае же электронов в металле такую «подрывную» операцию можно осуществить, приложив к куску металла сильное электрическое поле.

Теперь оба барьера — для шарика в ямке и для электрона в металле — становятся похожими друг на друга. Но дальше начинаются весьма существенные расхождения.

Если решить уравнение Ньютона для шарика в ямке, то оно покажет, что шарик навсегда останется в ямке, если ему не сообщить необходимой энергии для



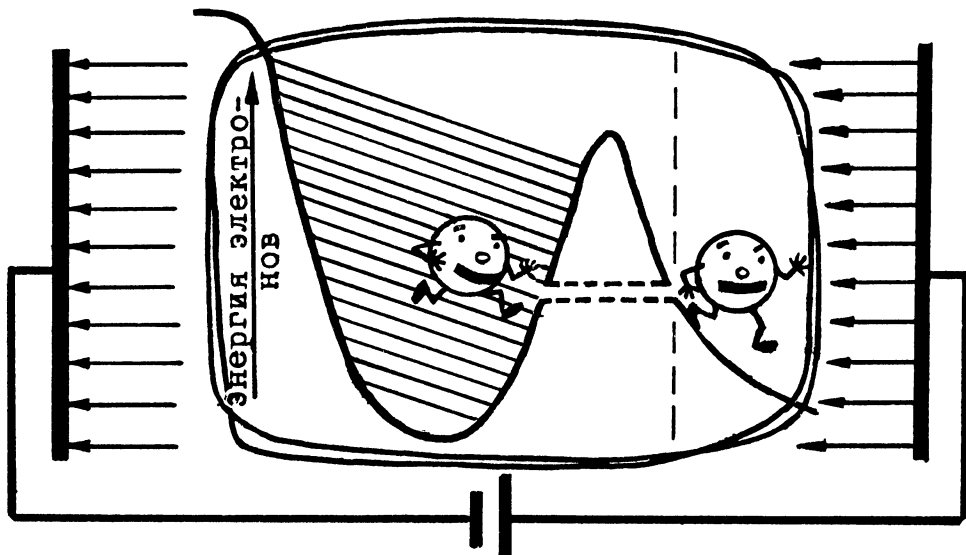


преодоления барьера. Да мы это знаем и без всяких уравнений. Где это видно, чтобы шарик сам собой выпрыгивал из ямки, чтобы мальчишка, не сделав ни одного движения, сам собой оказывался по ту сторону забора!

Нет, классическая механика заявляет безапелляционно: шарик вне ямки ни за что сам не очутится. Вероятность этого «чуда» строго равна нулю — полная невероятность, невозможность!

А вот если решить уравнение Шредингера для электрона в металле, помещенном в электрическое поле, то оно даст совершенно неожиданный результат. Вероятность пребывания электрона вне металла уже не будет равной нулю и, строго говоря, нигде в нуль не обращается! Она невелика, может быть даже ничтожно малой, но все же — не нулевой!

Электроны словно получили возможность «просачиваться» через потенциальный барьер! И появляются по другую его сторону, как бы издеваясь над безапелляционными предсказаниями классической физики. Похоже на то, что как будто неведомые силы прорыли в барьере «туннель», по которому без всяких усилий смог пройти электрон. Физики так и назвали это поразительное явление — «туннельный эффект».



Опять соотношение неопределенностей

И пока мы нетерпеливо ждем объяснения нового «чуда» квантовой механики, на сцену снова выходит измерительный прибор и просит слова. И опять речь его состоит из сплошных сетований.

В самом деле, ему поручили проследить за тем, как электрон просачивается сквозь потенциальный барьер. Ведь это просачивание в корне противоречит самым фундаментальным положениям классической физики! Понимаете, как важно убедиться в том, что это не более чем вздорная выдумка теоретиков!

Мы уже говорили, что у шарика в ямке полная энергия, равная сумме его кинетической и потенциальной энергий, отрицательна. Это происходит потому, что потенциальная энергия шарика (которую мы отсчитывали от верха ямки, то есть от самой высокой точки потенциального барьера) отрицательна и по своей величине превосходит кинетическую энергию шарика.

Понятное дело, и в пределах барьера полная энергия шарика должна остаться отрицательной; она ведь при «просачивании» не меняется по величине. Но зато теперь уменьшается потенциальная энергия, пока в самой высокой точке барьера полная энергия не станет равной нулю.

Отсюда единственный вывод: в пределах барьера стала отрицательной кинетическая энергия шарика. Но что это за величина? Напишем ее:

$$E_{\text{кин}} = \frac{mv^2}{2}.$$

Квадрат скорости v , какой бы она знак ни имела, всегда положителен, двойка в знаменателе — тоже. Значит, отрицательна m — масса частицы. Но отрицательную массу ни понять, ни представить себе невозможно, причем не только в классической, но даже и в более «революционно» настроенной квантовой механике. В самом деле, это означало бы, например, что локомотив ведет состав в Ленинград из Москвы, а вагоны при этом удаляются от локомотива из Ленинграда в Москву!

Экая чушь! И чтобы убедиться в том, что это действительно чушь, поставили прибор — проследить за электроном.

Прибор обнаружил электрон и начал следить за ним. Вот электрон подошел к границе потенциального барьера. Чтобы «уличить» его в момент, когда он просачивается сквозь барьер, прибору не надо даже точно засечь положение электрона: достаточно убедиться в том, что электрон оказался где-то в пределах барьера.

Однако это еще не все. Прибор должен узнать, кроме того, скорость электрона в этот момент, чтобы выяснить, в самом ли деле его кинетическая энергия становится отрицательной. И вот тут-то прибор вынужден спасовать. На сцену выступает соотношение неопределенностей Гейзенберга.

Ведь чтобы засечь электрон в пределах барьера, его нужно осветить фотонами с малой длиной волны: определить положение электрона требуется с точностью, не меньшей ширины самого барьера. Но удар такого фотона по электрону внесет внушительную неопределенность в его скорость.

Какова же она? Да ни много ни мало: такова, что вызванная ею неопределенность в кинетической энергии электрона как раз окажется выше самой высокой точки барьера!

Иными словами, «уличить» частицу в неклассическом прохождении под барьером нет никакой возможности. В самом процессе «уличения» ей сообщается энергия, достаточная для того, чтобы частица перепрыгнула через барьер вполне законным и благопристойным классическим способом. Получается так, словно полицейский помогает преступнику, скрывая вещественные доказательства!

Такое положение очень характерно для многих явлений в мире сверхмалых вещей. Квантовая механика может утверждать самые невероятные, с точки зрения классической физики, вещи. Но доказать ложность этих утверждений, пользуясь классическими приборами, принципиально невозможно. Напрасно искать частицу под барьером — ее там не окажется. Само понятие частицы внутри потенциального барьера в квантовой механике так же бессмысленно, как и в классической физике.

Но при всем при том частица просачивается сквозь барьер! Разгадка этого «чуда» в конечном счете лежит в волновых свойствах электронов и прочих частиц микромира.

И опять „волны материи“

Эти волновые свойства, как мы уже видели, приводят к тому, что скорость частиц перестает зависеть от их положения. Траекторий в мире сверхмалых вещей не существует. Но от положения частиц зависит их потенциальная энергия, а от скорости — кинетическая.

Так получается, что, строго говоря, нельзя одновременно точно измерить и кинетическую и потенциальную энергии частицы. В каждый момент они не зависят друг от друга. И пределы применимости этих классических понятий энергии в мире атомов снова даются соотношением неопределенностей.

Итак, частица, пребывающая в потенциальной яме, имеет некоторую вероятность сама собой очутиться вне ее. А значит, есть и вероятность того, что частица останется в яме. Если мы располагаем, скажем, тысячью электронов и десять из них просочатся через барьер, то вероятность туннельного эффекта составит 1 процент, а вероятность того, что он не произойдет, — 99 процентов.

Эти вероятности физики соответственно назвали прозрачностью и отражательной способностью потенциального барьера.

Прозрачность, отражение... знакомые слова! Ими ведь характеризуют разные вещества по отношению к пропусканию световых волн. На границе раздела двух разных веществ свет всегда частично проходит во вторую среду, а частично отражается. А потенциальный барьер — чем не граница между двумя средами? Только не для электромагнитных (в том числе и световых) волн, а для волн де-Бройля.

Эта аналогия оказывается весьма глубокой. Законы туннельного эффекта замечательно совпадают с законами отражения и прохождения волн света через границы между разными веществами.

Мы не случайно выбрали для нашего разговора барьер в виде «забора», то есть имеющий определенную конечную ширину. Если этот барьер имеет только переднюю стенку, как, например, лестничная ступенька, то туннельный эффект совершенно исчезает. Частицы не могут строить туннелей в бесконечно длинных, хотя бы и в очень низеньких, барьерах. Тут запрет классической физики вступает в полную силу.

В самом деле, теперь измерительный прибор мог бы праздновать свою «жалкую» победу: факт нахождения частицы под барьером, если бы она там оказалась, можно было бы установить достоверно, сколь ни велика была бы неопределенность в измерении ее положения. А раз так, то по соотношению неопределенностей можно было бы точно найти скорость, а с нею — и кинетическую энергию частицы. Эта энергия теперь наверняка оказалась бы отрицательной.

Но природа не собирается противоречить самой себе. Отрицательная кинетическая энергия невозможна. А потому пропадает и сам туннельный эффект.

И все же, возможно, кое-кто не убежден приведенными объяснениями. Может ли быть, что все сказанное — одни лишь абстрактные теоретические рассуждения? Судите сами. Из нагретой металлической нити электроны вырываются полчищами — переданной им тепловой энергии достаточно, чтобы они переваливали через барьер на границе куска металла. А вот сколько ни сидеть у холодного куска металла, из него не вылетит ни один электрон.

Но стоит внести этот кусок металла в сильное электрическое поле — и из него опять же обильно начнут вылетать электроны. Это явление, названное холодной эмиссией, прекрасно подтверждает, что туннельный эффект — не выдумка физиков-теоретиков!

Волновая функция

Никто еще не писал уравнений для собственного удовольствия. Уравнения составляются для того, чтобы их решать. Уравнение Шредингера, о котором мы говорили выше, в этом смысле не составляет исключения.

Уравнения бывают простые и сложные. Уравнение Шредингера безусловно относится к разряду сложных. Это дифференциальное уравнение в частных производных второго порядка. Шесть слов, и что ни слово, то требуется пояснение. В нашей книге это сделать невозможно. Скажем лишь, что уравнения подобного рода описывают величины, меняющиеся в пространстве и времени.

Под личиной неизвестного в таких уравнениях могут скрываться самые разнообразные величины — и форма поверхности жидкости в сосуде, и координаты спутника на небе, и сила радиосигнала на пути к приемнику, и скорость резания станка, и многое другое. Решение уравнения и дает в прямом виде зависимость искомой величины от других величин, интересующую ученых. Математики все такие зависимости объединяют одним словом — функция.

Какая же неизвестная и подлежащая определению величина фигурирует в уравнении Шредингера? Эту величину физики назвали волновой функцией. Точный смысл ее до сих пор ускользает от ученых, несмотря на то, что с нею проведены уже тысячи замечательных расчетов. Мы уже говорили, что по этому поводу ученые и по сей день спорят друг с другом.

Но вот в чем, пожалуй, они все согласны — это что квадрат волновой функции имеет смысл вероятности. Зависимость его от координат и времени дает вероятность нахождения частицы в каком-либо месте пространства в данное время. И если говорить точнее — вероятность того, что частицу можно будет обнаружить в таком-то месте в такое-то время по действию, которое она там произведет. Например, по ее взаимодействию с нашим измерительным прибором. Эта вероятность и есть та самая «волна вероятности», о которой мы рассказывали, описывая опыт по дифракции электронов.

Решать уравнение Шредингера в общем случае — исключительно трудная задача, даже если для этой цели использовать самые совершенные методы высшей математики. Но вот одна широкая область явлений позволяет сделать решение более легким. Это так называемые стационарные задачи, в которых искомая волновая функция лишь колеблется около определенного «среднего» вида, а сам этот вид не меняется со временем.

Легко понять, что такие задачи не относятся к процессам (конечно, не периодическим). В процессах ведь обязательно что-то направленно, в какую-то сторону меняется с течением времени. Стационарные задачи относятся к строению, структуре тех систем, в которых могут идти процессы. А знать структуру очень важно: ведь ничего нельзя сказать о процессе, если не знаешь, в какой обстановке он разыгрывается.

Детальями этой «обстановки» в мире сверхмалых вещей являются атомы, молекулы, кристаллы и многое другое. Известно, что их структура отличается замечательным постоянством. К ним и было в первую очередь применено стационарное уравнение Шредингера. О тех интереснейших результатах, которые при этом были получены, мы расскажем в следующей главе.

Волны и кванты объединяются

Стационарные задачи в квантовой механике обладают еще одним замечательным свойством. Чтобы понять его, вспомним, что соотношения неопределенностей охватывают не только, скажем, положение и скорость частицы, но также ее полную энергию и время.

В последнем случае соотношение Гейзенберга гласит, что измерить энергию частицы можно тем точнее, чем длительнее производить это измерение. И записывается это соотношение в форме, очень похожей на ту, которая приводилась ранее:

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar;$$

(опять-таки вместо \hbar правильнее писать $\hbar/2\pi$). Здесь ΔE — неопределенность в энергии частицы E , а Δt — неопределенность в том моменте времени t , в который частица имела точно энергию E . Знак \geq по-прежнему означает, что произведение этих неопределенностей не может быть меньше величины \hbar — постоянной Планка.

А теперь смотрите. Стационарность означает, что энергия частицы со временем не меняется. Поэтому ее можно в принципе мерить хоть целую вечность: здесь неопределенность в моменте измерения, разумеется, не играет никакой роли.

Значит, можно спокойно положить $\Delta t = \infty$. Но тогда, согласно законам математики:

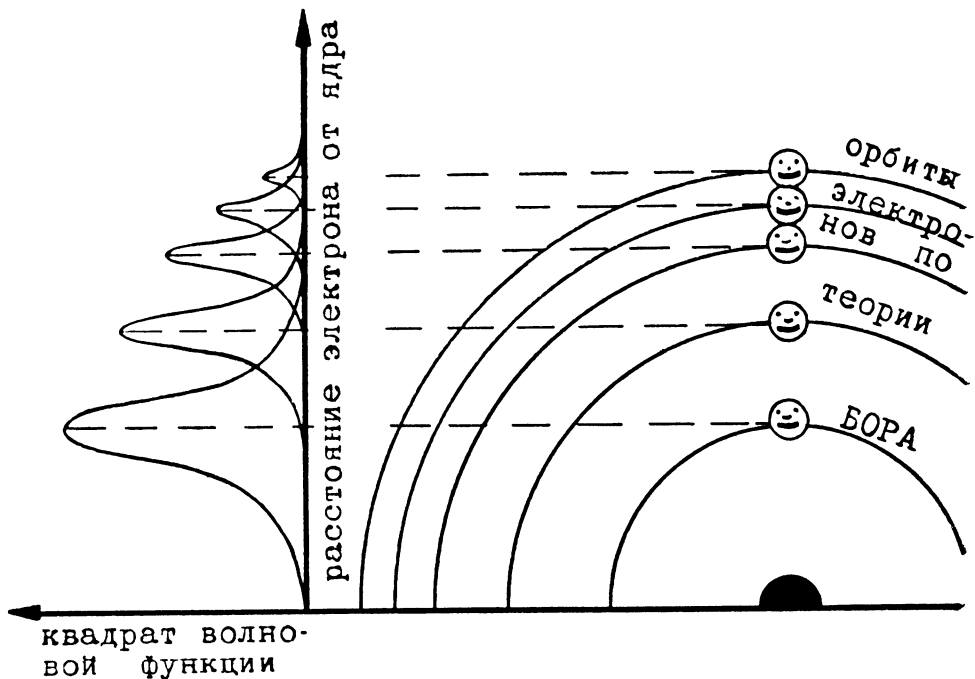
$$\Delta E = \frac{\hbar}{\Delta t} = \frac{\hbar}{\infty} = 0,$$

то есть неопределенность в измерении энергии равна нулю. Иными словами, энергия частиц определяется в стационарных состояниях абсолютно точно! Это и есть то замечательное обстоятельство, о котором мы только что говорили.

В уравнении Шредингера величина этой энергии участвует самым активным образом. Пока величина E положительна (а это, как мы помним, отвечает совершенно свободному движению частиц), уравнение Шредингера имеет не обращающееся в нуль решение при любых значениях E .

А значит, квадрат этого решения — вероятность — тоже не равен нулю ни при каких значениях E . В переводе на обывденный язык это означает, что свободная частица вправе иметь любую энергию, любую скорость движения (но, конечно, не большую скорости света).

А вот когда величина E становится отрицательной (это, как мы также помним, отвечает связанному состоянию частицы, например шарик в ямке, электрону в атоме), решение этого уравнения резко меняется. Оказывает-



ся, что оно не обращается в нуль только при некоторых определенных значениях энергии E .

Эти значения E называются разрешенными или дозволенными уровнями энергии частицы. Взгляните на рисунок. Вы видите, что вероятность пребывания частицы почти везде равна нулю, за исключением состояний, в которых она имеет дозволенную энергию. В этих состояниях упомянутая вероятность заметно отличается от нуля. Такое положение физики называют дискретностью уровней энергии.

Но присмотримся внимательней. Не напоминает ли вам чем-то эта картина разрешенных уровней энергии модель атома в теории Бора? Конечно, напоминает. Более того, это одно и то же. Электронные орбиты у Бора — это те самые энергетические состояния, в которых вероятность пребывания электрона отличается от нуля!

Но Бор просто «придумал» эти орбиты, а как-нибудь доказать, почему они должны существовать, не смог. И вот фундамент под эту гипотезу подводит квантовая механика.

Она же обосновывает и второй постулат Бора о квантовом характере прыжков электронов в атомах. Электрон, как видно из решения уравнения

Шредингера, может в атоме находиться только в состояниях, в которых он имеет дозволенную энергию. А значит, при прыжках из одного такого состояния в другое его энергия меняется не как угодно, а строго на определенную величину. Она просто равна разности энергий тех двух состояний, между которыми происходит прыжок.

Вот эта разность энергий и есть тот самый планковский квант, с которого и началось развитие новой физики! Квантовая механика объединила две замечательные гипотезы — Планка о квантах энергии и де-Бройля о волнах материи, — показав глубочайшую их взаимосвязь.

Без волн де-Бройля не могли бы существовать и кванты Планка!

Так два тоненьких в своих истоках ручейка новых гипотез наконец слились в единый могучий поток знания.

Проследуем же по течению этой широкой реки и присмотримся к удивительным ландшафтам нового мира, которые открываются по ее берегам.



томы, молекулы, кристаллы

Облака вместо орбит

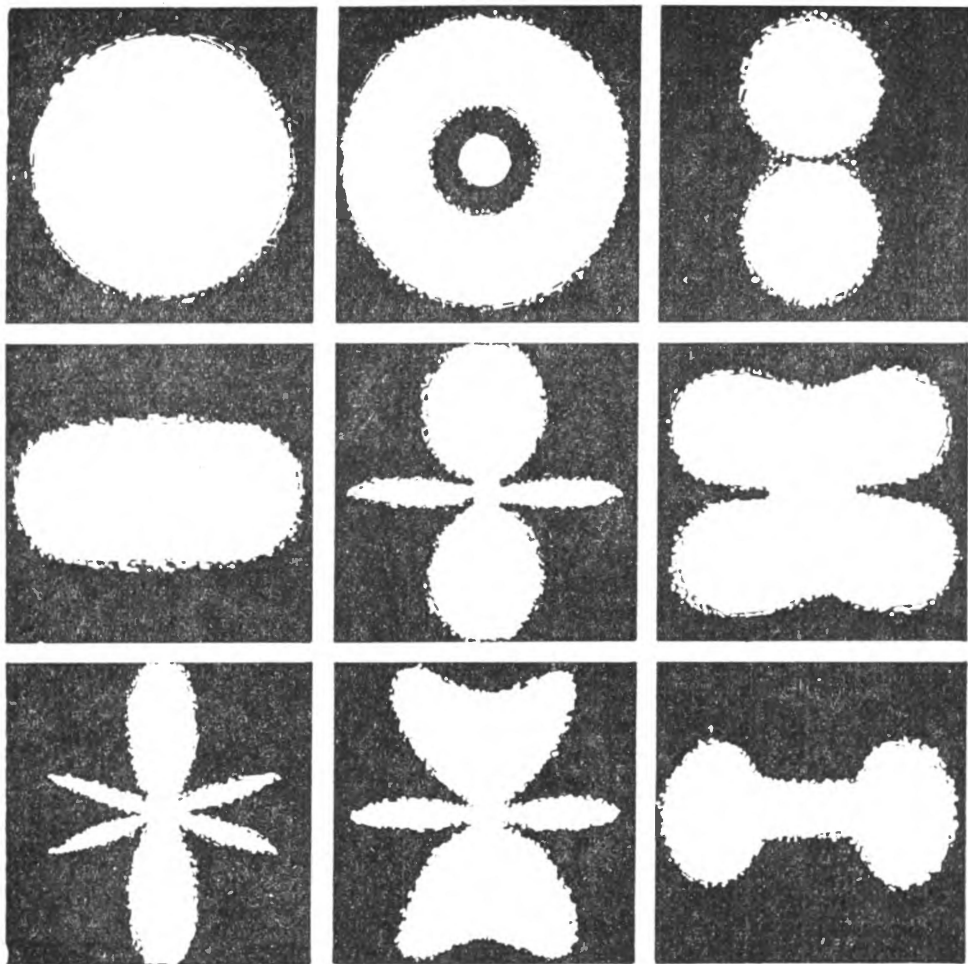
Пожалуй, ни одна область физики не знала таких стремительных темпов развития, как квантовая механика. За каких-нибудь пять лет с момента рождения идеи де-Бройля были во всех существенных чертах разработаны методы и математический аппарат квантовой механики, получены результаты огромного научного значения и сделаны далеко идущие попытки осмыслить эти результаты.

К 1928 году квантовая механика предстает перед взорами пораженных современников как вполне сложившаяся, зрелая наука, стройная и всесторонне обоснованная не в меньшей мере, чем классическая механика. Но на развитие последней потребовалось более двухсот лет, квантовая же механика создана за пятилетие. Таковы темпы двадцатого века!

И как бурный поток, прорвав плотину, спокойно разливается и образует все ширящееся озеро, так и квантовая механика после пятилетней эпохи «бури и натиска» входит в рамки более спокойного развития. Она захватывает в свою сферу все новые и новые группы явлений, овладевая ими и давая им правильное истолкование.

И, конечно, первая добыча квантовой механики — атом. С атома началось развитие новой физики Планком и Бором. Им же в первую очередь интересуется квантовая механика.

Прежде всего ей предстоит еще раз пересмотреть, как устроен атом. Бор ввел понятие об электронных орбитах. Это, как мы уже знаем, непосредственно и попахивает классической физикой. Для квантовой механики понятие орбиты вовсе неприемлемо. Орбита — это по существу траектория



движения электрона в атоме, а квантовая механика не без оснований утверждает, что представление о траекториях частиц в микромире бессмысленно.

Чем же заменить орбиты? Только распределениями вероятностей местонахождения электрона в атоме. Нам уже известно, что полная энергия электрона в атоме определяется его расстоянием от ядра. Набор дозволённых энергий отвечает набору дозволённых расстояний от ядра.

Но от орбиты как-то не хочется отказываться: уж очень она наглядна. Квантовая механика, снисходя к человеческим слабостям, позволяет это

сделать: «Ладно, если вам уж так необходимо, сохраните представление об орбите. Проведите кривую линию через те точки, в которых вероятность пребывания электрона с данной дозволенной энергией является наибольшей. И считайте эту линию вашей орбитой. Но только помните, что электрон — не точка, что его размазывает собственная волна. Поэтому и ваша орбита имеет только условный смысл».

Хорошо, мы и за это благодарны квантовой механике. Проводим орбиты и радуемся стройной системе кривых линий. А снисходительная квантовая механика тем временем добавляет: «Знаете ли вы, чем интересны эти орбиты? Оказывается, все они таковы, что на их длине укладывается ровно целое число электронных волн де-Бройля. На первой, самой близкой к ядру орбите,— одна волна, на второй — две, на третьей — три и так далее».

Это действительно очень интересно и служит для нас новым доказательством «универсальной» сущности волн де-Бройля.

Но квантовая механика не позволяет нам остановиться в созерцании. «Довольно, — говорит она, — понаслаждались наглядными орбитами, и хватит. Забудьте о них — ведь их в действительности не существует. Вместо электрона на орбите вам придется представить себе «облако вероятности». Именно так и изображается электрон в атоме. В тех местах, где вероятность пребывания электрона больше, облако выйдет более густым, в других местах — более прозрачным. Посмотрите на фотографии этих облаков!»

Фотографии? Значит, все-таки удалось сфотографировать неуловимые электроны? Но не спешите радоваться: соотношения неопределенностей не обойдешь. Эти фотографии сделаны не с атомов, а со специальных дымовых моделей, внешне похожих изображающих распределение плотности «облаков вероятности» атомных электронов.

На фотографиях видно, что электронные облака имеют различную форму. Одни из них шарообразны, другие вытянуты и похожи на сигары. Это разнообразие связано с тем, что энергии электронов в атомах зависят не только от их расстояния до ядра.

Впрочем, для самого простого из атомов — атома водорода — это действительно так. В этом атоме один-единственный электрон находится в поле своего ядра. Взаимодействие между ними — это взаимодействие двух одинаково по величине и противоположно по знаку заряженных частиц.

Как мы знаем, такое взаимодействие описывается законом Кулона. Энергия этого взаимодействия зависит только от расстояния между электроном и ядром. Отсюда и понятно, почему облако электрона в атоме водорода имеет форму оболочки шара: ведь точки поверхности шара все находятся на одном и том же расстоянии от центра шара — в данном случае ядра. Все точки электронного облака отвечают поэтому одинаковой энергии электрона.

Но когда в атоме появляются дополнительные электроны, картина их электрических взаимодействий друг с другом и с ядром утрачивает такой

«примитивный» вид, как в атоме водорода. Ведь электроны теперь не только притягиваются к ядру, но и отталкиваются друг от друга.

Разумеется, в многоэлектронной семье, какой является сложный атом, все электроны, хотя и враждуют друг с другом, все же питают неодолимую любовь к центру семьи — ядру. Природа мудро играет на этих взаимоотношениях и быстро наводит твердый порядок в атомных семьях.

Как выглядит этот порядок, мы и можем сейчас видеть на приведенных фотографиях. Облака электронов значительно усложняют свою форму, проникают друг в друга. Возникает ажурное их переплетение. Если эту картину можно было бы изобразить объемно, да еще подкрасить в разные цвета, мы бы ахнули от ее удивительной переливчатой красоты!

Далеко до нее разлинованной картинке электронных орбит!

Об однообразии в разнообразии

То, что радует глаз, задает работу уму. Как разобраться в сложнейшем сплетении ажурных электронных облаков, как установить, где кончается одно облако и начинается другое?

Нам для этого предстоит заглянуть в мастерскую «атомного архитектора» — природы — и понять, как она возводит такие миниатюрные и вместе с тем красивые и прочные здания, как атомы.

Строительный материал, который природа использует для атомов, известен — это электроны и ядра. Известен и цемент, сплавивающий их воедино: это сила притяжения электронов к противоположно заряженному ядру.

И вот мы в мастерской нашего архитектора. Первое, что привлекает внимание, — это огромная, во всю стену, таблица. Вы ее легко узнаете: периодическая система химических элементов Д. И. Менделеева. На сегодняшний день в ней заняты 102 клеточки — известно 102 химических элемента.

По этим ста двум «типовым проектам» природа строит серийным способом мириады атомных зданий во всей Вселенной. Больше сотни «проектов» — это не мало!

Но... подождем завидовать атомному разнообразию — оно кажется таким лишь на первый взгляд. Природа строит куда экономнее, чем самый рациональный архитектор.

Прежде всего выясним тот основной принцип, которым руководствуется атомный архитектор, укладывая кирпичи в здание атома. Этот принцип был открыт немецким ученым Вольфгангом Паули в годы возникновения квантовой механики и назван его именем.

Он приложим не только к атомам, но и ко многим другим коллективам частиц микромира. Принцип Паули гласит: в любом коллективе микроча-

стиц вещества каждое состояние с дозволенной энергией может быть занято не более чем одной частицей.

В дальнейшем, правда, выяснилось, что этот принцип не абсолютно универсален, справедлив не для всех видов микрочастиц. Необходимые оговорки мы будем делать по ходу рассказа, а пока укажем, что к электронам, какие бы «коллективы» они ни образовывали, этот принцип приложим всегда.

Здесь электронным «коллективом» является атом. Другой атом — другой «коллектив». Но во всех атомах данного химического элемента электронные семьи похожи одна на другую как две капли воды. (Мы отдаем себе отчет в неудачности этого сравнения. Что там одинаковость капель воды в сравнении с тождественностью двух атомов! Когда-нибудь люди, наверное, будут говорить: они похожи, как пара электронов!)

Еще одно чудо — но пока без объяснения

Но вернемся к «атомной архитектуре». Впрочем, нам придется отвлечься еще раз, чтобы поговорить о так называемом спине электрона.

Смысл спина мы опишем двумя главами позже. Пока же коротко укажем, что спин совершенно невозможно понять с позиций классической физики. Его первооткрыватели наивно полагали, что спин может быть как-то связан с «собственным вращением» электрона («спин» по-английски и означает «волчок»).

Земля вращается вокруг Солнца? Вращается. Но, кроме того, она вращается и вокруг собственной оси.

Электрон вращается вокруг ядра. Но точно так же он может одновременно вращаться вокруг собственной оси.

Вы поняли это «наглядное объяснение»? А теперь начисто забудьте его, попросту выбросьте из головы!

Автор, конечно, просит извинения за такое, не совсем вежливое обращение к читателю. Но, к сожалению, это нелепое, хотя и «образное», объяснение спина очень распространено в популярной литературе. По поводу такого объяснения можно только «невежливо» ругаться.

Электрон вращается вокруг ядра? — Ничего подобного. Движение электрона в атоме гораздо сложнее. Пытаться представлять его с помощью «классического» понятия вращения — это значит давать жалкую и притом искаженную копию реального положения вещей.

Электрон вращается вокруг собственной оси? — Даже отдаленно нет ничего похожего. Да и что такое «ось» электрона? Электрон ведь квантовой механикой представляется не в виде шарика, а точкой¹. «Ось» точки — экая чепуха! «Вращение» точки вокруг себя, — да это и представить себе невозможно!

¹ Это представление заведомо неточно, но с другим квантовая механика не «умеет» работать. Подробнее об этом сказано в последней главе.

Вот так и получается, что о спине электрона нельзя составить никакого сколько-нибудь наглядного представления. Впрочем, ничуть не нагляднее выглядят те «кентавры», с которыми мы имели дело досих пор — частица-волна (электрон) и волна-частица (фотон).

Существование спина проявляется для атомного электрона в том, что к моменту количества движения (моменту импульса) электрона, которым он обладает в своем движении в атоме возле атомного ядра, добавляется некоторая величина, принадлежащая уже собственному движению электрона. Иными словами, эта величина не связана с тем, движется ли электрон около ядра или же он путешествуем «полусвободно» в куске металла, или же он, наконец, практически совсем свободно движется в межзвездном пространстве. Спин электрона всегда имеет одну и ту же величину и существует только «без отрыва» от электрона.

Оказывается, спин электрона в атоме может как складываться с моментом импульса электрона, отвечающим его движению около ядра, так и вычитаться из него. Это можно выразить и другими словами: оба значения полного момента импульса электрона отвечают как бы противоположным собственным движениям электрона, которые в сущности ничем не отличаются друг от друга. Это «в сущности» имеет точный смысл: в атоме, не подвергающемся никаким внешним воздействиям, оба указанных движения имеют одну и ту же энергию.

В результате каждый уровень дозволенной энергии в атоме может быть занят не одним, а двумя электронами, имеющими спины, направленные в противоположные стороны. Таково первое уточнение, которое вносится в принцип Паули.

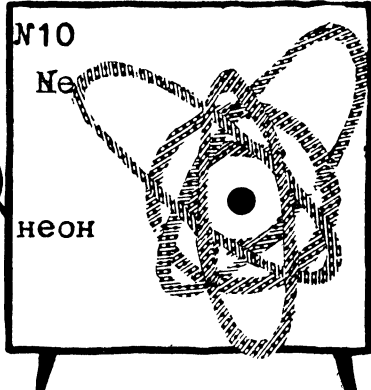
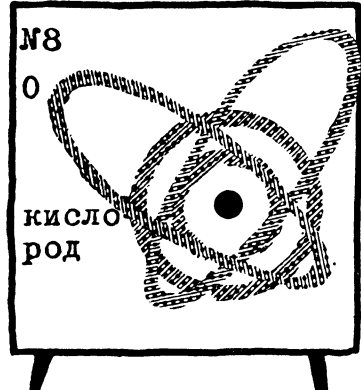
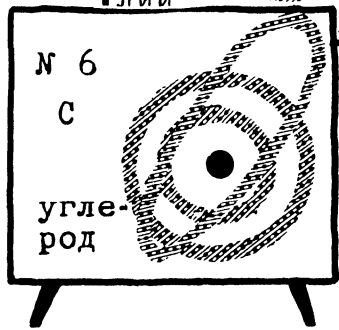
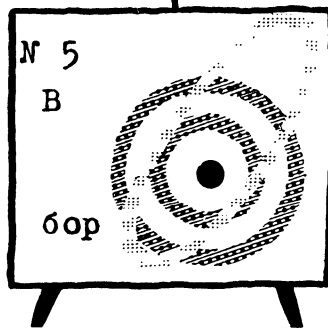
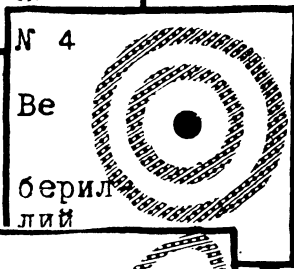
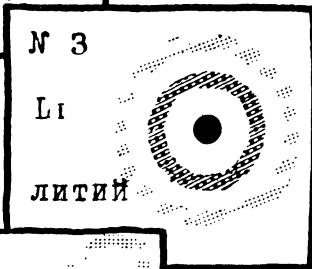
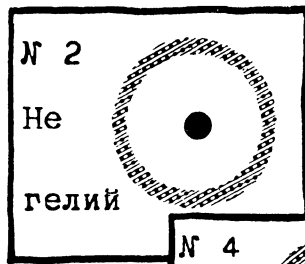
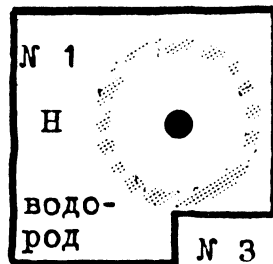
„Атомный архитектор“ за работой

А теперь окончательно вернемся в мастерскую «атомного архитектора». Пройдемся по выставке «типовых проектов».

«Типовой проект» № 1. Атом водорода. Нас он уже не интересует. Слишком «просто» устроен этот атом! Хотя до этой простоты ученые добивались не один век.

«Типовой проект» № 2. Атом гелия. Кажется, и в нем не может быть ничего интересного. Мы только что выяснили, что каждое электронное облако может образовываться двумя электронами. Значит, атом гелия, видимо, не будет отличаться от атома водорода. Посмотрим на «готовую модель»: так оно и есть, только электронное облако вдвое плотнее. Оно теперь образовано не одним, а двумя электронами.

У атома лития («типовой проект» № 3) мы замечаем образование второго шарообразного электронного облака, внутри которого находится первое, гелиевое. Это понятно: принцип Паули не допускает, чтобы в каждой энергетической атомной «квартире» проживало более двух электронов.



ВЫСТАВКА РАБОТ АТОМНЫХ АРХИТЕКТОРОВ

Второй жилец в «квартире на втором этаже» появляется в следующем за литием атоме бериллия. Пока заселение атомного дома происходит вполне упорядоченно и благопристойно.

Но вот мы обращаемся к «типовому проекту» № 5 — атому бора. Видно, что наш «атомный архитектор» долго мучился, пытаясь вселить нового жильца. Надо было и «кубатуру» атомного дома сэкономить, и так поселить жильца-электрона, чтобы он как можно реже встречался с «въехавшим» ранее. Ведь атомные жильцы весьма неприязненно относятся друг к другу. Они испытывают взаимное отталкивание и, даже проживая в одной квартире, предпочитают не встречаться, двигаясь как бы в противоположных направлениях.

И «атомный архитектор» нашел вполне «модернистское» решение: он прорыл сквозную «проходную» квартиру через все этажи атомного дома и поселил пятого жильца в ней! И, видимо, архитектору так понравилось это решение, что в следующем «проекте» — атоме углерода — он вселил в эту, «на-попа поставленную» квартиру второго жильца.

Следующие четыре «типовых проекта» не радуют ничем новым. Архитектор всерьез оседлал идею «междуэтажных» квартир и прорыл еще две, под углом 120 градусов к первой квартире и друг к другу.

Вот на какие ухищрения пришлось пуститься природе, чтобы расселить «сварливых» соседей в небольшом объеме атомного дома. Но зато теперь они не ссорятся, не требуют расселения, а это очень существенно для прочности того дома, в котором они живут. Ведь природа строит атомы не на один день!

И здесь перед нами вырисовывается, вслед за принципом Паули, второй, столь же общий принцип, которым руководствуется природа при постройке атомов. Это — принцип энергетической выгоды.

Взаимное отталкивание электронов должно сильно увеличивать потенциальную энергию атома. Но в природе какое-либо образование тем надежнее, устойчивее, чем меньше его потенциальная энергия. Если вы упадете с десятого этажа на землю, равнодушная природа вам нисколько не посочувствует, но зато не преминет заявить: «Ну вот, теперь вы чувствуете себя устойчивей!»

Такое же стремление к устойчивости проявляется и в мире атомов. Тот атом устойчив, у которого наименьшая возможная потенциальная энергия. И природа в разработке своих «типовых проектов» атомов немало усилий затратила на преодоление взаимной антипатии электронов, умело скомпенсировав ее общим тяготением электронов к ядру.

Пока что принцип энергетической выгоды в атомах проявился только в причудливой внутренней планировке атомных построек. Но подождите, он еще проявится и в не менее оригинальном распределении «жилой площади» в атомах.

«Ненормальные» атомы

Итак, уже нащупаны два основных принципа постройки и заселения атомных зданий. Это принцип Паули и принцип энергетической выгоды.

А в чем же проявляется волновая природа электронов? Только ли в том, что вместо электронных орбит в атоме существуют заряженные «облака вероятности»?

Оказывается, нет. Волны де-Бройля в атоме имеют еще одно замечательное проявление. Они определяют «емкость» атомных построек.

Вспомним, что электронные облака характеризуются тем, что на их протяжении укладывается целое число волн де-Бройля. Оказывается, что это число определяет не только «номер» бывшей орбиты, но и плотность электронного облака, образованного всеми теми электронами, для которых в облаке укладывается одно и то же число их дебройлевских волн.

Такое «объединенное» электронное облако (мы уже догадываемся, что оно состоит из ряда «парных» облаков) физики не очень удачно назвали оболочкой. Квантовая механика установила и соотношение между вместимостью оболочки, то есть наибольшим возможным числом электронов в ней, — N , и «номером» оболочки, то есть числом умещающихся в ней электронных волн, — n . Это соотношение имеет очень простой вид:

$$N = 2n^2.$$

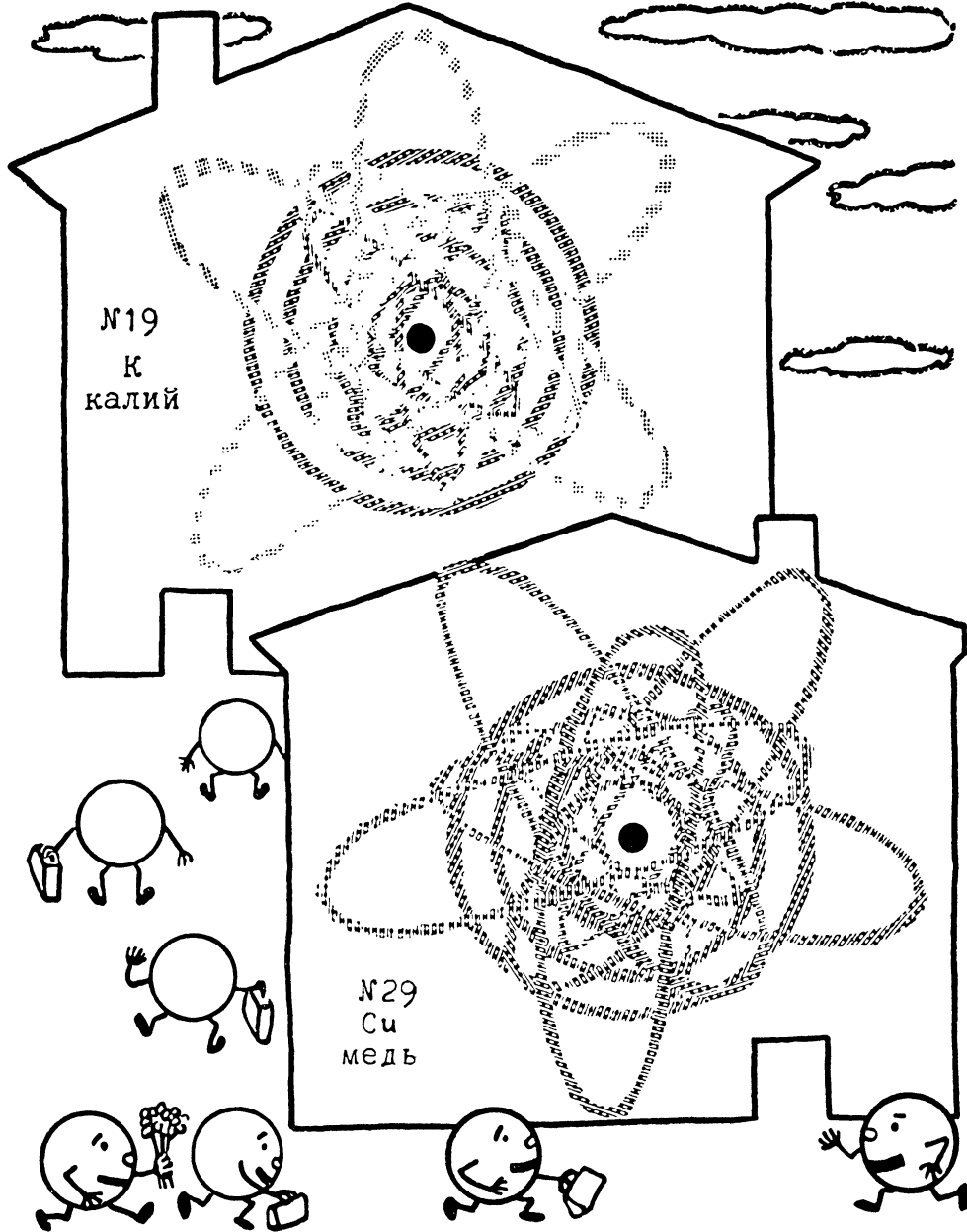
Так, в первой оболочке (она обозначается латинской буквой K) могут находиться $2 \cdot 1^2 = 2$ электрона, во второй оболочке (обозначается L) $2 \cdot 2^2 = 8$ электронов, в третьей (M) $2 \cdot 3^2 = 18$ электронов, в четвертой (N) $2 \cdot 4^2 = 32$, в пятой (O) $2 \cdot 5^2 = 50$ электронов и так далее.

Запомним эти числа и вернемся к архитектуре атомов. Мы видим, что первой заселяется самая маленькая и маловместительная K -оболочка. Ее заполнение заканчивается уже в атоме гелия. Собственно говоря, эта оболочка — один этаж с одной квартирой на двоих.

Следующая оболочка устроена сложнее. Она занимает не только второй этаж, но и три «междуэтажных» квартиры, каждая тоже на двоих. Ее заполнение заканчивается в атоме неона («типовой проект» № 10, или десятая клеточка в периодической таблице Д. И. Менделеева).

Дальше начинается заселение третьей оболочки на 18 жильцов. Вплоть до аргона (№ 18) оно происходит, как и в предыдущей оболочке. Сначала заселяется сам третий этаж, а затем три «междуэтажные» проходные квартиры. Но вот в следующем за аргоном атоме калия этот стройный порядок нарушается.

Теперь требуется заселить еще пять «междуэтажных» квартир, но спланированных, однако, по-другому. В отличие от первых трех квартир эти — еще более узкие, вытянутые. И новый жилец отказывается въезжать в такую неудобную квартиру, он требует нормальных жилищных условий.



№19
К
калий

№29
Си
медь

Ему удается настоять на своем. Архитектор поселяет его в хорошей квартире на четвертом этаже. А чтобы он не скучал в одиночестве, в следующем за калием атоме кальция добавляет к нему еще один электрон.

Вот где в полной мере выступает принцип энергетической выгоды! Дело, конечно, не в привередливости жильца-электрона и податливости архитектора-природы. Дело в том, что поселение электрона на следующем этаже при еще не полностью заселенном предыдущем дает более устойчивый атом, чем при расселении «по закону». Потенциальная энергия отталкивания электронов в таком атоме оказывается меньше.

Но затем, словно спохватившись, природа железной рукой воцаряет прежний порядок в заселении атома. В пяти атомах — от скандия (№ 21) до меди (№ 29) «новоприбывающие» жильцы поселяются в те самые длинные и узкие неудобные квартиры.

Вот эти-то атомы, в которых уже живут «наверху», а квартиры «внизу» пустуют, благодаря нарушению обычного порядка при их заселении приобрели целый ряд необычных свойств. Их так и назвали «аномальными», или, по-русски, «ненормальными». Нам в путешествии по мастерской «атомного архитектора» встретятся они не раз.

Итак, строго говоря, третья оболочка должна была полностью заселиться у никеля (№ 28). Но из-за того, что природа, не заселив полностью одну оболочку, начала заселять другую, оболочки перемешались и третья оболочка заселяется «втихую» до конца под уже начавшей заселяться четвертой оболочкой — у цинка (№ 30).

Дальше — не лучше. Как только дело доходит до заселения узких и длинных «междуэтажных» квартир, природа не может устоять перед требованиями электронов и сначала селит парочку жильцов на следующий этаж, в следующую оболочку. И лишь затем, как бы под их показным прикрытием, потихоньку заселяет неудобные квартиры этажом ниже.

Та же история, что в группе от скандия до меди, повторяется в группах атомов от иттрия (№ 39) до палладия (№ 46), от лантана (№ 57) до иттербия (№ 70). А дальше уже все атомы вплоть до последнего открытого nobelia (№ 102) так и идут с дефектами заселения. У них уже не одна, а две-три оболочки ждут своих жильцов. Ждут, но никогда не дождутся, — по причинам, которые мы изложим в следующей главе.

Нестройно, может показаться, но зато энергетически выгодно. Вот как строит природа.

Так оказывается, что волновой закон, определяющий населенность и порядок заселения атомных зданий, не всесилен. Его часто подправляет не менее важный и сильный закон устойчивости создаваемых природой атомов.

Заканчивая экскурсию по мастерской «атомного архитектора», напоследок остановимся возле таблицы периодической системы Д. И. Менделеева. С этой таблицей мы знакомимся еще в школе.

В левой ее части есть графа «Периоды», а под ней приведены цифры. Сколько их всего? Семь. Сколько различных элементов (то есть атомных построек) в каждом из периодов? В первом — 2, во втором — 8, в третьем — тоже 8, в четвертом и пятом — по 18, в шестом — 32 (не забудьте посчитать редкоземельные элементы — лантаниды внизу таблицы), в седьмом — пока 16 (причины этого, как уже сказано, будут описаны в следующей главе).

А теперь вспомним цифры, характеризующие «емкость» электронных оболочек, в порядке ее возрастания: 2, 8, 18, 32 и так далее. Сравним эти цифры с приведенными выше — они одинаковы. Но только непонятно, почему в периодической таблице некоторые цифры повторяются по два раза: 2, 8, 8, 18, 18, 32 (последний период не будем пока что рассматривать).

Эти повторяющиеся цифры — результат тех самых нарушений порядка в заселении атомов электронами, о которых мы рассказывали выше. Поэтому третий период вместо того, чтобы закончиться на никеле (№ 28), кончается уже на аргоне (№ 18). И дальше этот «сдвиг», на который накладываются «сдвиги» от других нарушений порядка заселения атомов, продолжается до самого конца периодической таблицы.

В результате соответствие между оболочками и периодами становится не таким простым. Но все же «емкость» периода нигде не превышает «емкости» соответствующих ему оболочек. Так квантовая картина заселения атомов объясняет одну важную черту периодической системы.

Взглянем теперь на «шапку» таблицы. Там крупно написано «Группы», а под ней идут римские цифры от I до VIII и, совсем справа, — 0. Что обозначают эти цифры? Любой школьник охотно ответит: «Да это же валентности элементов!»

Будем строги и поправим его. Во-первых, не просто валентности, а валентности по отношению к фтору (или, как иногда говорят, по отношению к водороду). А во-вторых, что такое валентность?

Наш школьник быстро продолжит, что валентность — это число атомов, которые может присоединить к себе... и так далее. Но сегодня такое понимание вопроса сохраняется разве что в описательной химии («положим в сосуд, нагреем, наблюдаем, подольем другой реактив, выпадет осадок...»). Теоретическая химия давно уже стала на иной, на физический фундамент.

Валентность, точнее, валентность по отношению к фтору, — это число электронов в самой внешней, самой удаленной от ядра оболочке атома. При таком определении валентность совпадает с номером группы всюду, за исключением двух последних столбцов периодической таблицы. Цифру VIII правильнее было бы поставить над самым последним столбцом, а над пред-

последним — сразу три цифры: 0, 1 и 2. Для этого, как мы увидим, есть существенные основания.

Но почему на самой внешней оболочке атома никогда не бывает больше восьми электронов? Это легко понять, вспомнив порядок распределения «жилой площади» в атомах. В первой оболочке — всего 2 электрона, во второй — 8, в третьей должно было бы быть 18, но ее заселение временно приостанавливается на аргоне, когда в ней 8 электронов. После этого внешней оболочкой стала четвертая, а третья, превратившись тем самым во внутреннюю, дозаселялась под нею. То же случилось затем в свою очередь с четвертой оболочкой, и так далее.

Как только внешняя оболочка заселяется до восьми электронов, дальнейшее ее заполнение становится невыгодным. Но вслед за тем появляется новая оболочка, а недостроенная уходит в глубь атома. Дозаселится ли она или нет — для нас теперь неважно: химические свойства атома определяет только самая внешняя его оболочка.

Так становятся возможными восемь типов химического поведения атомов, в соответствии с числом электронов на их внешней оболочке. Прежде чем идти дальше, надо отметить, что полностью заселенная восьмиэлектронная оболочка имеет потенциальную энергию, значительно меньшую, чем с пустыми или полупустыми «квартирами» в ней. А раз так, значит, атом с такой оболочкой обладает повышенной устойчивостью, в том числе и в химическом отношении.

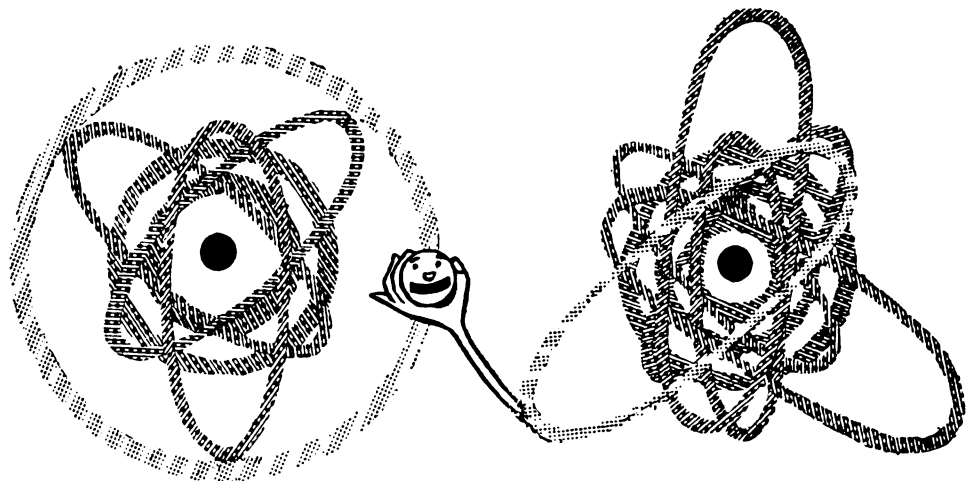
Атомы с полностью заселенными внешними оболочками «благородно» шествуют среди толпы оживленного химического «люда», не вступая с нею ни в какой контакт. Соответствующие элементы так и получили название «благородных», а также инертных. Они все и собраны в последнем столбце таблицы Д. И. Менделеева.

«Аристократы» атомного мира шествуют через толпу, а толпа завидует им и пытается подражать по мере своих сил. Все «неблагородные» атомы обнаруживают более или менее ясно выраженное стремление создать у себя полную восьмиэлектронную внешнюю оболочку.

Сами они сделать этого не в состоянии и подыскивают себе партнеров. Однако, понятное дело, если у одного есть аристократический камзол, а у другого — изящные панталоны, то этого мало, чтобы составить два полных одеяния на двоих — его может хватить только на одного.

И вот тут происходит такое, что химики называют реакцией, а мы образно наречем «самопожертвованием»: один отдает другому панталоны, а сам следует за ним как будто нагишом. Но это не «голый король»: сбрасывая лишнюю одежду, он обнажает скрытый под ней настоящий аристократический наряд! (Правда, сказанное относится лишь к атомам, следующим за неонами.)

В самом деле, рассмотрим, например, реакцию между натрием и хлором, приводящую, как известно, к образованию «соленой» молекулы NaCl . У ато-



ма натрия есть «пantalоны»: на внешней, третьей его оболочке обитает один электрон. Атом хлора владеет «камзолom»: он на той же оболочке имеет семь электронов. Натрий с большой охотой жертвует хлору свой единственный электрон, и хлор приобретает «благородную» восьмиэлектронную оболочку.

Но и натрий не остается внакладе. Сбросив «пantalоны», он обнажает... полную восьмиэлектронную группу благородного газа неона! Так двум «простолюдинам» удастся одновременно стать двумя «аристократами», но, в отличие от истинных «аристократов», лишь вдвоем, неразрывно связав себя в молекулу.

Атомы, таким образом, разделяются на «дающих» и «берущих». Те из них, которые имеют на внешней оболочке менее четырех электронов, охотнее их отдают. Те же, у кого это число больше четырех, охотнее принимают. В самом деле, легче приобрести, скажем, два электрона, чем отдать шесть (такая ситуация возникает в атоме кислорода).

В группе под номером IV сидят «ленивые простолюдины». У них четыре электрона на внешней оболочке, и они подчас долго колеблются, «братъ» или «отдавать». Эти элементы так и были названы амфотерными, что на языке химии означает примерно «ни рыба ни мясо». От таких элементов действительно можно ожидать любого химического поведения.

А вот в группе под номером VIII сидят наши «ненормальные» атомы. И сидят там, вообще говоря, не по праву. У них на внешней оболочке один или два, но никак не больше электронов. Зато заселение лежащей под ней оболочки оказывает значительное и весьма сложное влияние на поведение электронов внешней оболочки.

В результате «ненормальные» атомы способны выкидывать всякие фоку-

сы. Например, они, как правило, имеют переменную валентность: в одной реакции одну, в другой — совершенно другую. То, что их поместили под номером VIII, означает лишь, что высшая валентность по отношению к кислороду у них может быть равна 8, иными словами, каждый такой атом может присоединять к себе четыре кислородных атома.

Но не думайте, что другие «ненормальные» атомы, укравшиеся в других клетках периодической таблицы, ведут себя более пристойно. Ничуть не бывало! Они способны на такие же выходы, как и их собратья из VIII группы.

Таблица Менделеева этого обстоятельства не отражает. От нее нельзя, однако, того требовать. Она создавалась еще в те времена, когда никто не знал даже, как устроен атом. Сегодняшние же ученые не торопятся переделывать таблицу. В поведении аномальных элементов еще много непонятного. Вот когда это все прояснится...

Рождение спектра

Теперь, после того как мы увидели атом «в новом свете» квантовой механики, нам предстоит познакомиться с его излучением. Вы, вероятно, помните, что теория Бора, объяснив происхождение спектров атомов, не смогла правильно описать закономерности спектров. Внести необходимые поправки в картину, нарисованную Бором, пришлось квантовой механике.

В объяснении происхождения спектров квантовая механика в принципе согласна с теорией Бора. При прыжках атомных электронов из состояния с одной энергией в состояние с другой энергией разность этих энергий воплощается в виде кванта электромагнитной энергии — фотона. Но в это объяснение вносится затем поправка.

Откуда и куда перескакивает электрон? Пока в теории существуют электронные орбиты, перескоки легко себе представить. Двигался электрон по орбите, как по рельсам, и внезапно перескочил на другую колею. Если при этом прыжке он уменьшил свою энергию, то рождается фотон. Если же на новой колее его энергия возросла, значит, фотон был поглощен перед прыжком.

Но вот квантовая механика отказывается от орбит и заменяет их электронными облаками. Теряет наглядность и процесс перескоков электронов. Теперь его надо понимать, как мгновенное изменение формы и расположения электронного облака в атоме. Излучение или поглощение фотона словно встряхивает атомное «желе», и оно принимает другую форму.

Отказавшись от наглядности, квантовая механика вводит для описания электронных прыжков новое качество — вероятность. В теории Бора перескок электрона с орбиты на орбиту возможен всегда, и вероятность его не зависит от того, каковы эти орбиты. В этом заключении и лежит корень ее неудачи.

Квантовая механика показывает, что такой вывод неправилен. Электронные прыжки имеют вероятность, очень существенно зависящую от формы электронных облаков, которые отвечают электрону до и после прыжка. При этом вероятность прыжка, грубо говоря, тем больше, чем сильнее перекрываются друг другом эти облака, чем значительнее их взаимное проникновение.

Образно говоря, электрон может перескочить в новое состояние, как пассажир прыгает из одного поезда в другой, на мгновение поравнявшийся с ним. Понятно, что для этого еще мало сообщить пассажиру нужную для прыжка энергию. Нужно еще, чтобы поезда оказались рядом. И, завершая нашу аналогию, отметим, что чем длиннее оба поезда, чем в большей «области пространства» они близки друг к другу, тем легче пассажиру перепрыгнуть из одного поезда в другой.

Нечто подобное происходит и в атоме. В нем «поезда» имеют форму электронных облаков. Мы уже знаем, что эта форма может быть весьма разнообразной — и шарообразной, и сигарообразной.

Изучение формы электронных облаков наводит на простые (конечно, только на словах) закономерности. Два шарообразных облака с общим центром (ядром атома) практически очень слабо проникают друг в друга; можно с полным основанием говорить, что они не соприкасаются. Значит, между отвечающими им состояниями электронный прыжок не может осуществиться. Теперь, если вложить сигару в шар, то нетрудно убедиться в том, что они пересекаются тем значительнее, чем толще и короче сигара. Две сигары тоже могут пересекаться, но здесь уже подсчет сложнее. Ясно лишь, что толстая короткая и узкая длинная сигары проникают друг в друга сильнее, чем шар и узкая сигара.

В соответствии с этим и будут находиться вероятности перескоков электронов из шарового облака в сигарообразное или между самими сигарообразными облаками. Закономерности, делящие электронные прыжки в атомах на более вероятные и менее вероятные, получили в квантовой механике название правил отбора.

Эти правила квантовая механика сформулировала очень категорично, разрешив одни прыжки и запретив другие, менее вероятные. Но природа не подчинилась этому запрету.

Правила отбора более или менее хорошо соблюдаются только в легких атомах, в которых еще мало электронов, так что их облака еще довольно редко пересекаются друг с другом. Но вот в тяжелых многоэлектронных атомах, где возникает настоящая «мешанина» облаков, запреты квантовой механики в значительной мере теряют свою силу.

Так в перескоках электронов, в причудливом и быстро сменяющемся трепете электронных облаков рождаются фотоны. Влетая в спектральный прибор и пройдя в нем «сортировку», фотоны создают спектральные линии

всех цветов радуги. Чем больше испускается фотонов атомом в каждую секунду, тем ярче отвечающие ему линии.

И если у нас неизменно число атомов, то яркость спектральных линий может зависеть только от одного — от частоты электронных прыжков в атомах. А эта частота, как мы уже знаем, определяется вероятностью прыжков. Разные облака, разные вероятности — одни большие, другие ничтожные.

И каждой энергии фотона, каждой спектральной линии отвечает своя вероятность, своя яркость. Так рождается спектр атома, состоящий из ряда линий различной яркости.

Однако легче рассказать обо всем этом, чем вычислить проникновение электронных облаков друг в друга, чем рассчитать вероятности электронных прыжков. Но квантовая механика блестяще справилась с этой задачей и достигла прекрасного согласия с наблюдаемыми спектрами. Теперь уж здание спектроскопии встало на воистину гранитный фундамент!

Линии - толстяки и линии - двойники

Казалось бы, спектроскописты теперь должны были быть удовлетворены. Однако получилось иначе. Техника анализа спектров быстро развивалась, приборы ее становились все сильнее и чувствительнее.

И спектроскописты подсунули физикам-теоретикам два новых хитрых вопроса.

Фотон соответствует линии одной частоты, одной длины волны? Да. Но почему же тогда линии на фотопластинке спектрального прибора не выходят бесконечно узкими, а имеют некоторую, подчас довольно значительную, ширину?

До появления квантовой механики физики могли бы ломать головы над этим с виду наивным вопросом десятки лет. Теперь же потребовалось лишь непродолжительное размышление.

Виновником этого обстоятельства оказались опять же волновые свойства электрона с их неизменным атрибутом — соотношениями неопределенностей.

Мы уже говорили, что электрон в атоме имеет точно определенную энергию. Так какие же еще могут быть неопределенности? Начальная энергия определена, конечная — тоже; значит, и их разность, отвечающая энергии фотона, тоже должна быть абсолютно точной величиной!

Оказывается, однако, что здесь есть маленькая хитрость. Точные уровни энергии отвечают, как мы помним, стационарным состояниям электронов, то есть состояниям, не меняющимся «вовсеки». А что такое электронный прыжок, как не нарушение стационарности? Был электрон в одном состоянии, перепрыгнул в другое — значит, «вечного» состояния уже нет. И тут же вступает в силу соотношение Гейзенберга.

Сколько времени «живет» электрон в атоме спокойно, до очередного

прыжка? По-разному. Обозначим это время через Δt . И тогда из сравнения со страницей 77 сразу получается величина неопределенности в энергии фотона:

$$\Delta E \sim \frac{\hbar}{\Delta t}.$$

А от нее по формуле Планка для квантов энергии легко перейти к неопределенности в частоте фотона. Она оказывается очень просто связанной с временем «оседлой жизни» электрона в атоме:

$$\Delta \omega \sim \frac{1}{\Delta t}.$$

Иными словами, чем более «оседло» живет электрон в атоме, тем уже спектральные линии, отвечающие его переходам в другие состояния, и наоборот. Именно поэтому при высоких температурах и давлениях, когда многие электроны в атомах ведут поистине «цыганское» существование, спектральные линии оказываются очень толстыми и сильно размытыми.

Второй хитрый вопрос был вызван тем, что многие спектральные линии, отвечавшие, казалось бы, одной длине волны, на поверку оказались состоящими из ряда очень близких друг к другу линий. Такую «тонкую» структуру спектральных линий удалось обнаружить лишь в нашем веке благодаря успехам спектральной техники.

Выходило, что при электронных прыжках между одними и теми же состояниями могут рождаться фотоны с различающимися, пусть и немного, энергиями! Выходило, что физики только похвастались тем, что могут точно определять энергии электронов в атомах.

Физики с негодованием отвергли такое подозрение. Но для этого им пришлось «придумать»... спин. Да, спин был открыт именно благодаря вот этим «тонкостям» в спектрах!

Общее состояние двух электронов с противоположно направленными спинами, о котором мы рассказывали при посещении мастерской «атомного архитектора», оказывается при рождении спектров, однако, слегка «необщим». Здесь мы не имеем возможности рассказать о сложном взаимоотношении обычного момента импульса и спина электрона; кое-что об этом мы скажем ниже.

Пока же отметим, что именно оно и приводит к тому, что энергии электронов оказываются немного различающимися для разных направлений спинов. Это и вызывает раздвоение спектральных линий: вместо одной линии появляется пара линий-близнецов с одинаковыми яркостями.

Правда, такие «двойняшки» рождаются обычно только в тех случаях, когда на внешней электронной оболочке обитает один-единственный электрон. Если же число электронов на этой оболочке растет, то могут рождаться и «тройни», и «четверни», и даже более многочисленные «потомства» быв-

шей спектральной линии. В атомном мире, в отличие от мира людей, это весьма распространенное явление.

Так квантовая механика с честью ответила на два хитрых вопроса спектроскопистов.

На этом мы закончим рассказ об атомах. Впереди — знакомство с жизнью атомных «семей» — молекул — и даже с жизнью целых атомных «армий» — кристаллов.

„Бракосочетание“ атомов

Вспомните проделку атомов-«простолудинов», вздумавших подражать атомам-«аристократам» инертных элементов. В благородный наряд они все-таки оделись, — но «на пару». А иногда приходится делить такой наряд на троих, четверых и даже больше партнеров.

Издали смотреть—такая проделка, может быть, еще сойдет. Целая молекула способна подчас проходить через толпу атомов столь же невозмутимо, как атом инертного элемента. Но вблизи обман ясно виден.

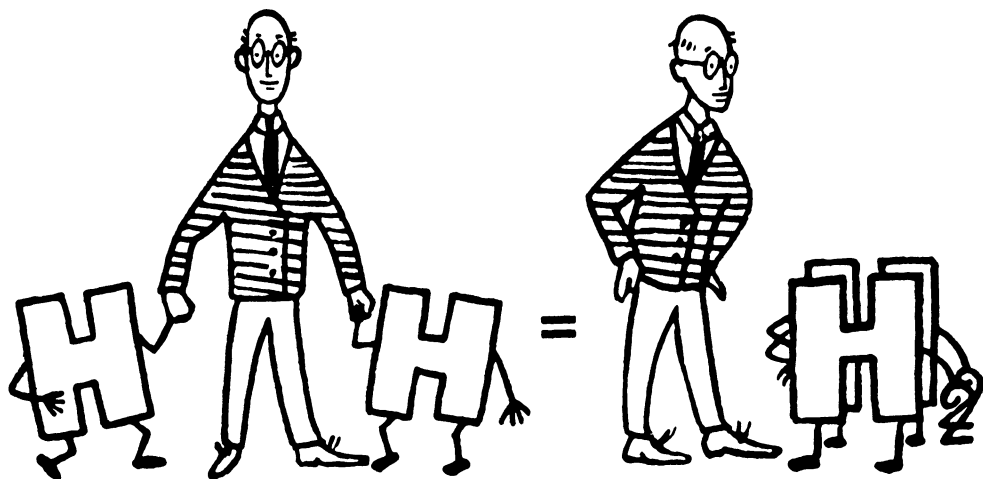
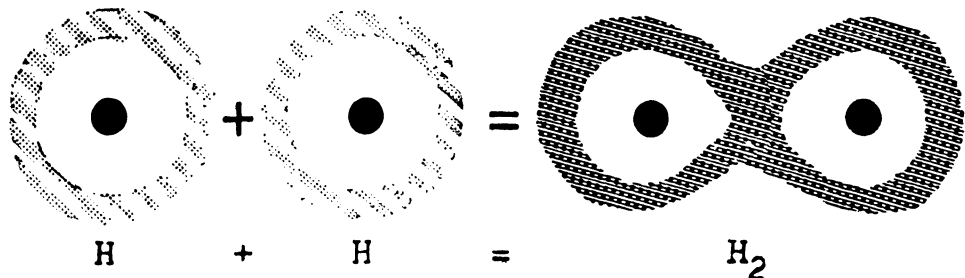
Вместо атомов в молекуле ютятся как чрезмерно одетые, так и раздетые «существа», которые называются отрицательными и положительными ионами. Процесс перераспределения электронных одежд не прошел для них даром. Атом, захвативший электронную одежду партнера, вцепился в нее и не хочет выпускать из рук. А раздетый его партнер, в свою очередь, не собирается с ней безвозвратно расстаться. Так и существуют они в «сцепившемся» положении, которое научно называется ионной молекулой.

Силы сцепления в таких молекулах — это в основном силы обычного электрического притяжения между разноименно заряженными ионами. Квантовой механике пока что тут почти нечего делать.

Ионных молекул существует великое разнообразие. В них «бракосочетаются» атомы, один из которых обязательно принадлежит левой половине таблицы Менделеева, а другой — правой. Чем дальше в таблице они находятся друг от друга, тем прочнее получается их «семья». И наоборот, для близких по группам в таблице атомов их вступление в «брак» происходит не так «жадно», да и «семья» получается не столь прочной.

Но существует не меньшее множество молекул, атомы в которых «вступают в брак» по совершенно другим соображениям. Простейшей «семьей» подобного рода является молекула водорода. К этому классу молекул относятся все «одноэлементные» молекулы (например, молекулы кислорода, азота, хлора), а также молекулы, атомы которых все принадлежат либо левой, либо правой половине менделеевской таблицы. Такие молекулы были названы ковалентными.

Для объяснения их существования и пришлось ввести квантовую механику. В самом деле, представьте себе, что один атом водорода приблизился



к другому. Пока ни тот, ни другой не построили своей «семьи» и, как водится у холостяков, завидуют семейным. Первый атом говорит другому:

— Отдай мне свой гардероб, и мы объединимся в молекулу.

— У меня не меньше прав предложить тебе то же? — гордо отвечает второй.

— Тогда, может быть, поменяемся одеждой?

— А что проку? Ведь от этого ничего не изменится: одежды наши совершенно одинаковы.

При этом «разговоре», разумеется, присутствует «атомный архитектор». Только теперь он собирается строить уже не атомы, а молекулы. И он дает совет обоим гордцам:

— Все-таки объедините ваши гардеробы. Ведь вам все равно не сделать из них «аристократического» восьмиелектронного наряда — материала не хватит. Пусть один электрон поживет немного в одном атоме, а потом в атоме партнера, и другой поступит так же.

— А что от этого изменится? Мы уже друг другу предлагали поменяться электронами, — отвечают гордецы.

— Вы ошибаетесь. Вы не учли, что будут такие моменты, когда в одном атоме окажутся два электрона, а в другом — ни одного. И тогда вы будете выглядеть вроде двух разноименно заряженных ионов. Отличие от ионной молекулы будет в том, что в ней один атом отдает, а другой забирает электроны, так что атомы в ней ионизированы практически постоянно. У вас же будет происходить лишь обмен электронами. То один из вас укутается электронами, а другой оголится, то наоборот.

— А как часто мы должны обмениваться? — уже сдаваясь, спрашивают атомы.

— Очень часто, — отвечает им архитектор. — Если бы я говорил на «полуклассическом языке» теории Бора, то примерно после каждого оборота по орбите электрон из одного атома должен переходить в другой, так что его орбита в молекуле напоминала бы восьмерку.

— Ну что, попробуем? — переглянулись атомы.

Попробовали и... образовали на дивс прочную семью. Догадаться об этой хитрой проделке природы и тем более рассчитать, что из нее получится, смогла только квантовая механика. Взаимодействие одинаковых атомов, приводящее к образованию молекул, она законно назвала обменным. Классическая физика до подобного взаимодействия не могла бы и додуматься.

Как происходит такой электронный обмен по представлениям квантовой механики? Пока атомы находятся далеко друг от друга, облака их электронов практически не перекрываются друг с другом. Но стоит этим атомам достаточно сблизиться, как благодаря значительному взаимному проникновению электронных облаков возникает заметная вероятность пребывания электрона каждого из атомов у ядра атома-партнера, то есть вероятность обмена.

Сколь же велика она? В молекуле водорода — около 15 процентов. Иными словами, десять минут за каждый час в одном атоме водорода собираются оба электрона, а в другом не остается ни одного.

Достаточно ли этого, чтобы обеспечить прочную связь атомов в молекулу? Расчет, выполненный английскими учеными Гайтлером и Лондоном с помощью квантовой механики, ответил — вполне! И действительно, теория в этом вопросе отлично совпадает с опытом.

Объединение электронных одежд «бедных» или, наоборот, слишком богатых ими атомов путем обмена оказывается очень распространенным в мире молекул.

Например, в атоме азота («типовой проект» № 7) всего семь электронов. Два из них, на внутренней оболочке, в обмене участия не принимают. Зато объединяются по пять электронов на внешних оболочках «бракосочетавшихся» атомов.

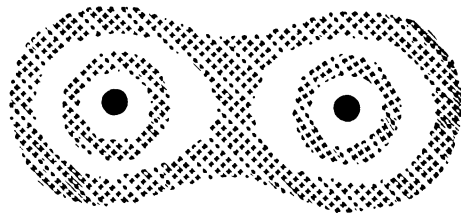
В следующем за азотом атоме кислорода в обмене участвует уже по шесть электронов от каждого атома, образуя молекулу обычного, двухатомного кислорода. А в трехатомном кислороде — озоне — объединение включает уже 18 электронов. И, чтобы этот обмен облегчить, третий атом пристраивается к первым двум не в «линеечку», а углом, так что путь, по которому путешествуют электроны, сокращается. И перебрасываются эти атомы электронами, как ставшие в круг игроки — волейбольным мячом.

Такая молекулярная постройка уже не напоминает по архитектуре составляющие ее атомы. Меняется и расселение жильцов, и сам вид квартир. Поэтому свойства молекул весьма существенно отличаются от свойств образующих их атомов.

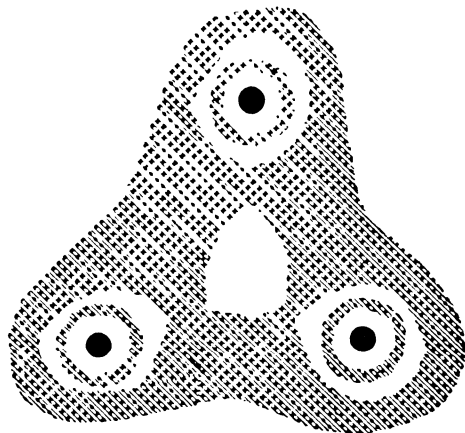
Твердые тела — „крепкие орешки“!

Следующий поворот пути нашего рассказа — и новый ландшафт. Нам он наиболее привычен: ведь почти все, что нас окружает на земле, — это твердые тела. Но, столь привычные по внешнему виду, они таят в себе бездну загадок. Не все эти загадки решены и по сей день.

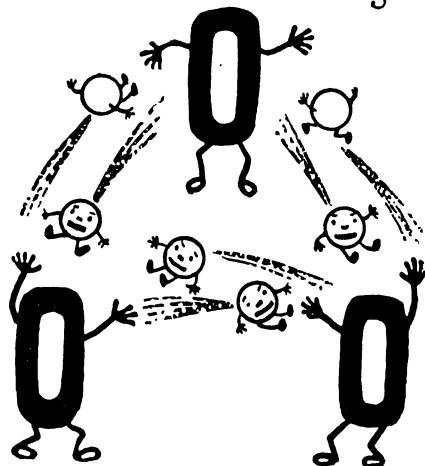
К началу двадцатого века физика накопила уже внушительный материал по свойствам твердых тел. Она знает, что твердые тела бывают кристаллические и аморфные, что они по-разному проводят тепло и электричество, в разной степени пропускают свет и звук. Но объяснить уреди-



O_2



O_3



тельно хотя бы одно из этих свойств твердых тел физика не в состоянии.

А это исключительно нужно. Бурно растущая техника включает в свое потребление все новые природные материалы. Они уже зачастую не могут угнаться за требованиями техники, и та нетерпеливо ждет искусственных материалов, обладающих особо высокими свойствами — большими твердостью, электропроводностью, жаропрочностью и многими другими.

Как их получить? Сидеть и «колдовать» над бесчисленными сочетаниями известных материалов и условий их обработки, пока не «наколдуется» нужное? Нет — это способ алхимиков. Современная наука должна идти другим путем.

И снова в дело вступает квантовая механика. И снова в считанные годы она добивается решительных успехов. Она начинает с попыток понять строение кристаллов, в первую очередь металлических кристаллов.

Действительно, с кристаллов начинать проще. Кристалл — это упорядоченное, периодическое расположение атомов в пространстве, напоминающее решетчатую конструкцию. Только в отличие от обычной решетки кристалл имеет не два, а три измерения. Атомы в решетке кристалла находятся на постоянных расстояниях друг от друга, именуемых периодами решетки. В общем случае периодов может быть три — по трем измерениям решетки: длине, ширине и высоте.

В природе чаще распространены не чистые элементы, а их соединения. Решетки таких кристаллов образуются атомами нескольких типов. Простой тому пример — кристаллы льда. В них два сорта атомов — водорода и кислорода, причем, согласно формуле воды, число водородных атомов вдвое больше числа кислородных.

Или другой пример — решетка кристаллов каменной соли, NaCl . В местах пересечения звеньев решетки, называемых ее узлами, поочередно располагаются ионы натрия и хлора. Именно ионы, а не атомы. Очень важно, что при «вмерзании» молекул соли в твердое тело сохраняется ионный характер связи их атомов.

Но молекула как таковая при этом перестает существовать. Ее теперь невозможно выделить. В самом деле, каждый ион натрия окружен ионами хлора, а каждый ион хлора окружен ионами натрия. Попробуй, найди, где тут бывшая молекула!

Между ионами в таком кристалле действуют обычные электрические силы. Ион натрия притягивает к себе ионы хлора из своего непосредственного окружения, те в свою очередь притягивают новые ионы натрия, но отталкиваются от соседних ионов хлора. В результате игры этих сил притяжения и отталкивания образуется некоторое равновесное расположение ионов. Это и есть кристаллическая решетка.

Такое расположение действительно равновесное, устойчивое. Стоит одному иону сместиться из своего положения, как ослабнет сила его притяжения к ионам другого сорта, но зато его сильнее будут отталкивать ионы

своего сорта. Совокупное действие этих сил заставит ион вернуться в прежнее положение.

| Собственно говоря, ион все время колеблется около своего устойчивого положения от случайных тепловых «толчков», наподобие шарика, закрепленного сразу на нескольких пружинках. Тепловые колебания ионов в решетке определяют многие важные свойства твердых тел.

И как в случае ионных молекул, здесь, в случае ионных кристаллов, квантовой механике пока что особой работы нет. Но вот физика обращается к наиболее важным для современной техники металлическим кристаллам.

Здесь положение совершенно иное. Допустим, что вся решетка построена из одного металла, то есть из атомов одного-единственного сорта. Легко понять, что никаких разноименно заряженных ионов теперь быть не может. Если электрон охотно отдает один атом, то почему бы так же не поступить и всем остальным?

А может быть, так оно и есть? В памяти квантовой механики еще свежа победа над молекулой водорода. Что если металлический кристалл — действительно гигантская ковалентная «молекула», состоящая из многих триллионов атомов?

Эта остроумная мысль оказывается правильной. «Неизобретательная» природа в самом деле не придумала ничего нового. Удался «фокус» с обменом электронами между двумя атомами — и природа переносит опыт на более многочисленную электронную «аудиторию».

И все-таки на самом деле это не так легко и просто. Твердые тела еще не раз покажут, что они могут быть крепкими орешками даже для острых зубов квантовой механики.

Каркасы и этажи кристаллов

Атомы металлов, объединяясь в кристалл, действительно, обобщают свои электроны. В результате возникает своеобразная «каркасная» архитектура таких кристаллов. В узлах решетки сидят малоповоротливые ионы, окруженные легким и подвижным общим электронным облаком. Это облако играет роль цемента, скрепляя воедино враждующие одноименно заряженные ионы. А ионы в свою очередь — цемент для стремящихся разлететься во все стороны электронов.

Электроны в металле, как мы уже говорили, «почти» свободны. В самом деле, когда каждый атом отдает свой пай в общий котел, то электрон перестает принадлежать исключительно ему и становится слугой триллионов господ. Он получает возможность свободно разгуливать по всему кристаллу — этакий микроскопический Фигаро!

Надо сказать, что такой свободы удостаиваются далеко не все электроны. Каждый из атомов отдает в общее владение лишь один-два самых внешних своих электрона, а остальные «сидят взаперти» при своем «хозяине». Но даже

и при этом армия почти свободных электронов колоссальна: в кубическом сантиметре металла их насчитывается порядка 10^{22} — 10^{23} .

Металлический кристалл, если можно так выразиться, имеет более совершенную «общественную» организацию по сравнению с ионным кристаллом. Последний — это как бы рабовладельческое общество: все электроны влчат рабское существование в своих атомах. Металл же скорее феодальное общество: каждый хозяин отпускает часть своих рабов на оброк.

Такое усовершенствование не замедлило сказаться на свойствах кристалла. Металл получил возможность проводить электрический ток.

Если приложить обычное электрическое поле к ионному кристаллу, то оно лишь немного перераспределит, как бы вытянет электронные облака в его атомах. Следствием этого явится так называемая электрическая поляризация кристалла. Но ни один электрон из ионов не освободится, а сами ионы по-прежнему останутся «сидеть» в своих узлах. И раз нет свободных переносчиков заряда, значит, нет и электрического тока. Ионные кристаллы являются изоляторами.

В металлах же почти свободных переносчиков заряда — электронов — хоть отбавляй. Поэтому они хорошо проводят электрический ток.

А где же место полупроводников? Его мы определим немного спустя.

Сейчас же рассмотрим одно важное обстоятельство, установленное квантовой механикой для металлов. Какими энергиями обладают «обобществленные» электроны в металле? Ответ кажется простым. Электроны освободились из атомов и тем самым как будто могут иметь любые энергии. Мы помним, что для свободных электронов квантовый характер их уровней энергии исчезает.

Но подождем делать такое заключение. Электроны действительно ушли из атомов, но еще не покинули куска металла. Атомным законам они теперь не подчиняются, но в металле есть и общие законы, которые управляют поведением уже не одного электрона, а целой электронной армии.

Каковы же эти законы? Атомные законы, как вы помните, были найдены из решения уравнения Шредингера. Пытаясь узнать законы жизни электронов в металлических кристаллах, физики поступили аналогичным образом. Они решили уравнение Шредингера для движения электронов в периодическом электрическом поле положительных ионов, регулярно располагающихся в узлах кристаллической решетки металла.

Здесь уместно сделать небольшое отступление. До сих пор, говоря о том, как влияет один атом на другой, находящийся рядом, мы отмечали как бы лишь внешнюю сторону этого влияния. Атомы либо отталкивались друг от друга, либо притягивались и образовывали молекулы.

Но что происходит при этом внутри самих атомов? Оказывается, в них электронные облака меняют свою конфигурацию. Это удалось выяснить благодаря явлению, открытому немецким физиком Шгарком еще до возникновения квантовой механики в ее современном виде. Накладывая на веще-

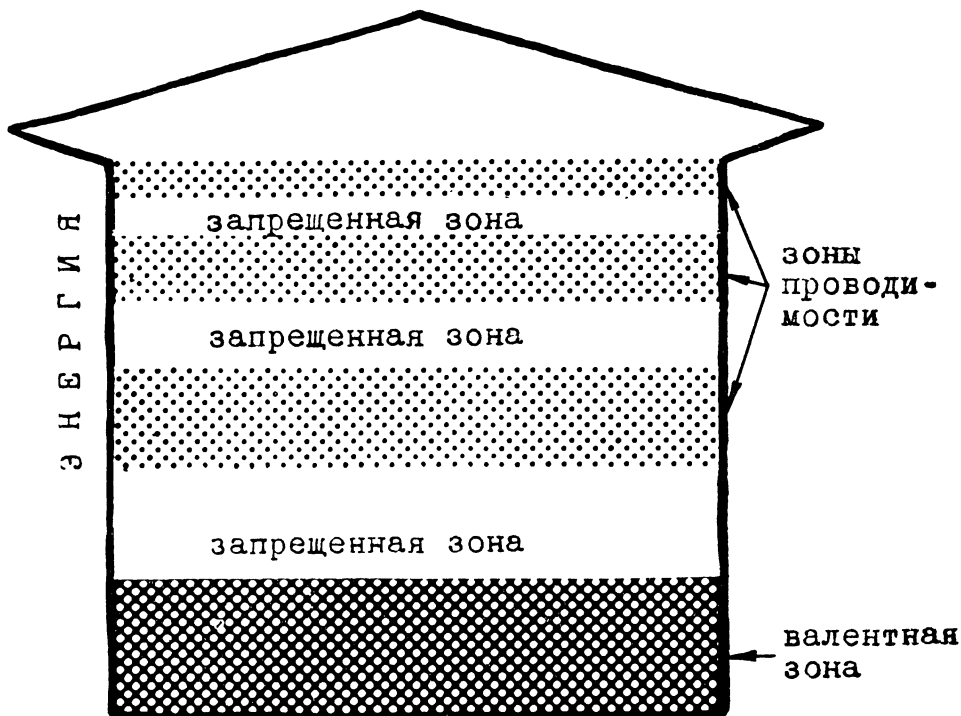
ство сильное электрическое поле, Штарк обнаружил расщепление излучаемых веществом спектральных линий.

Это чем-то похоже на явление, описанное нами выше в рассказе о линиях-двойниках... Но нет—оба эти явления совсем не сходны. Но вот что несомненно общее — и это смогла доказать квантовая механика: расщепление спектральных линий отвечает расщеплению уровней энергии атомных электронов.

Итак, электрическое поле, извне наложенное на атом, дробит энергетические уровни его электронов. Действие электрического поля атома, приближившегося на достаточно малое расстояние к другому атому (при этом поле оказывается весьма внушительным), ничем в сущности не отличается от описанного.

И действительно, при образовании молекулы уровни энергии, отвечавшие отдельным входящим в нее атомам, исчезают. Дробясь, смешиваясь, сдвигаясь вверх и вниз по шкале энергий, они в результате создают молекулярные уровни энергии. Эти уже отвечают всей молекуле в целом.

Но то, что имеет место для молекулы, еще более четко выражено для



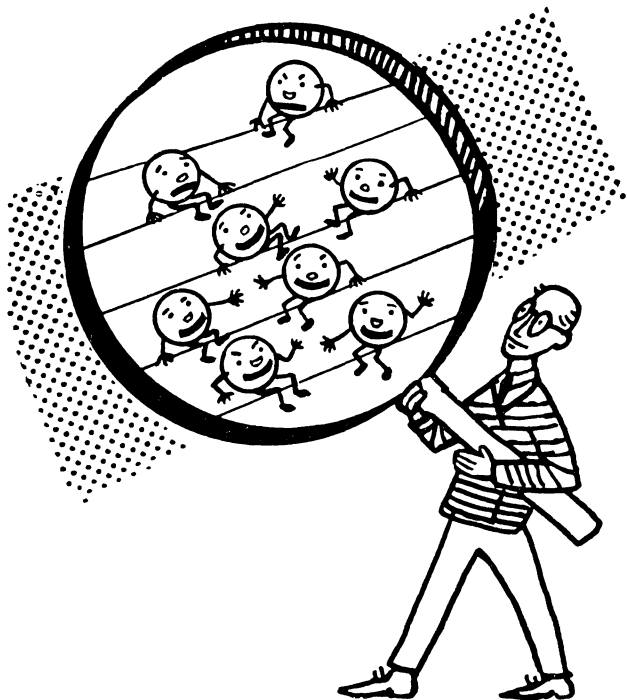
кристалла, где в непосредственной близости друг от друга, повторяя эту близость на всем протяжении кристалла, оказываются уже огромные количества атомов. Кристалл — это словно гигантская «застывшая» молекула.

Объединенное электрическое поле всех атомов этой «молекулы» расщепляет уровни энергии каждого из них на колоссальное число очень тесно расположенных подуровней. Дискретность, изолированность друг от друга дозволенных уровней энергии электрона практически совершенно исчезают. Электрон в кристалле как будто получает возможность иметь любую энергию.

И тут выяснилось замечательное обстоятельство. Взгляните на рисунок. Сделанное выше заключение о возможности любой энергии электрона в металле как будто выполняется, но с одним существеннейшим исключением. Видите белые полосы между заштрихованными? Так вот, энергий, заключенных в этих полосах, электроны в металле иметь не могут. Этим энергиям отвечает равная нулю волновая функция и соответственно равная нулю вероятность

пребывания электрона в таком состоянии. Белые полосы энергии получили название запрещенных зон.

Да и в самих заштрихованных полосах энергии, называемых разрешенными зонами, электрон имеет не любую энергию. Если можно было бы воспроизвести на бумаге и разглядеть истинную картину, то оказалось бы, что и в этих полосах существуют отдельные уровни энергии. Но в каждой полосе их так много (вспомним, что в каждом «кубике» металла содержатся практически неисчислимые полчища электронов), что они сливаются в практически непрерывную последовательность.



А как электроны «сидят» на этих уровнях? Оказывается, не как угодно, не как воробьи на проводах. Это не позволяет принцип Паули — упоминавшийся выше строгий инспектор атомной архитектуры. За расселением электронов в металле он следит так же придирчиво, как и в атоме.

На каждом уровне энергии в разрешенной зоне металла могут находиться только два электрона, заявляет принцип Паули. Места всем хватит, уровней достаточно, даже более чем достаточно. В металле всегда имеется излишек «жилой площади». В нормальных условиях все электроны металла могут поселиться в одной, самой нижней разрешенной зоне, на первом «этаже».

Что находится под ним? А под ним — «подвал», в котором живут необобществленные электроны, принадлежащие отдельным атомам, но не всем атомам металла в целом. Изоляция подвала и первого этажа не абсолютная: между ними имеется лестница. Состоит она только из одной ступеньки, равной по высоте первой запрещенной зоне. Электрон из подвала может взлететь на первый этаж, только если его хорошенько «шлепнуть»: застряв в запрещенной зоне из-за недостатка энергии он не имеет права.

Физики назвали энергетический подвал валентной зоной, а все разрешенные полосы энергии объединили под общим наименованием зоны проводимости. Происхождение этих названий нетрудно понять: в подвале живут внешние, определяющие валентность, но еще не свободные электроны, а на первом и более высоких этажах — электроны, участвующие в проводимости электрического тока.

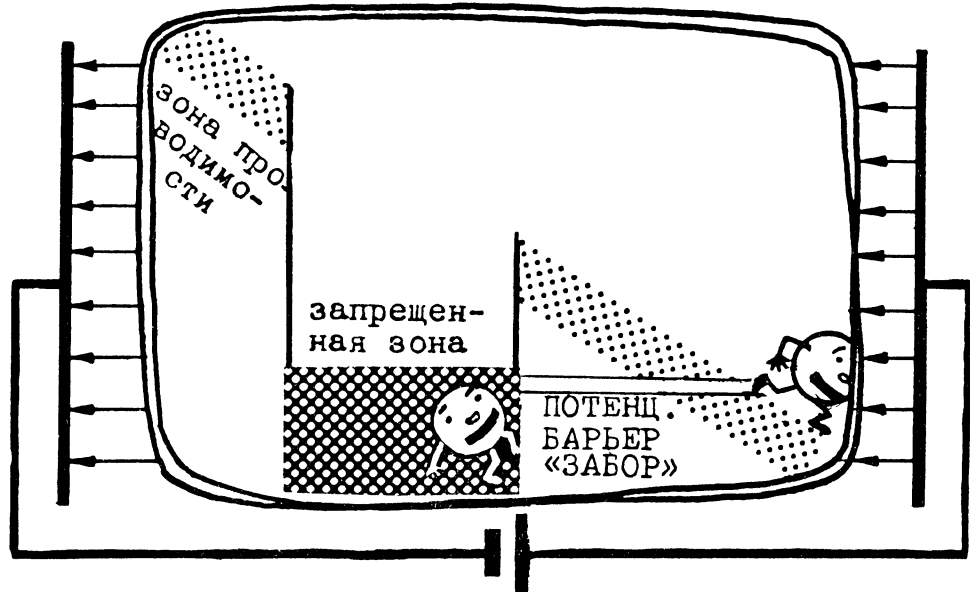
Изоляторы тоже проводят ток!

У изоляторов, понятно, все без исключения электроны заперты в подвал. При обычных условиях зона проводимости их пуста: слишком широка первая запрещенная зона, нет у электронов такой энергии, чтобы они могли перескочить через нее. Но когда изолятор сильно нагрет, энергия колебаний его ионов в узлах решетки становится большой. Она может передаваться электронам, и те получают достаточно энергичные «шлепки», чтобы иметь возможность перескочить в зону проводимости. Изолятор начинает проводить ток. Это явление так и называется — тепловой пробой.

В сущности для его объяснения даже не надо было привлекать квантовую механику. Ведь то, что электрон попадает в зону проводимости, означает лишь, что он вырвался из того узкого атомного мирка, в котором он дотоле пребывал, и стал почти свободным. А энергия, которая необходима для его освобождения, просто равна ширине запрещенной зоны, разделяющей подвал и первый этаж.

Все это можно представлять так, как будто тепловой «толчок» выбросил электрон из атома, ионизировал атом. А оторвавшийся от атома электрон,

ИЗОЛЯТОР



еще не имея возможности покинуть кусок изолятора, все же движется в нем совершенно свободно.

Но оказывается, что изолятор становится проводником электрического тока и в том случае, если к нему приложить очень сильное электрическое поле. Постойте, это что-то очень знакомое... ну, конечно, холодная эмиссия электронов из металлов, о которой мы рассказывали в предыдущей главе. Но там металл, а тут ионный кристалл. Там электроны вылетают «наружу», а здесь только из валентной зоны в зону проводимости.

И все же, несмотря на эти различия, явление в обоих случаях действительно одно и то же. И там и здесь работает «чудо» — туннельный эффект:

В самом деле, что такое запрещенная зона, как не потенциальный барьер практически бесконечной (для электрона, разумеется) длины? Это та самая ступенька, которая имеет одну «переднюю» сторону. Электрическое поле, как и раньше, перекашивает ее, создает у нее и «заднюю» сторону. А в результате барьер приобретает конечную длину.

Дальше все повторяется по-старому. Электроны начинают просачиваться из валентной зоны через этот барьер в зону проводимости. Появляется сначала небольшой электрический ток: вероятность просачивания невелика, в зону проводимости выходит мало электронов. Но этот ток, проходя по кристаллу, разогревает его, наподобие спирали электроплитки. Этот нагрев в свою очередь добавляет новые отряды электронов в зону проводимости. Ток в изоляторе как бы сам себя разгоняет!

И через ничтожное мгновение наступает электрический пробой изолятора. Он сопровождается одновременно и тепловым пробоем: изолятор оплавляется. После этого изолятор можно спокойно выбросить на свалку: он уже больше не годен.

Но есть и более «мирный» способ создания электрических токов в изоляторах. Токи эти очень слабенькие и не могут принести им вреда. Это — освещение ионных кристаллов. Фотоны, попадая в кристалл, выбивают в нем электроны из валентной зоны в зону проводимости. Настоящий фотоэффект, но теперь только не «наружный», а «внутренний». Это уже не вредное, а очень полезное для многих практических применений явление.

Как ток идет по металлу?

«Даже стыдно задавать такие вопросы в наш просвещенный век! — может заявить читатель с упреком. — Электроны входят из источника тока в один конец провода, электрическое поле гонит их по металлу, и они выходят с другого конца провода. Как вода, качаемая насосом, течет по трубе!»

Но нам не стыдно. Пусть просвещенный критик попробует в таком случае объяснить, почему возникает электрическое сопротивление. Проводник — не труба, стенки у него не шероховатые. Почему металл, в котором полным-полно переносчиков тока, все-таки сопротивляется току?

Это — один из тех «наивных» вопросов, ответ на которые оказывается совсем не наивным. Люди знают об электрическом токе полтора года, а ответ на заданный выше вопрос пришел лишь около тридцати лет назад.

Классическая физика пытается объяснить электрическое сопротивление так. Направленное движение электронов — это и называется током — все время нарушается тепловыми колебаниями ионов в «каркасе» металла. Эти колебания сбивают электроны с пути. В результате движение электронов начинает походить на передвижение людей в доме, в котором качаются стены и трясутся полы.

Понятно, чем меньше колебания стен и полов, тем легче идти по дому. При абсолютном нуле температуры, когда тепловые колебания ионов полностью прекращаются, электрическое сопротивление должно упасть до нуля.

Что ж, это похоже на правду, по крайней мере для очень чистых, практически без всяких примесей, металлов. Вся загвоздка оказывается именно в примесях. Сопротивление «загрязненных» металлов при понижении температуры стремится не к нулю, а к некоторой отличной от него величине, которая зависит от содержания и рода примесей в металле. Чем больше примесей, тем выше это остаточное сопротивление.

Что по этому поводу говорит классическая физика? Да ничего. Для нее все равно, что атом металла, что атом примеси: при одинаковой температуре они колеблются одинаково энергично, мешают путешествию по дому с равной активностью.

А вот квантовая механика оказалась более «наблюдательной»: для нее «свой» и «чужой» атомы в решетке различаются так же резко, как если бы их выкрасить в разные цвета. В чем же состоит ее объяснение электрического сопротивления?

Для этого нам придется вспомнить тот замечательный опыт, с которого мы начали рассказ о квантовой механике, — опыт по дифракции электронов на кристалле. Там электроны налетали на наружные слои атомов кристалла, частично отражались ими и образовывали на фотопластинке дифракционные кольца.

Разве электронный ток в металле нельзя считать пучком электронов? Конечно, можно. Здесь электроны также стройными рядами движутся в одном общем направлении, только что пучок шире, занимает все сечение куска металла. Но тогда неизбежно следует, что прохождение электронов по металлу должно сопровождаться как бы «внутренней дифракцией» электронов на ионах решетки. Если бы внутри куска металла удалось поместить фотопластинку, то на ней тоже могла бы образоваться дифракционная картина!

Дифракция обладает одним интересным свойством. Стоит нарушить регулярность в расположении предметов, рассеивающих волны, как четкая картина исчезает, фотопластинка оказывается почти равномерно засвеченной. Рассеяние волн, как говорят физики, становится однородным.

Именно такой беспорядок в регулярную структуру металлического кристалла вносят колебания его ионов и присутствие посторонних атомов примесей. И в результате волны электронов, участвующих в токе, рассеиваются во все стороны.

Атом примеси, как правило, имеет совершенно другие размеры, другую электронную оболочку, чем атом металла. Внедряясь в его решетку, атомы примеси искажают ее. Продолжая нашу аналогию, можно атом примеси по своему действию сравнить с перекошенным коридором, неожиданным провалом в полу. Ясно, что эти дефекты дома сохранились и тогда, когда стены и пол перестанут качаться. Действительно, искажения, вносимые в решетку металла атомами примеси, не зависят от температуры и сохраняются даже при абсолютном ее нуле. Рассеяние электронных волн на этих искажениях решетки и есть причина необъяснимого с точки зрения классической физики остаточного электрического сопротивления металлов.

Так оказывается, что металлы, хотя и хорошо проводят ток, все же далеки от идеала. Впрочем, не все и не всегда. Природа, словно недовольная своим созданием, решила продемонстрировать, что она способна и на большее. Она создала сверхпроводники.

Ряд металлов и сплавов (их можно пока еще перечислить по пальцам) при очень низких температурах начинает вести себя очень странно. При температурах еще на добрый десяток градусов выше абсолютного нуля эти вещества внезапно, скачком, уменьшают свое электрическое сопротивление до нуля. Это явление, обнаруженное полвека назад, и получило название сверхпроводимости.

Классическая физика так и не смогла объяснить это явление. Интересно заметить, что даже «могущественной» квантовой механике пришлось потрудиться добрых три десятка лет, пока она в этом добилась успеха. Очень уж «хитрым» оказалось явление!

Решение загадки сверхпроводимости пришло в самые последние годы. Очень существенный вклад в эту разгадку внесли работы советского физика Н. Н. Боголюбова и его учеников. Подробно рассказать об этом на страницах нашей книги невозможно. Ограничимся лишь краткой аналогией, которая, однако, хотя и наглядна, но довольно груба.

Фокус сверхпроводимости заключается в том, что при сверхнизких температурах, близких к абсолютному нулю, в ряде металлов в силу особенностей их строения взаимодействие электронного облака с ионным «каркасом» радикально меняется. Если до этого каждый «солдат» «электронной армии» воевал сам по себе, то при температуре возникновения сверхпроводимости электроны сплываются в пары.

Это незамедлительно сказывается на характере «войны», которую ведут в металле электроны и ионы. Если раньше каждый электрон участвовал в стычках с ионами поодиночке и мог легко выбывать из строя, то теперь электронные пары движутся, не отзываясь на наскоки отдельных ионов,

встречающихся им на пути. Электроны как бы перестают замечать свое ионное агрессивное окружение.

Разумеется, при этом трудности пути «электронной армии» значительно уменьшаются. В результате резко падает электрическое сопротивление металла.

Новый способ «войны», говоря на языке физики, заключается в том, что теперь длины волн, отвечающие движению электронов в металле, имеют порядок величины, в тысячи и десятки тысяч раз превышающей расстояния между ионами. Если вы внимательно прочитали эту главку, то сможете сразу разгадать секрет новой «тактики»: длина волны электронной пары оказывается настолько больше размеров ионных препятствий на ее пути, что пропадает дифракция отдельных электронов, сопутствующая прохождению тока через металл при обычных условиях. А с нею исчезает и сопротивление току.

Но такой идеальный строй «электронная армия» имеет лишь до тех пор, пока наскоки ионов недостаточно энергичны. При переходе температуры через определенный предел стычки с ионами мгновенно разваливают пары на отдельных солдат. Теперь солдаты сражаются с неприятелем снова поодиночке и электрическое сопротивление металла восстанавливается.

Ну что, стоило заводить разговор о том, как идет ток по металлу?

Чудесная „половинчатость“

Вы, видимо, догадываетесь, о какой половинчатости пойдет речь дальше. В природе, в сущности, огромное большинство веществ принадлежит не к проводникам электрического тока или изоляторам, а к полупроводникам.

Половинчатые, промежуточные их свойства оказались настолько ценными, что полупроводники, призванные к жизни в последние десятилетия, произвели подлинную революцию в технике. Что это за свойства, вам, возможно, тоже известно: в отличие от изоляторов, полупроводники проводят ток уже при комнатной температуре, а в отличие от проводников их электрическое сопротивление с ростом температуры не увеличивается, а напротив, падает.

Природа не проложила непроходимой пропасти между изоляторами, полупроводниками и проводниками. Собственно говоря, эта пропасть нам уже известна. Ею является первая запрещенная зона между заполненной электронами валентной зоной и зоной проводимости, в которой имеется много незанятых электронных состояний.

В изоляторах, чтобы преодолеть ступеньку, отделяющую тесный подвал от просторного первого этажа, электронам нужна большая энергия: уж очень высока эта ступенька. Такую энергию они могут получить лишь при высоких температурах (вспомним—тепловой пробой).

В полупроводниках же эта ступенька много ниже. Отвечающую ей энергию электроны, обитающие в подвале, могут приобретать уже при температурах порядка комнатной. Поэтому первый этаж в полупроводниках начинает заселяться электронами раньше, и при обычной температуре эти вещества, хоть и не очень хорошо, но все же проводят ток.

Иными словами, при приложении уже небольшого электрического поля к полупроводнику в нем возникает направленное движение электронов в зоне проводимости. Полюбопытствуем, что при этом происходит в подвале.

Там, оказывается, творятся тоже занимательные вещи. Дело в том, что электрон, переселившийся на первый этаж, оставляет после себя свободную квартиру. В тесном подвале мгновенно начинается ее дележ. Но занять квартиру может только один электрон. Какой-нибудь находившийся поблизости электрон так и делает. Но зато он освобождает свою прежнюю квартиру. В ту в свою очередь переселяется новый электрон.

Перескакивая из квартиры в квартиру, подвальные электроны словно пытаются подражать электрону, свободно несущемуся по первому этажу. Это выглядит так, как если бы кенгуру вздумал подражать бегуну. Бегун делает частые сравнительно мелкие прыжки — с большого расстояния их даже не увидеть, и кажется, что он наращивает скорость совершенно плавно. Кенгуру же передвигается редкими длинными прыжками.

Если считать, что первая электронная квартира освободилась в центре города, то переселение электронов приводит к тому, что квартира в конце концов «ускачет» на окраину города.

Такую путешествующую электронную квартиру физики не совсем уважительно назвали дыркой. Понятно, что она ведет себя противоположно электрону, который покинул ее. Скажем, электрон в электрическом поле движется слева направо. А оставленная им дырка перемещается наоборот, справа налево, то есть ведет себя в поле, словно положительно заряженная частица. И, кроме того, в отличие от электрона, она движется сравнительно редкими и крупными скачками.

При низких температурах, однако, все электроны еще заперты в подвале. С ростом температуры все большее их число освобождается, ток растет, а сопротивление полупроводника падает. По сравнению с металлом — все наоборот.

До сих пор речь шла о чистых полупроводниках. Описанный механизм тока в них был назван истинной или собственной проводимостью. Но чистые полупроводники представили для техники, в общем, мало интереса. Все чудеса, на которые способны полупроводники, возникают лишь при добавлении к ним примесей.

Полезная „грязь“

Грязь — это не только некрасиво, но и вредно для здоровья.

А с другой стороны, сколько людей лечится грязью, только иного состава! Уже этот простой пример показывает, что грязь «случайная» почти всегда вредна, а грязь «определенная» и притом в строго определенных дозах — полезна.

Полупроводники «пачкаются» тоже легко — они ведь существуют на свете не одни. На кристаллах полупроводниковых веществ оседают, потом проникают в них самые разнообразные атомы «грязи» — примесей. И эти примеси, если они случайны, — а они как правило случайны, — вредны для технических применений полупроводников. Природа ведь не имела заранее в виду, что полупроводники понадобятся людям!

Но зато некоторые примеси, в строго дозированных количествах, очень полезны. Именно с них начинаются чудеса, на которые способны полупроводники.

Что полезно одному, то вредно другому. Если желательно иметь металл с высокой электропроводностью, то ему вредны любые примеси.

Мы уже знаем причину этого. Атомы примеси, внедрившись в кристаллическую решетку металла, искажают ее. Эти искажения сильно рассеивают волны электронов, переносящих ток. В результате электропроводность металла уменьшается, а сопротивление растет.

Но эти самые искажения решетки — ключ успеха полупроводников. Дело в том, что строение энергетических зон кристалла исключительно чувствительно к виду кристаллической решетки. Другой кристалл — другая система зон энергии.

Внедрившиеся атомы примеси меняют, однако, вид не всей кристаллической решетки, а лишь отдельных ее участков, примыкающих к атомам примеси. Зонная картина, общая для всего кристалла, в этих участках существенно видоизменяется. А именно: в запрещенной полосе, отделяющей валентную зону от зоны проводимости, появляются дополнительные уровни энергии, разрешенные для электронов.

Эти уровни возникают, однако, только там, где есть атомы примеси. Чтобы отличить их от уровней, существующих во всем кристалле полупроводника, их назвали местными или локальными уровнями.

Таких уровней, как правило, в каждом месте небольшое число, но они очень важны. Ведь тогда очень широкая ступенька, отделяющая подвал от первого этажа, заменяется рядом ступенек. Теперь электрон не обязан перемахнуть через запрещенную зону в один прием. Он может идти по ступенькам, подолгу отдыхать на каждой из них, набираясь сил для следующего шага.

Понятно, что при обычных температурах, когда передаваемая электронам энергия невелика, такие пологие и удобные лесенки для них самым ре-

шительным образом влияют на переселение электронов из подвала. Но сколько таких лесенок? Очевидно, столько же, сколько атомов примеси в кристалле.

Значит, меняя число этих атомов, можно регулировать электропроводность полупроводников! В этом и состоит их замечательная особенность.

В металле количество примесей тоже влияет на электропроводность, но всегда в одном направлении: чем больше примесей, тем она ниже. При этом пределы ее изменения сравнительно невелики. В полупроводниках же электропроводность можно менять не только числом, но и родом атомов примеси, причем во многие тысячи и миллионы раз!

Атомы щедрые и атомы жадные

Наиболее распространены в настоящее время примесные полупроводники на базе химических элементов германия и кремния.

Что это за элементы? Взглянем на периодическую таблицу Д. И. Менделеева. Мы увидим, что кремний (№ 14) и германий (№ 32) находятся в IV группе. Эту группу мы некогда называли «ни рыба ни мясо». Так оно и есть. Германий и кремний — ни проводники, ни изоляторы: они являются типичными полупроводниками.

На самой внешней оболочке этих атомов — четыре электрона. При соединении атомов в кристалл все эти электроны идут на образование взаимных связей между атомами. Они ведут рабскую жизнь в подвале. Поэтому при низких температурах кремний и германий не проводят тока.

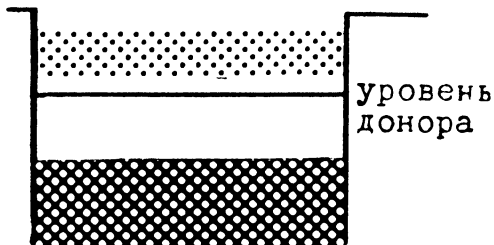
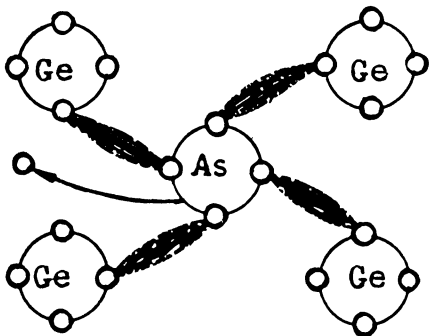
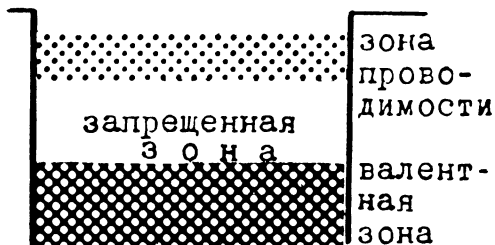
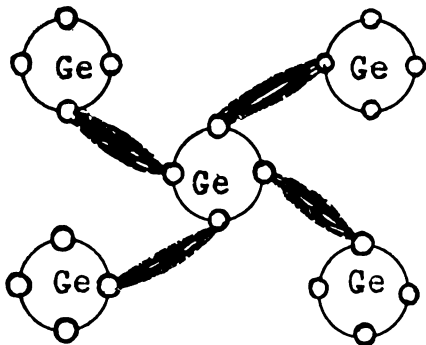
Но подмешаем, скажем, к германию какой-нибудь элемент из соседней V группы, например мышьяк (№ 33). Мышьяковые атомы кое-где потеснят атомы германия и займут их места в решетке. При этом каждый атом мышьяка должен взять на себя обязательства замещенного им атома германия.

У атома мышьяка на внешней оболочке пять электронов. Четыре из них он отдает на возмещение химических связей, которые имел бывший хозяин этого места в решетке — атом германия. А пятый электрон? Он остается не у дел.

Подсчет показывает, что энергия этого электрона отвечает как раз уровню в запрещенной зоне, но возле ее «потолка». Чтобы этот электрон перешел в зону проводимости, ему нужно сообщить совсем небольшую добавочную энергию. Она в 10—15 раз меньше высоты самой запрещенной зоны.

Атом мышьяка, щедро отдающий свой электрон кристаллу-хозяину, получил название донора. А соответствующие электронные уровни — название донорных уровней.

Но возьмем вместо мышьяка какой-нибудь элемент из группы слева от германия, скажем, бор (№ 5). Он находится в III группе, значит, на внешней оболочке его атомов только три электрона. Заняв в решетке место атома германия, атом бора может возместить только три из четырех хими-



ческих связей бывшего владельца.

Как быть? И атом бора пускается на «воровство». Он крадет электрон из соседнего с ним в решетке атома германия. Пример борного атома оказывается заразительным: за одной кражей следует целая их цепочка. Атом германия, «обворованный» атомом бора, сам хватается электрон у соседнего германиевого атома, тот — у следующего, и так далее. Возникшая свободная электронная квартира перемещается все дальше от атома германия, первым «ограбившего» своего соседа.

Мы уже знаем, как это выглядит: движется по кристаллу дырка. Только теперь виновником ее рождения является не тепловой выброс электрона из валентной зоны, а наличие атома бора.

При этом в запрещенной зоне возле самого ее «дна» образуются опять же местные уровни энергии. Только теперь их могут занимать не электроны, а дырки.

Атомы наподобие «вора»-бора получили название акцепторов. А отвечающие им дырочные уровни — название акцепторных уровней.

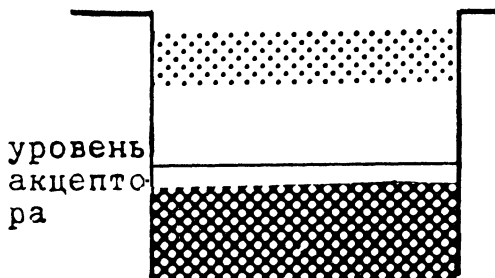
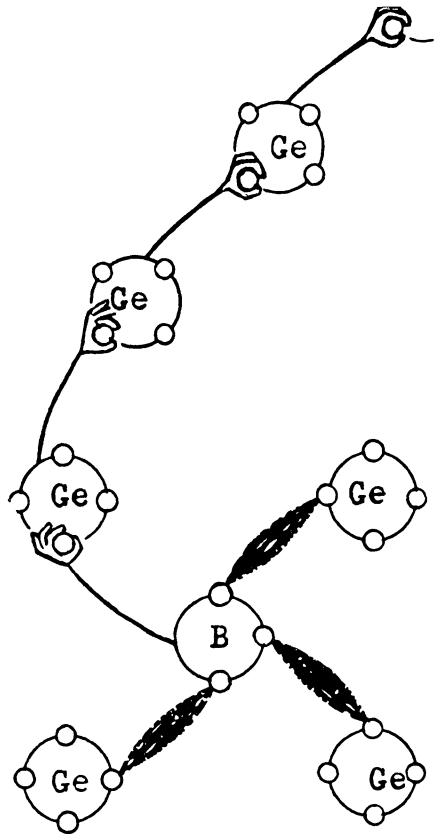
В соответствии с тем, какие атомы вселены в решетку германия или кремния, в этих элементах оказываются возможны два вида электрической

проводимости—электронами или дырками.

Еще раз попросим читателя четко представлять себе, что дырка — это лишь условное, но, правда, удобное обозначение электронного движения. Дырка — это, если угодно, изображение электрона, прыгающего в заполненной валентной зоне от атома к атому наподобие кенгуру. Тогда как электрон в зоне проводимости в своем движении более похож на плавно перемещающегося бегуна. Лучше сказать—на мелко семящего бегуна. Выше мы уже говорили, что электронные уровни в зоне проводимости тоже отделены друг от друга, но эти расстояния между уровнями настолько ничтожны, что уровни практически сливаются друг с другом.

Вернемся к нашему рассказу. Попробуем подмешать к германию атомы и бора, и мышьяка. Какого рода электропроводность появится у германия? Очевидно, это будет зависеть от соотношения числа атомов обеих примесей. Если мышьяка будет больше, чем бора, то проводимость окажется электронной, если наоборот — то дырочной.

А зачем все это нужно? Оказывается, что соотношение обоих видов проводимости делает возможными очень важные применения полупроводников. И все из-за различия в «легкости» тока, осуществляемого движением электронов и дырок.



Полупроводники с такими «двойными» примесями способны наглухо запереть токи в одном направлении, но зато прекрасно пропускать их в противоположном направлении. Иными словами, полупроводники могут работать как выпрямители.

Они способны маленькие напряжения, приложенные к ним, превращать в высокие — опять-таки благодаря возможности регулировать их сопротивление. А это значит, что полупроводники могут работать как усилители.

Маленькие, компактные, неприхотливые, экономичные, безотказно работающие — все эти достоинства полупроводников обеспечили им уже победу над большими неуклюжими электронными радиолампами.

Фотоны, попадая в полупроводник, выбивают в нем электроны из валентной зоны в зону проводимости. При освещении полупроводника возникает электрический ток. Значит, полупроводники могут преобразовывать световую энергию непосредственно в электрическую. И не только могут, но уже делают это, причем гораздо эффективнее, чем металлы.

В создании этих замечательных приборов выдающаяся роль принадлежит советским ученым во главе с А. Ф. Иоффе.

Кремниевые батареи в пустынях преобразуют губительные потоки солнечных лучей в электричество. Электричество вращает моторы в системах орошения, несущих воду выжженным уголкам Земли. Так люди заставили Солнце работать против самого себя! Полупроводниковые электрические батареи работают на космических ракетах и искусственных спутниках Земли.

Полупроводники превращают прямо в ток и тепловую энергию. Становится ненужной сложная и в сущности неуклюжая система паровых электростанций, где тепло сначала переводит воду в пар, а пар уже вращает турбину, с которой связан ротор динамомашин. Когда-нибудь эта система исчезнет с лица земли. А пока что полупроводники успешно работают в качестве термоэлектрогенераторов, превращая в электрический ток тепло керосиновых ламп, в качестве холодильников, в которых нет ни одной движущейся части.

Но это — лишь пока. Сейчас даже трудно предвидеть все то блестящее будущее, которое ожидает эти чудесные кристаллы.



глубинах атомного ядра

На пороге

Атом, молекула, кристалл... Что теперь на очереди?

Теперь квантовой механике предстоит тяжелый путь в глубь атомов, где притаились еще более ничтожные по своим размерам атомные ядра. Ей надлежит проникнуть в еще более удивительный мир.

В двадцатых годах никто из физиков не подозревает, к чему это приведет. Ими движет лишь простая, но такая неутолимая любознательность.

Атомное ядро обещает дать богатую пищу любознательности. В то время, когда квантовая механика празднует первые свои победы над миром атомов, о мире атомных ядер еще почти ничего неизвестно.

Кое-что наука о ядрах все же знает. С этого ей и предстоит начать.

В самом конце девятнадцатого века француз Беккерель совершенно случайно обнаруживает, что некоторые вещества способны засвечивать фотографические пластинки. Мари Склодовская и Пьер Кюри, идя по следам этого открытия, устанавливают, что таким свойством обладают три химических элемента, находящиеся на краю периодической таблицы Д. И. Менделеева, — радий, полоний и уран.

Обнаруженное явление получает название радиоактивности. Необъяснимость его с позиций классической физики повергает в смятение теоретиков того времени. А опыт подбрасывает новые факты о таинственном излучении. Оно оказывается состоящим из излучений трех родов, названных по первым трем буквам греческого алфавита — альфа, бета, гамма.

Альфа-лучи, как выясняется, состоят из положительно заряженных частиц. Заряд их по величине вдвое больше заряда электрона, а масса при-

мерно вчетверо больше массы атома водорода. Бета-лучи ничем не отличаются от электронов. А гамма-лучи — это какое-то очень жесткое, как говорят физики, электромагнитное излучение. Его проникающая способность во много раз больше, чем у такого рекордсмена проникновения сквозь вещества, как рентгеновы лучи.

Проходит еще несколько лет, и английский физик Резерфорд совместно со своим учеником Бором выдвигает планетарную модель атома, в которой электроны наподобие планет вращаются вокруг своего «солнца» — атомного ядра. Постепенно становится ясным, что виновник радиоактивности — ядро.

В отношении частиц альфа-лучей это очевидно сразу: в атоме нигде для них нет места, кроме как в ядре, в котором сосредоточена практически вся масса атома. С другой стороны, электроны существуют на оболочках атома. Из этих оболочек также часто вылетают фотоны — кванты электромагнитной энергии. Может быть, бета- и гамма-лучи рождаются именно в электронной оболочке атома?

Нет, это оказывается невозможным. При испускании бета-лучей атом не ионизируется, не приобретает электрического заряда. Значит, его электронная оболочка остается неповрежденной. Подсчет энергии, отвечающей фотонам видимого света и рентгеновых лучей, связанных с перескоками в электронных оболочках, далее показывает, что она во много раз меньше энергии фотонов гамма-лучей. Так укрепляется мысль, что и за эти два рода радиоактивных излучений ответственность несет атомное ядро.

Проходит еще несколько лет, и Резерфорд дает физикам-теоретикам новую пищу для раздумий. Он помещает на пути альфа-лучей, испускаемых радием, баллон с чистейшим азотом и спустя некоторое время обнаруживает в нем... кислород! Мечта алхимиков осуществилась: из одного химического элемента получен другой. Но, правда, совершенно нехимическим способом.

В том же году, когда Резерфорд наблюдает первое ядерное превращение, выясняется, что ядра атомов одного и того же химического элемента могут иметь разные массы. Расчет показывает, что эти массы отличаются друг от друга на величину, кратную или очень близкую к массе ядра атома водорода. Такие ядра получают название изотопов.

Первый шаг

Радиоактивность, взаимное превращение ядер, изотопы... Казалось бы, можно делать первый шаг в создании теории атомного ядра. Начальные отправные факты есть, квантовая механика, доказавшая свою силу, тоже уже существует.

Но физики-теоретики не торопятся. Они стоят на опушке девственного леса, ловят его шум и запахи, но еще не заходят в лес. Они считают, что

еще рано подвергать «вездеход» квантовой механике тяготам неизведанного пути.

Они просят физиков-экспериментаторов, чтобы те прорубили в этом девственном лесу хотя бы еще одну маленькую просеку, на которой мог бы развернуться «вездеход». И экспериментаторы на сей раз не заставляют себя долго ждать: в 1932 году англичанин Чэдвик открывает нейтрон.

Теперь можно двигаться в путь.

До этого неясно главное: из каких частиц состоит атомное ядро. То, что оно составное, уже давно несомненно: вспомните радиоактивность, когда из ядер вылетают частицы, а сами ядра продолжают существовать. Впрочем, одна ядерная частица известна достоверно — это протон.

Казалось бы, можно считать, что ядро состоит из тех частиц, которые обнаруживаются при его радиоактивном распаде — из альфа-частиц и электронов. Однако такое простое предположение не проходит. Альфа-частицы ничем по своим свойствам не отличаются от ядер гелия. Между тем существуют и более легкие ядра — ядра водорода. Значит, именно ядро водорода — протон — должно быть самым мелким кирпичом в здании ядра. Это ядро — простейшее и потому получает соответствующее по-гречески название протона.

А теперь можно начинать мысленную постройку ядер. При этом надо учитывать основное правило: заряд ядра должен быть равен по величине совокупному заряду всех электронов в атомной оболочке, но противоположен ему по знаку (положителен). Именно поэтому атом в целом нейтрален. Кроме того, известны и массы ядер: они примерно равны массам соответствующих атомов за вычетом масс их электронных оболочек.

Итак, исходная гипотеза: ядра состоят из протонов и электронов. В ядре водорода — один протон, а электронов нет вовсе. В ядре гелия — четыре протона и два электрона; в результате его заряд равен $+4 - 2 = +2$, а масса — чуть-чуть больше учетверенной массы ядра водорода. Ведь уже известно, что электрон почти невесом в сравнении с протоном — почти в две тысячи раз легче!

Идемте дальше. Ядро лития с массой 7 и зарядом $+3$ состоит из 7 протонов и 4 электронов, ядро бора с массой 11 и зарядом $+5$ — из 11 протонов и 6 электронов, азота (соответственно 14 и $+7$) — из 14 протонов и 7 электронов, кислорода (16 и $+8$) — из 16 протонов и 8 электронов, и так далее.

Кажется, строительство ядер идет замечательно. Но природа наносит по нему удар с неожиданной стороны — с этого «и так далее». Действительно, все обстоит хорошо, но только для сравнительно мелких построек — легких ядер. По мере движения в область средних и крупных построек согласие все более нарушается. Смотрите сами. Для железа с массой ядра (будем в дальнейшем называть ее более точно — массовым числом ядра; оно показывает, во сколько раз масса ядра больше массы протона) 56 и заря-

дом +26 требуется 56 протонов и 30 электронов, для ядра урана с массовым числом 238 и зарядом +92 требуется 238 протонов и 146 электронов.

Выходит, что в каждое новое ядро природа поставляет не по одному новому протону, как можно было бы ожидать, а сразу по нескольку. Если же отвергнуть эту мысль, то сразу начнутся нелады с массами, да и с зарядами ядер. В результате закономерность в постройке ядер исчезает; нелегко понять и то, как возникают изотопы. Что-то в нашем способе постройки ядер действительно неудачно!

Да, это в самом деле так. Электроны в ядре, как понятно, должны не только «подгонять» заряд ядра к наблюдаемому на опыте. У них есть куда более важное дело. Протоны, будучи одноименно заряженными частицами, враждуют друг с другом, совсем как электроны на оболочках. Чтобы удерживать их от разлетания, надо сковать протоны друг с другом цепью притяжения к электронам.

Простой подсчет показывает, что для этой цели в ядре должно быть гораздо больше электронного цемента, чем получается в нашем способе постройки. Есть целый ряд и других, еще более убедительных возражений против присутствия электронов в ядрах. О них мы поговорим подробнее позже.

Так или иначе, физики-теоретики склонны сомневаться в том, что ядра состоят из протонов и электронов. И вот в поле их зрения появляется нейтрон. Мысль теоретиков быстро срабатывает: в том же 1932 году уже известный нам Вернер Гейзенберг и советский физик Д. Д. Иваненко выдвигают подкрепленную убедительными расчетами гипотезу, согласно которой ядра построены исключительно из протонов и нейтронов. Первый шаг сделан.

Второй шаг

Природа в постройке атомных ядер оказывается столь же экономной, как в строительстве электронных оболочек атома. Но в данном случае в ее распоряжении уже два сорта кирпичей — протоны и нейтроны.

Каждый раз, добавляя в ядро новый протон, природа внимательно следит за тем, чтобы ядро не разлетелось под напором сил взаимного отталкивания протонов. В легких ядрах (приблизительно до кальция, № 20) числа протонов и нейтронов в ядрах примерно одинаковы. Затем рост числа нейтронов опережает рост числа протонов, и чем дальше, тем все больше. В ядре урана с массовым числом 238 на 92 протона приходится уже 146 нейтронов.

Убедившись в том, что ядерное здание будет стоять, природа разнообразит немного его архитектуру: там добавит, там отнимет по одному или по нескольку нейтронов. Так получается, что многие ядра имеют по нескольку изотопов. Встречаются даже такие разнообразно «оформленные» ядра, как ядро олова, — у него целый десяток устойчивых изотопов.

Легко видеть, что гипотеза Гейзенберга и Иваненко позволяет прекрасно удовлетворить данным о массах и зарядах ядер. Так, согласно ей, ядро водорода состоит из одного-единственного протона, ядро гелия с массовым числом 4 (гелия-4) — из 2 протонов и 2 нейтронов, ядро лития-7 — из 3 протонов и 4 нейтронов, бора-11 — из 5 протонов и 6 нейтронов, азота-14 — из 7 протонов и 7 нейтронов, кислорода-16 — из 8 протонов и 8 нейтронов, и так далее.

Только теперь в этом «и так далее» уже нет никакого подвоха!

Что известно о нейтроне? Эта частица имеет массу, почти в точности равную массе протона, и не имеет никакого электрического заряда. Нейтрон оправдывает свое название: он электрически нейтрален.

На каком же основании он занимает в ядре место, в котором было отказано электрону? Тот хоть мог бы выполнять важную функцию: связывал бы враждующие протоны в ядре, удерживал бы их от разлетания. А как это может сделать незаряженный нейтрон?

Правда, выясняется, что одними электрическими силами притяжения прочность ядер объяснить не удастся. Ядра — воистину крепкие орешки. Ни одна попытка разрушить ядра химическим путем, огромными давлениями и температурами, колоссальными электрическими полями — словом, всем тем арсеналом оружия, который безотказно действует на электронные оболочки атома, — ни одна такая попытка никогда и никому не удалась.

Значит, заключают физики, нейтрон в ядре находится неспроста. Именно он должен выполнять роль цемента, сплавляющего протоны в единое целое.

Но какими силами? Ясно, что только не электрическими. Нейтрон не заряжен.

Напряженно работает мысль теоретиков. И спустя три года после открытия нейтрона блеснуло решение загадки. Японский физик Юкава высказывает идею, что между протонами и нейтронами действуют очень большие, специфически ядерные, обменные силы притяжения.

Обменные силы? Это нам уже знакомо. Именно они соединяют два атома водорода, азота, кислорода и многих других элементов в довольно прочные молекулы. В этих молекулах атомы все время обмениваются своими электронами, что притягивает атомы друг к другу.

Но о каком обмене можно говорить в случае ядра? Протон и нейтрон — разные частицы. Электронов в ядре нет. Чем же обмениваются протон и нейтрон?

Мысль, споткнувшаяся об это затруднение, имеет два пути: либо отступить, признав исходное положение об обмене неверным, либо сделать исключительный по смелости прыжок: признать, несмотря на внешнее несходство протона и нейтрона, что эти частицы не такие уж разные, что они имеют общую природу. А раз так, то они могут превращаться друг в друга: протон в нейтрон, а нейтрон в протон!

Действительно, эта мысль очень смелая. В 1935 году, когда Юкава высказывает свою гипотезу, явление взаимопревращения простейших составных частиц вещества еще нигде не обнаружено. Правда, за три года до описываемого времени установлено превращение электрона и позитрона в фотоны гамма-лучей. Но это явление имеет совершенно другую природу.

Мысль идет дальше. Если две частицы превращаются одна в другую, они должны при этом чем-то обмениваться. Приобретая это «что-то», протон превратится в нейтрон; потеряв это «что-то», нейтрон примет облик протона. Понятно, что наряду с этим может существовать и обратный обмен, когда нейтрон приобретает, а протон — теряет «что-то».

Исходя из факта великой прочности ядер, а также из того наблюдения, что силы обмена между протоном и нейтроном должны действовать лишь на крайне малых расстояниях между ними, — не даром ядра такие крошечные! — Юкава набрасывает портрет таинственного «что-то». Это вещественная частица. Она может иметь либо положительный, либо отрицательный заряд, равный по величине заряду протона (или электрона), и массу примерно в 200—300 раз больше массы электрона.

Протон и нейтрон примерно в 1800 раз массивнее электрона. Таинственная частица по своей массе находится где-то посередине между ними. Поэтому она получает название мезона (от слова «мезос», что по-гречески означает «средний»).

Тогда картина ядерного обмена рисуется следующим образом. Протон, испуская положительный мезон, должен терять с ним свой электрический заряд и превращаться в нейтрон. А нейтрон, воспринявший этот мезон, сам превращается в протон. И, напротив, нейтрон может испустить отрицательный мезон и стать протоном другим путем. А этот мезон, будучи захвачен протоном, превратит его другим путем в нейтрон.

Поиски таинственного мезона

Но где же они, эти мезоны? Снова были внимательно изучены опыты с радиоактивными ядрами. Ответ был категорически отрицателен: даже если мезоны и существуют в ядрах, они оттуда не вылетают. словно мезоны предпочитают скромно выполнять свою важную работу и не показываться на глаза людям.

Тогда физики обратились к другому поставщику сведений о ядерных частицах — к космическим лучам. Не пришлось ждать и года, как в них был обнаружен мезон! В согласии с расчетами Юкава он имел массу в 207 раз больше массы электрона.

Теоретики могли праздновать победу. Еще бы: поразительная по смелости мысль о близости протона и нейтрона и открытие мезона буквально на кончике пера! Один из самых замечательных успехов за всю историю физики!

Но радость оказалась преждевременной. Мезон отказывался вступать в тесный контакт с атомными ядрами, проявляя величайшее равнодушие к нейтронам, и лишь слегка раскланивался с протонами — в рамках обычного электрического взаимодействия. И это — частица, которой обмениваются протон и нейтрон и которая поэтому должна самым «невежливым», самым энергичным образом взаимодействовать с ними? — удивленно спрашивали друг друга физики. И единодушно решили: нет, этот «подкидыш» природы — не та частица, надо продолжать поиски.

На сей раз природа шла навстречу физикам гораздо менее охотно. Давно уже были сделаны многие выдающиеся открытия в строении атомных ядер, разгадан секрет освобождения внутриядерной энергии, построены атомные реакторы и бомбы, а долгожданная частица все не появлялась. Только в 1948 году известному исследователю космических лучей Пауэллу удалось ее «схватить за хвост».

Этой частицей опять-таки оказался мезон, но другой, уже не в 207, а в 273 раза массивнее электрона. Теперь ошибки быть не могло. Новый мезон (названный пи-мезоном в отличие от «равнодушного» мю-мезона) взаимодействовал с ядерными частицами очень энергично. В тех случаях, когда он имел солидную энергию полета, он мог даже разбивать ядра на своем пути!

Итак, предположение квантовой механики, что причиной ядерных сил должен служить мезонный обмен между протонами и нейтронами, блестяще оправдалось. Впрочем, физики были настолько уверены в правильности этого предположения, что продолжали идти вперед в дебри ядерного «леса», не имея в руках вещественных доказательств существования «нужного» мезона.

Так следовательно, непоколебимо уверенный в истинности своих догадок, идет к раскрытию преступления «налегке», и наградой ему служат те самые вещественные доказательства, которые появляются, словно чудом, в последний день следствия. Такой же, хоть и запоздалой, наградой физикам-теоретикам за их смелость мысли и явилось обнаружение пи-мезона.

Самые сильные силы на свете

Физики энергично приступили к изучению новооткрытых ядерных сил. И первое, что они обнаружили, — это исключительно малый радиус их действия, о чем мы уже упоминали. Обменные силы в молекулах начинают действовать на расстояниях между атомами порядка размеров самих атомов — стомиллионных долей сантиметра. Ядерные же обменные силы оказываются еще в десятки тысяч раз более короткодействующими. Практически они обнаруживаются лишь на расстояниях порядка размеров самих ядерных частиц. Поэтому понятно, что они существуют практически лишь внутри ядер и не проявляются вне их.

Ядерные силы — самые могучие из всех, которые мы знаем на сегодня.

няшный день. Они не только полностью подавляют взаимную антипатию протонов, которая, как понятно, на таких малых расстояниях весьма велика, но и связывают их в исключительно крепкую семью.

Чем же характеризовать прочность ядер? Для этого физики пользуются одним универсальным понятием, годным для любых тел, молекул, атомов и также ядер: энергией связи. Это та энергия, которую следует каким-либо образом передать системе частиц, чтобы разбить ее на свободные составляющие ее частицы.

Понятно, что чем больше частиц объединяется в системе, тем большей должна быть эта энергия. Поэтому для характеристики прочности обычно берут энергию связи в расчете на одну частицу. Для выражения этой энергии часто пользуются специальными единицами — электронвольтами. Такую энергию приобретает электрон, пройдя в электрическом поле разность потенциалов в 1 вольт. Для нашего мира больших вещей эта единица очень мала, для атомного же мира — довольно внушительна.

Связи между молекулами многих веществ разрываются уже при комнатной температуре, так что эти вещества существуют в обычных условиях в виде газов. Энергия связи между такими молекулами — порядка сотой доли электронвольта на молекулу.

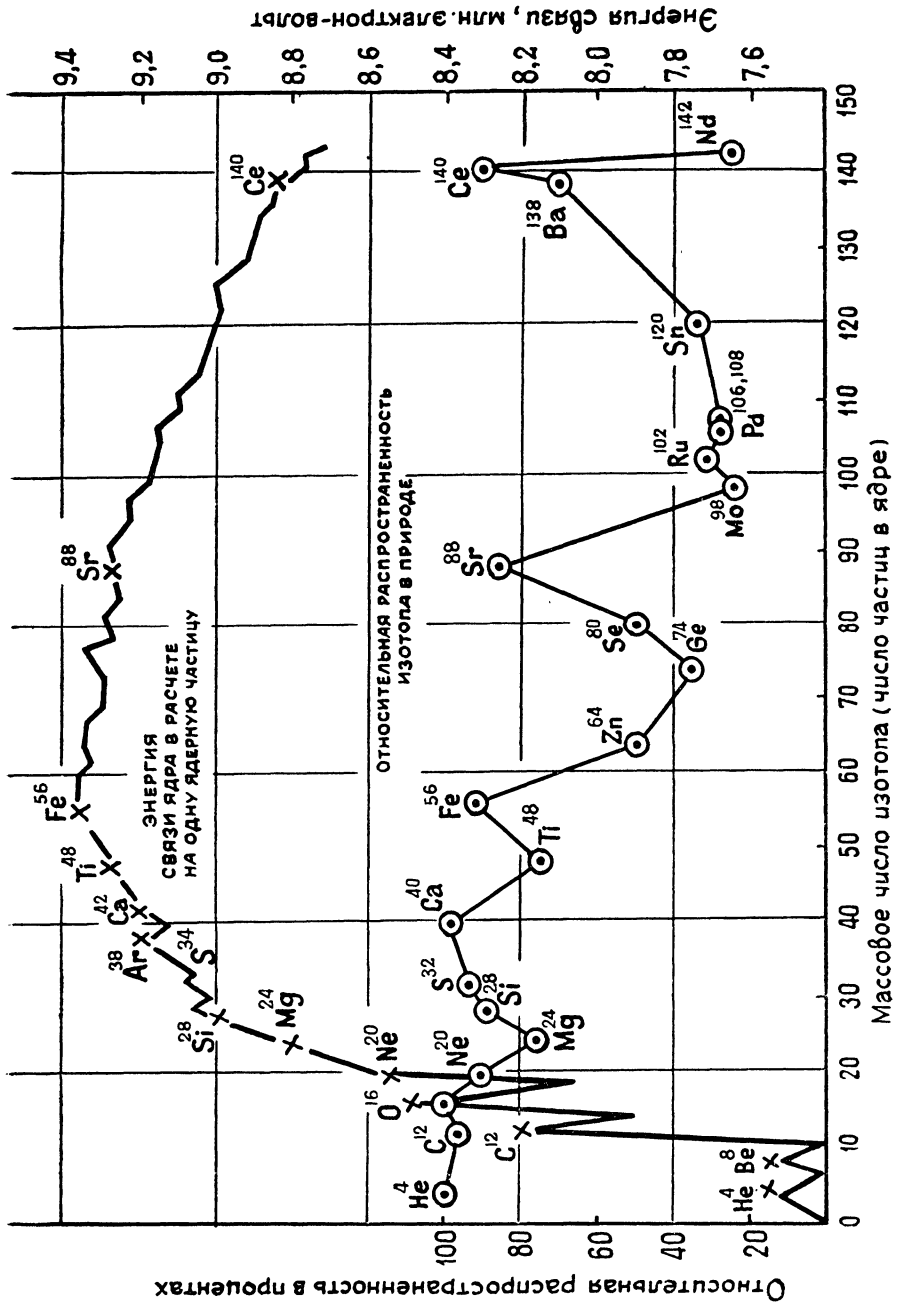
Чтобы разложить сами эти молекулы на отдельные атомы, нужна уже энергия побольше — примерно до десятка электронвольт на атом. Это отвечает внушительным температурам в тысячи и десятки тысяч градусов.

Разложить атомы на отдельные электроны и «голое» ядро еще труднее. Мы знаем, что атомные электроны имеют различную энергию, отвечающую их связи с ядрами. Область этих энергий простирается от десятков до тысяч электронвольт.

Ядерные же частицы имеют энергии связи в миллионы электронвольт! Теперь понятно, почему на ядра не производят никакого впечатления самые сильные из неядерных сил: они просто слишком слабы! Если столкнуть два ядра со скоростями теплового движения даже при тысячеградусной температуре, то для них это будет столь же нечувствительно, как для гранитной стены — удар детским мячом.

Физики, изучая работу «ядерного архитектора», определили прочность различных ядер и изобразили ее на графике в зависимости от массового числа ядра. Взглянем на этот график. Первое, что мы замечаем, это его «зубчатый» характер. Кривая на графике напоминает горный хребет. Сходство это усиливается еще и тем, что пики на кривой выступают на первый взгляд совершенно нерегулярным образом.

Но прежде чем идти дальше, взглянем и на нижний график. Это график распространенности химических элементов в природе. Чтобы построить его, физики прибегли к помощи геологов, астрономов и даже биологов. Очевидно, распространенность элемента отвечает «встречаемости» в природе



ядер его атомов. Под природой, конечно, здесь подразумевается не только наша Земля, но вообще вся видимая Вселенная — куда не добрался молоток геолога, проник взор спектрального аппарата астронома.

Сравним оба графика. Нетрудно обнаружить в них общее.

Прежде всего, в левом углу графиков можно заметить, что наиболее высокие пики верхней кривой отвечают ядрам гелия-4, углерода-12, кислорода-16 и ряду других. Все приведенные массовые числа кратны четырем, словно эти ядра состоят не из протонов и нейтронов порознь, а сразу из альфа-частиц. На нижней же кривой этим ядрам отвечают наиболее высокие относительные распространенности их в природе, близкие к 100 процентам.

Если продолжить путешествие по «горному хребту», то мы увидим, что самые заметные изломы верхней кривой приходятся как раз на пики нижней кривой. Чем более прочны ядра, тем в общем более распространены они в природе.

Напрашивается очевидный вывод. Природа в мире атомных ядер тоже словно установила некий закон «естественного отбора». Выживают только те ядра, которые более устойчивы, прочны. А наиболее распространены из них те, числа нейтронов и протонов в которых равны 2, 8, 20 и т. д. На объяснении этого последнего явления мы остановимся несколько позже, рассказывая о ядерных оболочках.

Пока же заметим, что считать ядра состоящими «прямо» из альфа-частиц не совсем правильно. Но одно подмечено верно: группа из двух протонов и двух нейтронов в самом деле обладает исключительной прочностью даже в мире атомных ядер. Физики говорят, что действующие между таким числом частиц ядерные силы как бы «насыщаются». Если попытаться присоединить к этой группе один лишний протон или нейтрон, то из этого ничего не выйдет: ядро гелия откажется принять пришельца в свою семью. Это ядро, действительно, самое негостеприимное в природе: ядер с массовым числом 5 (то есть из двух протонов и трех нейтронов или из трех протонов и двух нейтронов) вообще не существует.

Но, не принимая гостей, гелиевая семья только укрепляет свою монолитность. В самом деле, ядро гелия — самое прочное ядро в природе, если не считать ядра водорода, которое состоит из одного-единственного протона и в котором никакие ядерные силы не действуют.

Насыщение — это новое, неизвестное дотоле свойство, присущее только ядерным силам. Столь же новым и необычным является также свойство их зарядовой независимости. Этими словами названа «неразборчивость» ядерных сил: они одинаково сильно действуют как между протоном и нейтроном, так и между парой протонов или парой нейтронов. Причину этой «неразборчивости» физики не поняли до конца еще и сегодня.

Еще об устойчивости ядер

Обменные силы, приводящие к образованию прочнейших ядерных зданий, — это силы притяжения, стягивающие протоны и нейтроны. До какой же степени возможно это стягивание? Легко понять, что ему есть границы: в противном случае все ядерные частицы слились бы в одну!

Природа, разумеется, не допускает такой возможности и в противовес могучим силам ядерного притяжения выдвигает при чрезмерном сближении ядерных частиц не менее мощные силы отталкивания, не позволяющие частицам проникать друг в друга.

Это, так сказать, нижний предел радиуса действия ядерных сил. О верхнем пределе мы уже говорили. Он, очевидно, отвечает наибольшему расстоянию, на которое могут удалиться друг от друга ядерные частицы, чтобы еще испытывать сдерживающее действие ядерных сил. Этот радиус имеет порядок размеров самих ядерных частиц.

Интересное обстоятельство! Именно оно может объяснить общую тенденцию графика энергии связи: ее понижение с ростом массового числа ядер. В самом деле, в легком ядре, в котором мало протонов и нейтронов, каждая частица может быть связана ядерными силами со всеми остальными.

А как быть с насыщением, которое указывает на то, что ядерные силы предпочитают связывать лишь четверки частиц? Ответ несложен. Ядерные частицы неотличимы друг от друга, и выделить из них определенные, раз навсегда замеченные четверки невозможно. Попробуйте в кристалле из ионов натрия и хлора выделить пары, отвечающие «бывшим» молекулам. Одни и те же ионы натрия и хлора в кристаллической решетке каменной соли могут входить в различные «бывшие» молекулы NaCl , о чем мы уже говорили.

Но по мере того как ядро охватывает все большее число частиц, естественно, растут его размеры. Теперь уже каждая частица может быть связана ядерными силами только со своими непосредственными соседями. Вместо «всеобщей» связи получаются как бы цепочки связей. И ядра начинают постепенно утрачивать свою прочность, тем более, что с ростом числа протонов растут противодействующие ядерным силам силы отталкивания протонов.

Самые крупные и тяжелые ядра, находящиеся в конце периодической системы, уже довольно неустойчивы. И природа заставляет их самих по себе перестраиваться в более устойчивые ядра. А это возможно лишь, если ядро избавляется от «лишних» ядерных частиц, как корабль сбрасывает балласт, чтобы сохранить плавучесть. Лишние, выбрасываемые ядрами частицы — это и есть радиоактивные излучения.

Впрочем, как вам, вероятно, известно, существует множество радиоактивных ядер и в начале, и в середине периодической системы. Почти все они, однако, — не создание природы, а дело человеческих рук. Бомбардируя первоначально устойчивые ядра ядерными же частицами (чаще всего

нейтронами), физики нарушают их покой и приводят эти ядра в неустойчивое состояние, перегружая частицами.

В устойчивое состояние эти ядра, однако; возвращаются не по той дороге, по какой вышли из него. Да и само конечное устойчивое состояние, как правило, отличается от начального. Вывели ядро из покоя нейтроном — а оно в ответ выбрасывает электроны и гамма-фотоны и превращается в совершенно другое ядро.

В основе этого явления, названного искусственной радиоактивностью, тоже лежит стремление ядер к устойчивости, — во что бы то ни стало. Неустойчивые вещи не могут в природе долго существовать. Вспомним график распространенности ядер в природе. Он ясно говорит: чем устойчивее ядро, тем дольше оно существует, а значит, тем более распространен соответствующий элемент в природе.

Туннели в ядрах

Очень сложные законы управляют устойчивостью ядер. Ими ученые занимаются уже более тридцати лет, а они все еще не поняты до конца. О некоторых из этих законов, однако, уже кое-что известно. Поговорим о них подробнее.

Первым раскрылся секрет альфа-радиоактивности, или, как говорят, альфа-распада ядер: даже еще до того, как был открыт нейтрон. Правда, секрет-то был раскрыт, а о причинах лежащей в его основе устойчивости альфа-частиц еще ничего известно не было.

Итак, надо выяснить два вопроса: почему из ядра вылетают альфа-частицы и почему вылетают именно они, а не протоны и нейтроны порознь.

Начнем с более трудного, второго вопроса. Рассматривая график энергий связи, мы убедились в том, что ядра, состоящие из «четверок» — пар протонов и нейтронов, — например гелий -4, углерод -12, кислород-16, — более устойчивы, чем их соседи по графику. Теперь же для тяжелых радиоактивных ядер их распад происходит именно этими четверками частиц. Как же объяснить такое двусмысленное поведение альфа-частиц?

Наши затруднения еще более возрастают, если вспомнить, что ядерные силы в четверке достигают насыщения и пятую частицу к четырем невозможно присоединить. Как же в таком случае вообще существуют ядра тяжелее, чем ядро гелия?

Чтобы получить ответы на эти вопросы, надо внимательнее присмотреться к существованию альфа-частиц и к тому, как в них происходит обмен мезонами. Мы знаем, что один из возможных вариантов обмена состоит в том, что нейтрон испускает отрицательно заряженный пи-мезон, превращаясь при этом в протон, а тот, поглотив этот мезон, спустя ничтожный промежуток времени превращается в нейтрон.

Так в четверке в среднем все время живут два протона и два нейтрона.

Но представим себе, что мезон, испущенный нейтроном в какой-либо четверке, захвачен протоном в соседней четверке. Тогда одновременно совершатся два «преступления»: в первой четверке окажутся три протона и один нейтрон, а в соседней — наоборот, три нейтрона и один протон.

Почему же это — «преступление»? Обвинителем выступает уже знакомый нам принцип Паули. Протоны и нейтроны своим спином не отличаются от электрона, а потому и подпадают под все запреты для электрона. Но принцип Паули запрещает нахождение более чем одной частицы с данным направлением спина в данном состоянии.

Альфа-частица потому столь прочна, что два протона и два нейтрона в ней занимают каждые по одному уровню энергии — самому низкому из возможных. Два протона сидят на одном уровне, и на таком же уровне сидят два нейтрона. Это возможно потому, что все же в каждый момент времени протон и нейтрон в ядре имеют разный облик, то есть представляют собой все же разные частицы. Если же в четверке три протона, то один из них волей-неволей либо должен нарушить суровый запрет Паули, либо занять состояние с более высокой энергией, иными словами, с меньшей энергией связи.

Ядерные частицы не хотят совершать «преступления». Их не устраивает также и непрочное состояние. Они быстро отдадут обратно мезон — и снова существуют две обычные четверки. Но мгновенный обмен между четверками не проходит даром — он приводит к установлению взаимной связи между ними. Четверки уменьшают свою обособленность друг от друга.

Чем дальше мы уходим от легких ядер, тем слабее проявляются следы четверок в их устойчивости. Однако у тяжелых ядер след четверок снова резко виден. Частицы на периферии таких ядер, как мы уже говорили, могут взаимодействовать только с ближайшими своими соседями: уж очень велико стало ядро. И, видимо, вблизи поверхности ядер происходит некоторое обособление четверок частиц, как наиболее устойчивых.

Именно поэтому, видимо, из тяжелых ядер выбрасываются не протоны или нейтроны, а только их четверки — альфа-частицы. Но как они вообще могут вылетать из ядер? Ядро — связанная система частиц, или, как мы ее называли иначе, — потенциальная яма, отгородившаяся от свободного существования частиц высоким барьером. Известна и глубина этой ямы (или, иными словами, высота барьера) — она равна энергии связи.

Но вот отличие ядерного барьера от тех, с которыми мы имели дело раньше, состоит в том, что к нему уже не надо прикладывать никаких усилий, чтобы его «перекосить». Ядерный барьер — это уже не «ступенька лестницы», имеющая одну лишь «переднюю стенку», а «забор». Этот «забор» имеет небольшую ширину, но зато очень высок. Грубо говоря, ширина барьера определяется радиусом действия ядерных сил, а высота — величиной этих сил.

Теперь в действие снова вступает квантовая механика. Вылет альфа-частиц из радиоактивных ядер есть туннельный эффект, заявляет она, ничем по своей природе не отличающийся от туннельного вылета электронов из металла или туннельного проникновения электронов в зону проводимости в полупроводниках и изоляторах. И там и здесь «работают» волновые свойства: там — электронов, здесь — альфа-частиц.

Становится понятным «двуликое» поведение четверок. И никакое оно в сущности не двуликое: все определяется квантовыми вероятностями. Теоретически альфа-частица может вылететь и из кислородного ядра, но вероятность этого вылета совершенно ничтожна. В легких ядрах высота барьера для вылета альфа-частиц очень велика (большая энергия связи), а в тяжелых ядрах барьер невысок (значительно меньшая энергия связи). Вероятность же туннельного эффекта в сильнейшей степени зависит от высоты барьера, быстро уменьшаясь с ее ростом. В этом весь секрет.

С другой стороны, высота барьера для вылета альфа-частиц в тяжелых ядрах значительно ниже таковой для «индивидуального» вылета протонов и нейтронов. Поэтому и вылетают лишь четверки, а не отдельные частицы.

Ядро состоит из оболочек?

Ядро в отличие от атома не имеет центрального тела, вокруг которого в атоме вели хоровод электронные облака. В течение нескольких лет после открытия протонно-нейтронного строения ядра физики представляли себе ядро как более или менее равномерно размазанное по крошечному объему ядерное вещество в виде облаков протонов и нейтронов.

Однако открытие насыщения ядерных сил и явление альфа-распада как будто бы указывали на то, что ядерное вещество не совсем бесформенно, что в нем проступают контуры небольших «клеточек» — альфа-частиц. По мере того как квантовая механика и эксперимент все глубже продвигались в ядерный лес, становилось все яснее, что в этом лесу можно обнаружить и целые группы деревьев, что он не бесформен, как при взгляде издали, когда за лесом не видать отдельных деревьев.

Мы уже знаем, что четверка частиц занимает самое низкое энергетическое положение в ядре, что она наиболее устойчива из всех ядерных блоков. Этому положению отвечает один общий уровень энергии, на котором находятся два протона и два нейтрона с противоположными направлениями спинов.

Вторая четверка частиц в данном ядре займет другой уровень энергии, третья — третий и так далее. С ростом числа четверок частиц заполняются все более высокие уровни энергии в ядре, в некотором подобии тому, как это происходит с электронами в атомах.

Но не все же ядра состоят из четверок! Правильно. Значит, в ядрах с

числом частиц, не кратным четырем, соответствующие уровни энергии будут заселены не полностью.

Ядро начинает походить на атом. Там — заполненные, замкнутые, устойчивые электронные оболочки (вспомним инертные газы). Здесь — заполненные, особо устойчивые ядерные «оболочки» из четверок и большого числа ядерных частиц.

Но одной внешней аналогии мало. Хотелось бы иметь более наглядные доказательства существования оболочек в ядре. Что ж, обратимся к нашим графикам устойчивости и распространенности ядер. Возьмем на учет несколько самых высоких пиков и подчитаем, какие числа протонов и нейтронов в ядрах отвечают каждому из них.

Первый из них — это гелий-4; его ядро — альфа-частица — состоит из 2 протонов и 2 нейтронов. Затем идет кислород-16—8 протонов и 8 нейтронов, за ним кальций-40—20 протонов и 20 нейтронов, и так далее. Наконец, на правом краю графика последний высокий пик принадлежит свинцу-208, ядро которого имеет 82 протона и 126 нейтронов. (К ним надо прибавить еще ядро олова с 50 протонами. Оно настолько устойчиво, что на базе этой «конструкции» природа смогла создать целый десяток устойчивых изотопов, тогда как для других чисел протонов известны лишь 2—5 устойчивых изотопов.)

Итак, наиболее устойчивые ядра имеют числа протонов и нейтронов 2, 8, 20, 50, 82 и 126. Уместно предположить, что эти ядра — как бы аналогии атомов инертных элементов с 2, 10, 18, 36, 54 и 86 электронами. И те и другие — каждые в своем мире — рекордсмены устойчивости.

Упомянутые числа протонов и нейтронов получили название «магических». Действительно, есть что-то магическое в том, что ядра и электронные оболочки атомов — два мира, живущие по совершенно разным законам, — обнаруживают нечто общее в своем строении.

Правда, сравнение магических чисел с числами электронов в наиболее устойчивых атомах показывает их заметное различие. Совпадение этих чисел имеет место только у гелия, который держит рекорды устойчивости сразу в обоих мирах. Расхождение этих чисел не случайно. Напротив, было бы слишком удивительно, если бы оба ряда чисел совпадали: слишком уж несовхо условия жизни в ядре и в электронной оболочке атома!

Но все же некоторое подобие оболочек в ядре существует. Это подтверждается еще одной аналогией, полученной из опыта. Рассмотрим, например, атом калия (№ 19). Он одновалентен, иными словами, в нем есть один электрон сверх заполненной и замкнутой оболочки инертного атома аргона. Общий спин электронной оболочки атома калия равен спину этого валентного электрона. В самом деле, спины всех остальных электронов парно направлены в противоположные стороны и тем «гасят» друг друга, так что их сумма равна нулю.

Сравним с ним ядро изотопа кислорода-17, в котором сверх заполнен-

ной оболочки из четырех четверок частиц есть один нейтрон. В соответствии с вышеуказанным следовало бы ожидать, что спин ядра кислорода равен спину этого «сверхштатного» нейтрона. Так оно и есть.

И такое совпадение не единично. Измеренные на опыте спины ядер часто прекрасно согласуются с теми, что предсказываются моделью ядерных оболочек.

Как появляются гамма-лучи

Намеченная общность электронных оболочек атома и ядерных оболочек становится еще более очевидной, если присмотреться к происхождению третьего вида радиоактивного излучения — гамма-лучей.

Как по обрывкам доносящегося из дома разговора можно многое узнать о взаимоотношениях между его обитателями, так и физики, изучая гамма-лучи, смогли установить важные факты о жизни ядерных семей.

Прежде всего внимание ученых привлекло одно интересное обстоятельство. Спектры ядерных гамма-лучей оказались состоящими из отдельных линий. Мы уже знаем, о чем это говорит: ядерные частицы могут иметь лишь строго определенные энергии, иными словами, могут находиться в определенных состояниях. Перескоки частиц между этими состояниями и должны давать начало гамма-лучам.

Каковы же ядерные уровни энергии, как они заселяются ядерными частицами? И вот здесь на карте, нарисованной физиками, имеется много досадных «белых пятен». То, что в ядре существуют определенные уровни энергии, не должно вызывать удивления. Наличие таких уровней предсказывается уравнением Шредингера для любых связанных коллективов частиц, в том числе, конечно, и ядерных коллективов.

В случае атома формула, описывающая взаимодействие частиц, известна — это закон Кулона для взаимного отталкивания электронов и их притяжения к ядру. Этот закон и вносится в уравнение Шредингера. А вот закон ядерных сил до сих пор точно не известен.

Физики вынуждены решать обратную задачу: наблюдая спектры гамма-лучей, вычислять по ним уровни энергии в ядрах, порядок их заселения. Такой работой, если вы помните, занимались когда-то физики, комбинируя уровни энергии в атомах. Привлекая, кроме того, сведения о «яркостях» отдельных линий гамма-лучей и других их характеристиках, ученые пытаются узнать закон, которому подчиняется взаимодействие частиц в ядрах.

Однако это оказывается исключительно тяжелой задачей. Полностью она не решена и по сей день. Уже давно стало ясным, что решить эту задачу не удастся, не зная самой природы ядерных частиц. О некоторых методах, с помощью которых ученые пытаются подойти к этому вопросу, мы расскажем в следующей главе.

Все же представление об уровнях энергии в ядре, об оболочках из про-

тонных и нейтронных «облаков вероятности» оказывается весьма плодотворным. Оно позволяет объяснить не только рождение гамма-лучей, но и многие их интересные особенности.

Прежде всего ясно, что для испускания гамма-фотона ядро сначала должно перейти из устойчивого состояния с минимальной возможной энергией в состояние с более высокой энергией, которое по аналогии с атомом называют возбужденным. При возвращении ядра в прежнее или в иное устойчивое состояние и будет испущен гамма-фотон.

Ядерные силы в миллионы раз сильнее электрических. Поэтому и расстояния между уровнями энергии в ядре обычно значительно превышают энергетические расстояния в электронной оболочке. Понятно, что и гамма-фотоны должны быть во столько же раз энергичнее световых фотонов, а значит, иметь соответственно меньшую длину волны. Это наблюдается в действительности. Гамма-лучи — самые коротковолновые из всех известных излучений.

Теперь становится понятным, почему гамма-лучи — неизменный спутник почти всех радиоактивных превращений ядер. Ведь эти превращения не что иное, как переход ядер от менее к более устойчивым. Иногда одной перестройкой ядерного здания с выбрасыванием из него «лишних» частиц полной устойчивости достичь не удается. Новое ядро, хотя оказывается и более устойчивым, чем прежнее, но образуется в «возбужденном» состоянии. Тогда завершающим этапом перестройки является испускание гамма-фотона, после чего ядро перестает быть радиоактивным.

Ядро часто может отдавать свою избыточную энергию и более «хитрым» способом, который неведом электронным оболочкам атома. Вместо того чтобы выбросить гамма-фотон, ядро «потихоньку» передает энергию своего возбуждения прямо электронной оболочке. Эта энергия столь велика, что ядерный «дар» воспринимается скорее как могучий удар по всему атомному зданию. Оно, правда, при этом не разрушается до основания, но отдельные его обитатели — электроны — вылетают из атома, причем со значительными скоростями. Это явление, успешно конкурирующее с прямым испусканием гамма-лучей, называется внутренней конверсией.

Ядро — капля?

Оболочки в ядре, магические ядра... Любителям красоты научных теорий эта модель ядра была способна доставить истинное наслаждение. Однако во всякую бочку меда природа охотно подбавляет ложку дегтя. Относя это к нашему рассказу, можно сказать, что оболочечная модель ядра — это скорее ложка меда в бочке чернейшего и непроницаемого для взоров дегтя, каким является ядро.

Огромное число опытных фактов отказывалось укладываться в рамки оболочечной модели. Этому не надо удивляться.

Во-первых, ядерные оболочки, если они и есть, совершенно непохожи на электронные. Само понятие оболочки в ядре имеет, как мы видели, сугубо условный смысл. В ядре нет того центра, который «облекался» бы ядерными частицами. Кроме того, замкнутые группы в ядре состоят из совсем иных чисел частиц, чем в атоме. Наконец, в ядрах оболочки должны быть двух родов — протонные и нейтронные.

Так и получается, что слово «оболочка», перенесенное из мира атома в мир ядра, отражает не более, чем известную замкнутость, устойчивость, «насыщенность» определенных групп ядерных частиц. И притом далеко не всегда и не везде.

Об оболочках можно более или менее обоснованно говорить, в сущности, только для легких ядер, построенных из немногих ядерных частиц. По мере укрупнения ядер в них все более теряется «индивидуальность» отдельных энергетических состояний, ядра становятся по своей структуре все более «бесформенными». Ядерных частиц оказывается так много, облака их перекрываются столь сильно, что движение частиц теряет определенность, как бы перестает подчиняться квантовым законам.

В результате ядро теряет всякие черты сходства с атомом. Оболочечную модель ядра приходится оставить. Какую же новую модель придумать ядру?

И незадолго до второй мировой войны, по причинам, о которых будет сказано ниже, ученые предлагают модель: ядро — это капля ядерной «жидкости». Ядро — словно некая внешне однородная масса, без всяких упорядоченных образований в нем вроде альфа-частиц или оболочек. Отдельные ядерные частицы — молекулы ядерной жидкости — находятся в этой капле в непрерывном хаотическом движении.

Ядерная жидкость в результате приобретает некоторую текучесть. Ядро, подобно капле, имеет границы, но эти границы подвижны, текучи, могут деформироваться под действием различных внешних и внутренних причин. Однако поверхность ядра не разрывается: этому препятствует как бы поверхностное натяжение ядерной жидкости на границе капли. И объясняется это поверхностное натяжение точь-в-точь, как поверхностное натяжение обычных жидкостей: ядерные частицы связаны силами притяжения, которым вне капли не противодействуют никакие другие силы. Ядерные силы и стягивают ядерную жидкость в каплю.

Но дальше этой чисто внешней аналогии дело не идет. Сопоставим хотя бы плотности обеих жидкостей. Простой подсчет показывает, что частицы в ядрах упакованы во многие миллиарды раз плотнее, чем молекулы в жидкости. Ядерная капля размерами в ту, что свисает с водопроводного крана, весила бы добрый десяток миллионов тонн!

Невообразимая цифра! Между тем хорошо известно, как сильно свойства тел зависят от их плотности. Измените ее в тысячу раз — и газ превратится в кристалл, живущий по совершенно иным законам. Понятно теперь,

что ни о каком внутреннем сходстве между обычной и ядерной жидкостями говорить нельзя: слишком сильно различаются их плотности — уже не в тысячи, а в миллиарды раз, слишком значительно отличаются силы между ядерными частицами от сил между молекулами.

А вот внешнее сходство... Посадим каплю ртути на стекло и слегка постучим по нему. Капля задрожит, ее поверхность покроется рябью волн. Стукнем по стеклу чуть сильнее. Ртутный шарик распадется на несколько более мелких капель.

Вам это не напоминает об одном из крупнейших физических открытий недавнего времени? В 1939 году весь научный мир облетает сенсационное сообщение. Смысл его, и притом грозный смысл в те годы, понятен пока что лишь физикам. Открыто деление ядер урана!

Теоретики разных стран спешат объяснить новое поразительное явление в мире атомных ядер. Первыми независимо друг от друга добиваются успеха Нильс Бор и советский ученый Я. И. Френкель. Им удается объяснить деление ядер урана, предложив для этого капельную модель ядра.

Ядро-капля делится

Бор и Френкель рассуждали примерно так. Живет себе спокойно ядро, намечается даже какой-то порядок в движении ядерных частиц. Если ядерное здание устойчиво, то его обитатели ведут размеренную и замкнутую жизнь.

Но вот в ядро влетает непрошенная «гостья» — посторонняя частица. Она производит в нем немалый переполох. «Любопытные» обитатели ядра спешат «познакомиться» с «гостьей», «обменяться с нею приветствиями». В ядерном доме начинается форменная толчея.

Скоро новоприбывшую частицу становится невозможно отличить от коренных обитателей ядра. Энергия, которую она с собой принесла, быстро распределяется между ядерными частицами, и в результате ни влетевшая частица, ни частицы ядра не могут его покинуть. Образуется новое ядро, которое Бор назвал составным.

Все же спустя какое-то время в этой толчее какая-нибудь из частиц случайно получает достаточно сильный толчок и, преодолев потенциальный барьер на границе ядра, покидает его. Если вылетающая частица отличается от влетевшей, то совокупность этих событий имеет название ядерной реакции. Основанием такому названию служит то обстоятельство, что исходное ядро отличается от конечного. Совсем как в химии, где исходные вещества отличаются от возникающих в химической реакции.

Толчея частиц в составном ядре весьма напоминает хаотическое тепловое движение молекул в капле жидкости. Время от времени из капли испаряются отдельные молекулы. На это похоже «испарение» частиц из ядра, «разогретого» ударом в него посторонней частицы.

Что творится при этом в ядре, доподлинно не известно. Но можно считать, что оно ведет себя наподобие горячей капли. Понаблюдаем за поверхностью этой капли. Она все время волнуется, колеблется, на место вылетевшей молекулы приходят другие.

Уже давно было подмечено, что амплитуда колебаний на поверхности жидкости весьма сильно зависит от поверхностного натяжения жидкости в капле, возрастая с его уменьшением. Поверхностное натяжение в капле ядерной жидкости, как уже говорилось, обуславливается ядерными силами притяжения. Чем крупнее, массивнее ядро, тем меньше эти силы, тем слабее они связывают ядерные частицы. И в тяжелых ядрах даже сравнительно несильные толчки способны привести к угрожающему размаху колебаний их поверхности.

В случае массивных и не очень устойчивых ядер урана (вспомним, что по причине неустойчивости они и радиоактивны) таким толчком может явиться влетание в ядро нейтрона. Подчас достаточно совсем слабого толчка: ядро урана-235 разваливается уже при попадании в него теплового нейтрона, то есть нейтрона с энергией, в сотни миллионов раз меньше той, что характерна для атомных ядер.

Как делится обычная капля? Скоростная киносъемка позволяет это увидеть во всех деталях. При толчках определенной силы капля словно резонирует, на ее поверхности образуются особенно высокие волны. В какой-то момент капля принимает продолговатую форму, затем примерно посередине ее образуется перетяжка. Эта перетяжка становится все заметнее, и, наконец, капля делится на две.

Подобным образом можно наблюдать и более сложные случаи дробления капель. Тогда капли делятся не на две, а на большее число более мелких и обычно неодинаковых по размерам капель.

Бор и Френкель предположили, что деление ядер происходит в результате подобной деформации ядерной поверхности при попадании нейтронов в тяжелые неустойчивые ядра.

Секреты ядерного деления

Но почему деление ядер вызывается именно нейтронами? Почему массивные ядра предпочитают разваливаться на крупные части, а не «испарять» отдельные частицы, как это происходит при искусственной радиоактивности в ядрах малой и средней массы?

Ответим сначала на первый вопрос. Дело в том, что «забор», которым ядро отгородилось от внешнего мира, имеет, как мы уже говорили, две стороны. На настоящий забор он мало похож — обе его стороны резко несимметричны.

С внутренней стороны ядерный «забор» менее крут для протонов, чем для нейтронов. Высота его, обусловленная ядерными силами, для протонов

снижается силами их взаимного отталкивания. Наличие такого «забора» и обуславливает то, что частицы в обычных условиях не покидают ядра, что ядро сравнительно устойчиво.

А вот с внешней стороны «забора» положение совсем иное. Для протонов барьер остается. Его наличие отражает тот факт, что протоны ядра объединенными усилиями отталкивают всех незваных своих братьев. Для нейтронов же никакого барьера снаружи нет — они электрически нейтральны. Для них вместо барьера существует яма, в которую они могут проваливаться: влетев в ядро, нейтроны обычно застревают в нем.

Поэтому протон, чтобы извне проникнуть в ядро, и особенно в ядро тяжелое, многопротонное, должен обладать огромной энергией в сотни миллионов электронвольт. Нейтрону же для этого не требуется никакой энергии. Поэтому в ядро могут попадать нейтроны даже с очень малой, тепловой энергией в сотые доли электронвольта.

Теперь можно ответить и на второй вопрос. Можно было бы подумать, что нейтрон, влетевший в ядро урана-235, перегружает его настолько, что оно разваливается. Однако в капле этого ядра нейтрон — не «последняя капля», переполняющая меру его устойчивости. Это ядро, и без особого ущерба для своей устойчивости, может вместить еще три нейтрона и образовать ядро урана-238.

Итак, новоприбывший нейтрон и не перегружает ядро, и не приносит с собой сколько-нибудь заметной энергии, не «толкает» сильно каплю! В чем же тогда разгадка деления ядра урана-235?

Положение оказывается более «хитрым», — и снова проглядывают в нем кванты. Дело в том, что ядро урана-235 делит нейтрон не любой и даже не любой тепловой энергии. Энергия нейтрона, способного вызвать деление, заключена в довольно узких пределах. Эти пределы соответствуют расстоянию между уровнями энергии, отвечающими устойчивому и ближайшему к нему возбужденному состояниям ядра урана-235. Поэтому нейтроны, энергия которых соответствует разности энергий упомянутых двух состояний, особенно эффективно приводят урановые ядра в возбуждение.

В ядре урана-235 энергетическое расстояние между возбужденным и устойчивым состояниями очень невелико. Попав в возбужденное состояние, это ядро, казалось бы, должно, подобно тому как это происходит в легких ядрах, испустить гамма-фотон и какую-нибудь частицу и вернуться в то же или другое устойчивое состояние. Однако этого не происходит.

И вот почему. Мы уже говорили, что тяжелые ядра предпочитают выбрасывать не отдельные частицы, а целые их четверки — альфа-частицы. Это объяснялось тем, что потенциальный барьер для испускания альфа-частиц значительно ниже, чем для испускания отдельных ядерных частиц. Оказывается, что барьер для еще более крупных «блоков», какими являются осколки ядра при его делении, для ядра урана-235 совсем невысок.

Оказавшись в возбужденном состоянии, это ядро получает возмож-

ность перевалить через низенький барьерчик для деления и оказаться по другую его сторону... но уже в виде отдельных осколков.

Совершенно аналогичное положение существует и в случае молекул. Энергия, необходимая для удаления из молекулы хотя бы одного электрона, довольно внушительна. А вот энергия раскалывания молекулы на отдельные атомы оказывается гораздо меньшей. Именно поэтому, например, в химических реакциях молекулы дробятся не на электроны, а на атомы или целые их группы—радикалы.

Деление ядер урана-238 нейтронами происходит вполне аналогично делению ядер урана-235. Но в этом ядре возбужденное состояние отделено от устойчивого исходного состояния довольно широким энергетическим интервалом в добрый миллион электроновольт. Поэтому для «подъема» таких ядер на возбужденный уровень нужны быстрые, энергичные нейтроны.

Сколько всего может быть ядер?

Вы уже догадываетесь, что нельзя сказать «сколько угодно». Чем тяжелее ядро, тем менее оно устойчиво. Но даже ядро урана в среднем существует миллиарды лет, прежде чем оно самопроизвольно освободится от «лишней» альфа-частицы и придет в более устойчивое состояние. Несложно подсчитать, что ядра и значительно тяжелее ядра урана смогут жить в среднем довольно долго, прежде чем они выбросят альфа-частицу.

Предел «весовым категориям» ядер кладет, однако, другое явление. Мы только что видели, что по отношению к делению на крупные «блоки» тяжелые ядра отгородились очень невысоким барьером. Но тогда — вы, кажется, уже начинаете догадываться?..— тогда ядро должно иметь заметную вероятность пройти под этим барьером.

Не нужны никакие нейтроны, никакие возбуждения: ядро может делиться самопроизвольно, просачиваясь «туннельным» путем через собственный барьер! Так ли это на самом деле? В том же 1939 году природа согласно кивает головой физикам: да, так есть в действительности. Самопроизвольное деление тяжелых ядер, обнаруженное советскими физиками Флеровым и Петржаком, — не выдумка квантовой механики, а неопровержимый факт!

И чем тяжелее ядро, чем более оно перенаселено частицами, тем вероятнее такое деление. Для ядер урана оно встречается еще страшно редко, вероятность его практически близка к нулю. Но уже для ядер калифорния (№ 98) средняя продолжительность жизни ядер относительно самопроизвольного деления — не миллиарды лет, а годы; для ядер nobelium (№ 102) это время уже должно иметь порядок лишь секунд.

Но вот, наконец, у какого-то ядра барьер относительно деления совершенно исчезает. Такое ядро должно быть совершенно неустойчиво по отношению к делению. Оно даже не сможет образоваться: развалится на части

в тот же момент. На последней странице сборника «типовых проектов» стоит примерный номер 120. Это означает, что ядра, а тем самым и соответствующие атомы, со 120 и большим количеством протонов в природе не могут существовать ни при каких условиях.

Именно число протонов решающим образом определяет устойчивость ядер относительно их деления. В тяжелых ядрах резко нарастают силы отталкивания между протонами и вместе с тем убывают ядерные силы притяжения между удаленными друг от друга периферийными частицами.

В результате вблизи ядерной поверхности хозяевами положения становятся враждующие протоны, а нейтроны скромно «отходят» в тень. Силы отталкивания «раздирают» эту поверхность, и ядро разваливается на крупные «блоки».

Ядро — и оболочки, и капля!

Мы познакомились с двумя моделями атомного ядра. По одной из них ядро имеет оболочечное строение, несколько напоминающее атом. Согласно другой ядро скорее похоже на каплю жидкости. Какая же из этих моделей более правильна?

Самый разумный ответ такой: правильны обе модели, но каждая — в своем круге явлений. Оболочечная модель лучше описывает «штиль», когда ядро спокойно и не возбуждено какими-либо внешними причинами. Капельная модель лучше изображает ядро в «бурю», когда в нем все кипит, частицы интенсивно сталкиваются друг с другом, испаряются из него, а случается — дело доходит и до развала самих ядер.

Почему бы не объединить эти две модели в одну, равно хорошо описывающую и те, и другие области явлений? Однако мы уже убедились на примере теории квантов Планка, что подобное соединение, сшивание теорий — отнюдь не простая портновская операция.

Объединенная модель ядра, названная обобщенной моделью, была предложена десятилетие назад сыном Нильса Бора, известным датским физиком Оге Бором. Этой теории, конечно, достались в наследство некоторые черты теорий ее «родителей», но все же она весьма существенно от них отличается.

В основе обобщенной теории ядра лежит утверждение, что ядро ведет себя «по-оболочечному», когда числа протонов и нейтронов в нем равны магическим числам или близки к ним. В противном случае ядро ведет себя «по-капельному», причем это поведение выражено весьма отчетливо, когда число частиц вне заполненных, замкнутых оболочек достигает примерно $\frac{2}{3}$ от числа частиц в следующей заполненной оболочке.

Таким образом, получается, что частицы вне ядерных заполненных оболочек ответственны за все происшествия с ядром, начиная с вылета отдельных частиц и кончая развалом самого ядра. Частицы же в составе запол-

ненных оболочек ведут себя более скромно и прямого участия в этой деятельности ядра не принимают.

Опять напрашивается сравнение с электронными оболочками атомов. Помните, что электроны в замкнутых оболочках инертных атомов были полны «аристократического безразличия». А в то же время электроны в незаполненных оболочках активно устанавливали связи с соседними атомами, образуя молекулы, кристаллы, участвуя в химических реакциях.

Но вместе с тем в обобщенной модели считается, что непосредственное взаимодействие ядерных частиц друг с другом не слишком велико, что оболочечная «сторона медали» — не самая существенная. Наряду с «парными» взаимодействиями частиц в ядре, видимо, существуют и «коллективные» взаимодействия частиц, свойственные скорее капельной «стороне медали». Эти последние проявляются в деформациях ядерной поверхности, в результате которых ядро не имеет шарообразного распределения заряда протонов, и в ряде других особенностей ядер.

Предсказанные на основе обобщенной модели электрические, магнитные и другие свойства атомных ядер часто хорошо согласуются с тем, что дает опыт.

На этом, пожалуй, можно закончить рассказ о моделях, с помощью которых физики пытаются описывать свойства атомных ядер. Теми, о которых мы говорили, не исчерпывается число моделей, имеющих хождение среди ученых.

Хорошо или плохо, что существует столько различных моделей ядер? Скорее всего плохо. Ядро, несмотря на свою кажущуюся «многогранность», имеет ведь в действительности одно, а не множество лиц. Обилие моделей, каждая из которых по-своему хороша и по-своему неудовлетворительна, говорит о том, что хотя ядро имеет и одно лицо, но оно очень необычно и трудно для восприятия.

Так из десятка фотографий, снятых при разном освещении, под разными ракурсами, запечатлевших небольшие кусочки картины, трудно составить представление обо всей картине в целом.

В случае атомных ядер основная трудность состоит, конечно, в том, что пока еще неизвестен досконально характер ядерных сил.

Эти силы не зависят от того, заряжены частицы или нет, действуют лишь на очень малых расстояниях между ними, притом они весьма значительны. Можно еще добавить, что они, как и всякие обменные силы, зависят от взаимных направлений спинов взаимодействующих частиц.

Точное знание ядерных сил станет возможным, лишь когда физики смогут проникнуть взором внутрь самих ядерных частиц, смогут понять их структуру. Сейчас физика лишь на подходе к этой огромной теме будущих исследований, — не только не менее, но и куда более обширной, чем изучение самих атомных ядер.

Из ядра вылетают частицы, которых в нем нет!

С разгадкой секретов вылета из ядер альфа-частиц и гамма-фотонов мы уже знакомы. Осталось снять завесу с тайны вылета из ядра бета-частиц, то есть электронов.

Приступая тридцать лет назад к решению этой задачи, физики были полны оптимизма. Совсем недавно квантовая механика объяснила альфа- и гамма-радиоактивность ядер, и казалось, перед ней не устоять загадке бета-радиоактивности. Однако природа тут не торопилась раскрывать тайну. Нельзя сказать, что даже сегодня физики вполне овладели этой тайной.

Тупик, из которого не могла выйти квантовая механика в попытках объяснить это явление, был тем более досаден, что бета-радиоактивность — пожалуй, самый распространенный способ распада атомных ядер. С тех пор как в 1934 году Ирен Кюри и Фредерик Жолио-Кюри открыли искусственную радиоактивность, возникающую при бомбардировке ядер нейтронами, и особенно после того, как создание ядерных реакторов позволило производить эту бомбардировку массированно, новые, не существующие в земных условиях радиоактивные ядра посыпались в руки физиков, как из мешка.

За последнюю четверть века удалось искусственно приготовить свыше тысячи новых радиоактивных изотопов. И подавляющее их большинство испускает не альфа-, а именно бета-частицы.

Первая и основная трудность объяснения бета-распада состояла в том, что в ядре электроны не могут существовать. Выше, рассказывая о протонно-нейтронной модели ядра, мы называли некоторые основания для такого заключения. Сейчас же мы приведем основной довод против присутствия электронов в атомных ядрах.

Дело в том, что электрон не «умещается» в ядре! Электрон можно было бы считать находящимся в ядре, если бы туда удалось «вогнать» и все электронное облако вероятности. Но даже при исключительно высоких скоростях электрона, когда его энергия имеет порядок ядерных энергий, длина электронной дебройлевской волны все еще в сотни раз больше размеров ядер. А размеры электронного облака, как мы уже убедились на примере атома водорода, — того же порядка, что и длина волны электрона.

Не нашлось места электрону в ядре еще и потому, что его спин, складываясь со спинами ядерных частиц, должен был бы приводить к неправильным значениям спинов ядер.

Убедившись во всем этом, физики безапелляционно лишили электрон пристанища в ядре. Но как в таком случае из ядра может вылетать то, чего в нем нет? В ядре живут массивные частицы, а из него на свет появляется легчайший электрон. Получается так, как если бы пушку зарядили тяжелым снарядом, а вылетела из нее легонькая пуля!

Действительно, ядро преподнесло ученым новое чудо. Заметим, кроме того, что вылетающий из ядра электрон совершал два «преступления» против основных законов физики. Он нарушал сразу два закона: закон сохранения энергии и закон сохранения момента импульса.

У электрона появляется сообщник

Есть в физике законы, на которых, как на фундаменте, держится все здание физики. Эти законы справедливы для всех миров и всех явлений.

Они гласят, что движение не возникает из ничего и не превращается в ничто. Одна форма движения может породить другую, движение меняет свой облик, может даже перестать быть ощутимым. Но оно все равно никогда не исчезает.

Еще на заре классической физики ученым потребовалась какая-то мера движения. Понадобилось не только говорить о том, каково движение, но и считать, «сколько» его. Тогда в физику были введены две величины — энергия и импульс.

И положение о том, что движение не рождается и не умирает, нашло свое воплощение в неизменности общей энергии и импульса тел, принимающих участие во взаимном воздействии. Откат орудия при выстреле, нагревание работающего мотора, вбивание свай тяжелым копром и бесчисленное множество других самых различных явлений — все они беспрекословно подчиняются двум великим законам сохранения энергии и импульса. Для вращательного движения не менее универсальным оказался закон сохранения момента импульса. Именно этот закон используют, например, конькобежцы-фигуристы. Резко уменьшив размах рук, они начинают вращаться на льду с поистине «головокружительной» скоростью.

Легко представить себе потрясение физиков, когда выяснилось, что бета-частицы могут обладать любой энергией (точнее, от нуля до некоторой максимальной величины). Ядро — и это уже было в то время совершенно ясным — является квантовой системой, имеет определенные уровни энергии.

Иными словами, любой процесс в ядре, в частности приводящий к вылету бета-частиц, может идти только так, что ядро переходит с одного на другой уровень с определенной энергией. А значит, разность этих двух энергий и тем самым энергия, уносимая бета-частицей, не может быть какой угодно.

Между тем спектр энергий электронов в бета-распаде не обнаруживал даже в малейшей степени намека на «линии», отвечающие определенным энергиям! Значит, либо ядро, несмотря на свидетельства всех других процессов, не подчиняется в конечном счете квантовым законам, либо же для бета-распада ядер не выполняется закон сохранения энергии!

И не только этот закон. Электрон, кроме энергии, уносит из ядра еще свой спин, неразрывно связанный с самой сущностью электрона. Однако оказывается, что спин ядра после испускания бета-частицы остается тем

же самым, что и до испускания. Может быть, электрон все-таки оставляет свой спин в ядре? Нет, это совершенно невозможно, все равно что электрон без заряда, рояль без клавиш, ученый без головы!

Впрочем, нет. Некоторые ученые, встретившись с этим очередным коварством природы, действительно потеряли голову. Незыблемо уверившись в квантовых законах жизни ядер, они предложили принести в жертву закон сохранения энергии, пренебрежительно назвав его «классическим».

Но эту нелепую мысль быстро пришлось оставить. Где же тогда выход из этого критического положения? Его предложил уже известный нам Вольфганг Паули. Он заявил: у «преступника»-электрона есть сообщник. Каковы его приметы? Их нетрудно установить.

Ядро при бета-распаде приобретает дополнительный положительный заряд, в точности равный по величине заряду испущенного электрона. Ядро при этом как бы ионизируется. Значит, сообщник электрона не имеет заряда, должен быть электрически нейтрален.

Далее, сообщник должен иметь спин, равный спину электрона, но направленный в противоположную сторону. Оба спина как бы «гасят» друг друга, давая в сумме нуль. Тогда спин ядра при испускании электрона и его сообщника останется неизменным, как и должно быть.

И, наконец, электрон и его сообщник на пару уносят с собой энергию, как раз равную максимальной энергии, которую могут иметь электроны при бета-распаде ядра.

Эта максимальная энергия квантована, то есть как раз равна разности двух уровней энергии, на которых находится ядро до и после бета-распада. Но распределиться между электроном и его сообщником эта энергия может как угодно! На дележ их «добычи» квантовая механика не накладывает никаких ограничений.

Тогда и квантованность энергии в ядрах соблюдена, и закон сохранения энергии не нарушается. Замечательно остроумный выход из тупика нашел Паули!

Но... электрон-«преступник» обнаруживается легко, а его сообщника никто не видел. Как же это так? — вопрошают скептики. И физики по косвенным уликам подсчитывают последнюю важную примету сообщника электрона — его массу. Точный расчет оказывается неосуществимым. Но можно с уверенностью сказать, что она должна быть по крайней мере в тысячу раз меньше, чем масса электрона.

Феноменальный сообщник нашелся у электрона! Заряда у него нет, массы — почти тоже нет, а есть лишь энергия да спин. Отсутствием заряда он похож на нейтрон, открытый незадолго до того. Только в миллионы раз легче. Так и называли его ласкательно: маленький нейтрончик — нейтрино.

Никакого иного сходства между ними нет. Нейтроны активно взаимодействуют с протонами, сталкиваются с ними, образуют прочные семьи — атомные ядра. А нейтрино? Да это же дух бесплотный! И в самом деле, рас-

чет показывает, что нейтрино может пролететь всю гигантскую область Вселенной, видимую в наши телескопы, и даже не дать о себе знать. Он словно никогда и ни с чем не взаимодействует.

Забегая немного вперед, скажем, что в конце концов существование нейтрино по косвенным, но все же неопровержимым уликам удалось подтвердить несколько лет назад. С теорией бета-распада дело, в сущности, в течение ряда лет обстояло так же, как и с теорией ядерных сил. Последняя более десяти лет «висела в воздухе», пока не были найдены вещественные доказательства ее правильности — пи-мезоны. Теория бета-распада, предложенная Паули совместно с итальянским физиком Ферми, «висела» еще дольше — добрую четверть века!

А пока вернемся немного назад. Надо все-таки понять, откуда берутся электроны, не существующие в ядре и тем не менее вылетающие из него при бета-распаде.

Электроны рождаются в ядрах

Мы уже не раз убеждались в том, что в мире сверхмалых вещей на каждом шагу совершаются удивительные события. В следующей главе перед нами во весь рост встанет совершенно универсальное событие в этом мире — превращение его частиц друг в друга. Мы увидим, что для микромира это явление настолько же естественно и обычно, как относительное постоянство и неизменность вещей в нашем обычном мире.

С одним из таких превращений мы уже познакомились. Это — взаимное превращение протонов в нейтроны и нейтронов в протоны, лежащее в основе ядерных сил. В этом процессе протон, испустив положительный пи-мезон, превращается в нейтрон, а нейтрон, захватив этот мезон, превращается в протон. Но нейтрон сам может, как мы помним, испустить отрицательный пи-мезон и превратиться в протон.

Может быть, при бета-распаде из ядра и вылетает этот мезон? Нет, точные измерения массы показали, что это не имеет места. Из ядра вылетает не пи-мезон, а в двести с лишним раз более легкий электрон. В тех условиях, при которых имеет место бета-распад, мезоны из ядер не вылетают никогда.

Нам придется еще раз забежать вперед. Спустя несколько лет после открытия нейтрона физики устанавливают, что этот краеугольный камень атомных ядер — неустойчивая частица. Свободный, не находящийся в ядре нейтрон в среднем спустя примерно 12 минут после своего появления на свет превращается в протон. При этом превращении он испускает... электрон и нейтрино!

Теперь разгадка бета-распада кажется близкой. Ведь именно эта пара частиц и вылетает из ядра. Да, это так. Но нейтрон в ядре — все же не свободный нейтрон! Ядерный нейтрон должен превращаться в протон совсем иначе.

И все же не хочется выпускать из рук с таким трудом нащупанную нить в лабиринте бета-распада. Может быть, нейтрон в ядре может каким-либо образом стать «на минутку» свободным?

Нет, о свободе нейтрона, даже «на минутку», не то что на 12 минут, конечно, и говорить не приходится. Но вспомним, что ядра, испускающие бета-частицы, либо сами по себе неустойчивы (например, массивные ядра элементов в конце периодической системы), либо переведены в неустойчивое состояние бомбардировкой нейтронами. А испускание бета-частицы — это не что иное, как попытка ядра перейти из неустойчивого в более устойчивое состояние.

Обычную постройку, потерявшую устойчивость, иногда еще можно на время спасти подпорками. В кладке ее уже ничего не изменишь. Но у природы нет таких подпорок, чтобы укрепить «снаружи» разваливающуюся ядерную постройку. Она это делает «изнутри», способом, который может вызвать зависть любого незадачливого строителя.

Выше мы сравнивали протоны с кирпичами ядерного здания, а нейтроны — с цементом, который сплавивает эти кирпичи прочнейшим образом. Но что делать, если либо постройка оказалась не вполне устойчивой сама по себе, либо испытала сильный удар извне — например, попадание нейтрона в ядро?

Природа восстанавливает утраченное равновесие своего создания, превращая цемент в кирпичи, если его оказывается слишком много, либо же наоборот, превращая кирпичи в цемент, если их избыток грозит развалить ядерное здание.

А эти превращения как раз происходят с выбрасыванием из ядра «избытка» или «недостатка» заряда. Кирпич-протон, превращаясь в цемент-нейтрон, избавляется от своего заряда, выбрасывая его в облике позитрона (положительно заряженного двойника электрона). Нейтрон при превращении в протон выбрасывает электрон и этим увеличивает общий заряд ядра.

Как быстро происходят эти превращения? Совсем не за 12 минут. Мы уже говорили, что положение нейтрона в ядре радикально отличается от условий, в которых живет его свободный собрат. Иногда условия жизни в ядре таковы, что оно не выдерживает неустойчивого состояния даже тысячные доли секунды.

Иногда же эти условия тормозят распад нейтрона или протона. Тогда ядро до бета-распада живет долго, причем может жить и очень долго — сотни и тысячи лет в среднем. В этом, вообще говоря, нет ничего удивительного — сколько различных «типовых проектов» ядерных зданий, столько и разных «жилищных условий» в них для ядерных частиц.

Точно предсказать среднее время жизни бета-радиоактивных ядер квантовая механика, однако, сегодня еще не может. Это связано не только с весьма приблизительным знанием ею ядерной «архитектуры», то есть в конечном счете, знанием ядерных сил. Дело также в том, что квантовая

механика еще не может толком объяснить самого факта распада свободного нейтрона.

В основе этого распада лежат замечательные силы, которые в последние годы перевернули многие представления физиков. Но о них мы расскажем в следующей главе.

Ядро-обжора

Вернемся к некоторым очень интересным особенностям бета-распада. Одна из них заключается в том, что ядра не всегда выбрасывают только электроны.

Иногда из ядер вылетают зеркальные двойники электронов. Они отличаются от электронов только знаком электрического заряда — положительным. Объяснить этот вид бета-распада (впрочем, он встречается менее часто, чем обычный, с испусканием электронов) труднее. Нейтрон не может выбрасывать положительных электронов. Это мог бы совершать протон, превращаясь тем самым в нейтрон. Но протон, в отличие от нейтрона, абсолютно устойчив по отношению к бета-распаду.

И опять перед нами встает вопрос: как из ядра могут вылетать частицы, которых в нем нет? Теперь положение оказывается даже более трудным. Откуда берутся электроны, еще можно понять: их родитель — ядерный нейтрон. А вот откуда появляются положительные электроны, или позитроны, как их называют?

Это удалось понять, но, к разочарованию читателей, разговор об этом мы отложим до следующей главы. Читатель вправе возмутиться: сколько можно откладывать да откладывать рассказ за минуту до разгадки! Получается, как в приключенческой повести!

Нашему читателю придется тоже запастись терпением. Мы можем только сообщить, что развязка этого «приключения» окажется весьма увлекательной.

Пока же, чтобы смягчить разочарование, поведаем об удивительных случаях, когда ядро пожирает электроны из оболочки собственного атома. Физики назвали столь зверское поведение ядер довольно мягким термином «электронный захват».

Но как оно вообще возможно? В самом начале книги мы говорили, что квантовые законы жизни атома, найденные еще Бором, косвенно отражают невозможность «самоубийства» атомов. Ради этого и были введены орбиты, на которых могут жить электроны, не теряя своей энергии на излучение и не падая из-за этого на ядро.

В легких атомах, в которых невелик заряд ядра и мало электронов, запрет квантовой механики выполняется строго: электронное «облако вероятности» не заходит в область, занятую ядром. Но вот в тяжелых ядрах

самые глубокие, то есть находящиеся на наиболее близких к ядру оболочках, электроны пребывают уже в иных условиях.

Снаружи их отталкивают многочисленные электроны, изнутри не менее сильно притягивает ядро с большим положительным зарядом. И электроны не выдерживают двойного натиска: электронные облака начинают заходить в запретную ранее для них зону. Возникает некоторая (хотя все же и не очень большая) вероятность пребывания атомных электронов в ядре.

А раз существует такая вероятность, то рано или поздно в том или другом атоме природа реализует ее. Это и есть захват электрона ядром.

Но вот электрон очутился в ядре. Что при этом происходит? Заряд ядра, понятно, уменьшается на единицу, как при позитронном бета-распаде. А спин? Оказывается, спин ядра, несмотря на то, что он получил добавку от электрона, остается неизменным.

Отсюда можно сделать только один вывод: спин, принесенный электроном, из ядра уносит другая частица. Это делает старый сообщник электрона — нейтрино. Только теперь он не испускается в паре с электроном, а напротив, появляется, когда электрон исчезает в ядре.

В результате единственным свидетелем «трагедии», разыгравшейся в недрах атома, оказывается нейтрино — этот бесплотный дух. Вызвать этого «свидетеля» на допрос, как мы уже знаем, исключительно трудно.

Но все же в последние годы это удалось. Дело в том, что наш «свидетель», влетая в другое ядро, может вызвать в нем превращение протона в положительный электрон и нейтрон — процесс, обратный тому, объяснение которого мы отложили до следующей главы. Этот процесс так и был назван обратным бета-распадом.

Ставить опыт по наблюдению этого процесса на единичных нейтрино — бессмысленная задача. Нейтрино с феноменальной легкостью ускользает от всяких попыток схватить его. Значит, надо как-то собрать целые полчища этих «свидетелей», решили ученые. Тогда, может быть, удастся поймать хотя бы немногих из них.

А эту задачу было уже сравнительно нетрудно решить. В ядерных реакторах в результате реакции деления возникают мощные потоки нейтронов. Поглощаясь в материале стенок реактора, они наводят в нем искусственную радиоактивность. Немалый вклад в нее вносят и возбужденные ядра — осколки развалившихся ядер.

Эта радиоактивность есть бета-радиоактивность. Ядерный реактор ежедневно испускает целые тучи нейтрино. Сквозь защиту реактора, прекрасно задерживающую нейтроны и гамма-лучи, нейтрино проходят куда легче, чем нож сквозь масло.

Возле реактора поставили очень большой сцинтилляционный счетчик, наполненный веществом, которое хорошо отзывалось на нейтрино, — раствором кадмия. При поглощении нейтрино ядра кадмия охотно выбрасывали

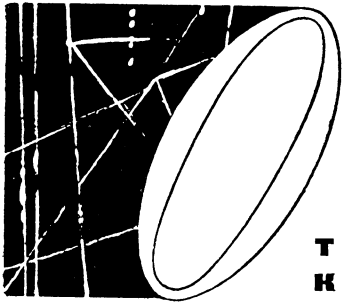
позитроны, которые давали вспышку света в веществе счетчика (например, в жидком водороде).

И позитроны действительно появились! Причина их рождения могла быть только одна — попадание нейтрино в ядра кадмия. Так, спустя четверть века после того, как Паули высказал свою гипотезу, была опознана еще одна частица мира сверхмалых вещей, рожденная на кончике пера теоретика.

Дальнейшее показало, что нейтрино — действительно одна из самых удивительных частиц микромира. Но об этом разговор впереди.

На этом мы заканчиваем путешествие с квантовой механикой по миру атомных ядер. Вместе с нею мы уже сталкиваемся с трудностями преодоления дебрей ядерного «леса». И конца этим дебрям еще не видно.

Нам предстоит углубиться в еще более скрытый мир элементарных частиц вещества, — в мир, где наиболее четко проявляются те закономерности, которые нашли свое отражение в волновых свойствах частиц вещества и вещественных свойствах волн.



Т атомных ядер — к элементарным частицам

Открытие нового мира

Что, казалось бы, может быть прочнее атомных ядер? На них не действуют ни высокие давления и температуры, ни огромные электрические и магнитные поля. Самые прочные здания, которые построила природа, — это ядра. Так сначала думали физики.

Развитие науки внесло существенные поправки в это представление. Большинство тяжелых ядер оказалось неустойчивыми. Среди легких и средних ядер также нашлось множество непрочных ядер. Понемногу начало выясняться, как природа кладет кирпичи в ядерные здания, как малейшее нарушение пропорций между числом протонов и числом нейтронов в ядре делает его неустойчивым.

Вместе с тем, чтобы объяснить наблюдаемое при распадах ядер испускание частиц, которых нет в ядре, пришлось предположить, что нейтрон может превращаться в протон, и наоборот. Это привело к мысли о существовании нейтрино.

Сама прочность ядер оказалась обязанной тоже новой, неизвестной дотоле частице — пи-мезону. В поисках этой частицы физики попутно открыли и мю-мезон.

Постепенно физикам становилось все более ясно, что мир кирпичей, из которых построены атомы и их ядра, совсем не такой неизменный и устойчивый, каким он казался раньше. В глубинах атома и в еще более интимных глубинах атомного ядра ученые стали свидетелями таких поразительных событий, перед которыми померкли те чудеса, которые дотоле предсказывала квантовая механика.

Но квантовая механика оказалась и здесь на высоте. В мире простейших

частиц в полный рост развернулись ее замечательные пророческие способности. Скептики лишь с ужасом качали головами, в то время как эти пророчества блестяще подтверждались на опыте одно за другим. И это было тем паче замечательно, что здесь, в этом сверхмикроскопическом мире, каждый новый шаг противоречил здравому смыслу.

О, этот здравый смысл! Наука двигалась бы черепашьими шагами, если бы ученым обыденное здравомыслие было присуще в той же мере, что и прочим людям!

Именно тогда и делаются наиболее выдающиеся открытия, когда здравый смысл ставится с ног на голову. Истинная сущность очень многих вещей всегда лежит не на поверхности, а скрыта в их глубине. Привычное, само собою разумеющееся зачастую обманчиво. И это «зачастую» превращается во «всегда», когда наука входит в фантастический мир сверхмалых вещей.

...Но пока на дворе стоит 1928 год. О новом мире еще мало что известно. Он только чуть-чуть приоткрылся и позволил увидеть две частицы — протон и электрон. Квантовой механике еще только три года. Правда, она с великим успехом разрешает одну старую загадку за другой. Стали понятными атом водорода, образование водородных молекул, только что с помощью представления о туннельном эффекте объяснено испускание альфа-частиц радиоактивными ядрами. О ядерных же и прочих частицах, об их сущности неизвестно по сути дела еще ничего.

И молодой английский физик Поль Дирак (да, как все они победительно молоды: самому старшему из них Эрвину Шредингеру — 38 лет, Вернеру Гейзенбергу — 28 лет, Дираку — 25 лет!) задумывается над тем, что успехи квантовой механики могут оказаться непрочными. Эта теория родилась на основе классической физики, которая описывала лишь относительно медленные движения тел.

А между тем можно ли назвать медленным движение электрона в атоме даже по старой теории Бора, когда электрон описывает вокруг ядра многие триллионы оборотов в секунду? Электрон при этом имеет скорость в легких ядрах порядка тысяч, а в тяжелых — порядка сотни тысяч километров в секунду.

Нет, конечно, это не медленные движения! Значит, нужно как-то перенести квантовую механику и на такие быстрые движения атомных частиц. Как это можно сделать?

Примерно за двадцать лет до описываемого времени появилась теория, которая была посвящена очень быстрым движениям обычных тел. Эта теория получила название специальной теории относительности; ее создатель — Альберт Эйнштейн.

Дирак приходит к мысли, что путь перенесения квантовой механики на быстрые движения микрочастиц — это объединение ее со специальной теорией относительности.

Незримый рубеж

В нашей ограниченной по объему книге осветить теорию относительности сколько-нибудь подробно, конечно, невозможно: это тема по меньшей мере другой такой же книги. Мы остановимся лишь на тех ее сторонах, которые имеют непосредственное отношение к нашему рассказу.

Прежде всего нужно уточнить, что понимается под быстрыми и медленными движениями. В обыденной жизни смысл этих слов ни у кого не вызывает сомнений. Улитка ползет медленно, а реактивный самолет летит быстро.

Легко понять, что наше представление о скорости движения совершенно субъективно. Мерой для нее служит скорость движений самого человека. Быстро или медленно — это по сравнению со скоростью ходьбы, бега, движений рук.

Но понаблюдайте из самолета за движением курьерского поезда, и у вас вырвется восклицание: «Смотрите, вон ползет поезд». А если бы вы смогли, находясь на искусственном спутнике Земли, увидеть летящий реактивный самолет, то вы отозвались бы о его скорости столь же пренебрежительно. Понятия быстроты и медленности, действительно, весьма относительны.

Физики не могут довольствоваться такими понятиями. Нужна какая-то не связанная с человеком и притом достаточно постоянная мера скорости, чтобы ею можно было пользоваться для оценки скоростей самых разнообразных движений.

Может быть, взять за такую меру скорость движения Земли по своей орбите вокруг Солнца? Вообще говоря, это неплохая мера. Но, поскольку человек с помощью астрономических приборов далеко проник во Вселенную, лучше было бы отыскать меру, не связанную с Землей и даже с Солнцем или вообще с каким-либо определенным небесным телом. Хотелось бы располагать мерой скорости, универсальной для всей видимой в телескопы области Вселенной.

Природа любезно предоставляет такую меру. Это — скорость распространения электромагнитных волн в пустоте, иными словами — скорость световых фотонов в вакууме. Она равна примерно 300 тысячам километров в секунду и является наибольшей из всех известных скоростей.

Нет уже ничего быстрее этой скорости; все движения относительно движения света более медленные. Физики выделили из этих движений такие, скорость которых близка к скорости света, и назвали их быстрыми. Такое разграничение движений кажется нам условным. Но оно имеет глубокий смысл.

Дело в том, что по мере приближения скорости движения тел к скорости света свойства тел начинают существенным и неожиданным образом меняться. Мы говорим пока о телах, состоящих из множества частиц: для них эти изменения свойств учесть оказалось более просто.

Одним из таких явных изменений является увеличение массы тел, тем более резкое, чем ближе их скорость к скорости света. Внешне это проявляется в том, что тело начинает оказывать все растущее сопротивление той силе, которая заставляет его увеличивать свою скорость. В результате, чтобы повысить скорость тела, на него приходится действовать все более значительной силой.

Но все равно никакой силы не хватит, чтобы сообщить телу точно скорость света. Теория относительности утверждает, что ни одно вещественное тело не может иметь скорости, равной скорости света. Под вещественным мы здесь понимаем любое тело (или любую его частицу), которое может находиться в покое. К фотонам, которые, как мы увидим далее, пребывать в покое не могут, этот запрет теории относительности не относится.

На языке математики описанная картина выражается известным соотношением:

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

В нем $m(v)$ — масса, которую имеет тело, двигаясь со скоростью v ; m_0 — так называемая масса покоя, которую имеет тело, будучи неподвижным, и c — скорость света.

Из этого соотношения видно, что по мере приближения v к c знаменатель уменьшается — сначала медленно, а затем все быстрее. В соответствии с этим растет $m(v)$, поскольку m_0 — постоянная величина, не зависящая от скорости. Наконец, при равенстве v и c масса тела $m(c)$ обращается в бесконечность. Иными словами, тело должно стать бесконечно массивным.

Ясно, что сообщить дальнейшее движение такому телу не в состоянии никакая сила, кроме бесконечно большой. Таких сил, равно как и тел с бесконечной массой, в природе вообще не существует. Бесконечна вся Вселенная в целом, но нигде в ней нет никаких других «бесконечностей».

К фотонам, как мы уже сказали, эта формула неприменима. Вернее, она почти ничего не дает. Фотоны не могут находиться в покое. Это можно выразить и другими словами: масса покоя фотонов равна нулю. Подставив это значение m_0 в наше соотношение, мы получим при скорости фотона, равной c , для массы фотона $m(c)$ величину $0/0$. Такая дробь, как известно из математики, неопределенна, то есть может иметь любое значение.

И действительно, как мы увидим далее, масса фотона может быть любой, и большой и маленькой. Но она существует только при $v=c$. Иными словами, фотоны могут двигаться только со скоростью света.

Вот она какая, скорость света! Ни одна вещественная частица не может иметь этой скорости и вместе с тем ни один фотон не может иметь никакой другой скорости! Так скорость света оказывается непроходимым рубежом между вещественными частицами и фотонами.

Почему же мы не замечаем предсказываемого теорией относительности увеличения массы тел в обыденной жизни? А какова скорость самого быстрого из тел, запущенных человеком? Это — вторая космическая скорость, равная примерно 11 километрам в секунду. Подсчитаем, насколько тело, набрав эту скорость, увеличится в массе по сравнению с тем же телом, только покоящимся на Земле. Если тело весит на Земле 100 килограммов, то после набора указанной скорости оно «утяжелится» на... 0,35 миллиграмма!

Но если тело имеет скорость, скажем, 250 тысяч километров в секунду, то его масса увеличится уже более чем в два раза по сравнению с его массой покоя. Такое «утяжеление» испытывают, например, заряженные атомные частицы, разгоняемые до огромных скоростей в специальных машинах — ускорителях. И конструкции ускорителей приходится продумывать с учетом этого обстоятельства.

Еще немного о теории относительности

При приближении скорости тел к скорости света удивительные вещи происходят не только с массой тел. Существенно меняется и течение времени в них. Это время физики назвали собственным временем тел. Наш организм живет по своим «часам». Ход этих «часов» определяется ритмом жизненных процессов в организме.

С другой стороны, мы встаем, идем на работу, в театр, ложимся спать по «общему» времени, по обычным часам, ход которых приурочен к смене дня и ночи, то есть к «ритму» вращения Земли вокруг своей оси.

Это о собственном времени мы говорим: «Как быстро время прошло» — или, наоборот: «Как долго тянется время». Конечно, наши высказывания субъективны, они зависят от ритма, напряженности нашей деятельности. Но в них есть и объективная сторона. Чем быстрее ритм, тем быстрее бежит время.

Наше замечание имеет самую серьезную аналогию в теории относительности. В ней утверждается, что чем быстрее движется какое-либо тело, тем медленнее течет его собственное время, так что с точки зрения этого тела оказывается, что тем быстрее бежит «общее» время.

Описанный «парадокс часов» хорошо известен сегодня тем, кто интересуется дальними космическими путешествиями. В фантастических романах герой, путешествуя на фотонной ракете со скоростью, весьма близкой к скорости света, возвращается на Землю, пробыв в космосе по своему времени, скажем, десять лет. Он узнает, что все его близкие и друзья давно уже умерли, и с горечью говорит: «Как быстро пролетели годы». Действительно, в ракете его собственное время текло медленнее, чем время на Земле.

Все сказанное о времени выражается математически соотношением:

$$t(v) = t_0 \sqrt{1 - v^2/c^2}.$$

Здесь $t(v)$ — время, прошедшее по «собственным» часам космонавта, а t_0 — время, которое отсчитали земные часы. Прочие величины в нашем соотношении имеют прежний смысл. Из этой формулы также следует, что для фотонов, движущихся со скоростью света, время вообще не идет: часы, если бы их можно было установить на фотоне, стояли бы.

О «парадоксах», столь обильных в теории относительности, можно было бы рассказать немало. Но мы не имеем этой возможности. Нас ждет еще одно соотношение этой теории, которому предстоит сыграть весьма большую роль в дальнейшем. Это — самое известное соотношение Эйнштейна, вошедшее сегодня во все учебники:

$$E_0 = m_0 c^2.$$

Здесь E_0 — энергия, которую имеет неподвижное тело с массой покоя m_0 . Называется она, в отличие от кинетической или потенциальной энергии, энергией покоя или собственной энергией тела.

Видно, что она не зависит ни от скорости, ни от положения тела. Классическая физика знает только два вышеупомянутых вида энергии. «Новая» энергия не укладывается в ее рамки. Она имеет особый смысл.

Этот смысл нам предстоит выяснить в дальнейшем. А сейчас вернемся к рассказу о том, как теория относительности была введена в квантовую механику.

Первые трудности

Итак, Дираку предстоит соединить эти две великие теории XX века в одну. Новый «сплав» должен существенно повысить «прочность» квантовой теории по отношению к натиску новых фактов о жизни мира сверхмалых вещей.

Уравнение Шредингера — эта универсальная «отмычка» квантовой механики, с помощью которой удалось вскрыть сейфы природы с хитроумнейшими запорами, — все же пасует перед рядом фактов. Требуется как-то его усовершенствовать.

Быстро выясняется, что «сплавить» это уравнение с теорией относительности — совсем нелегкое дело. Прежде всего Дираку кажется, что видоизмененное уравнение дает релятивистски неинвариантные решения. (Будущее показало, что он был не вполне прав. Но кто знает — не будь этой «счастливой» ошибки, Дирак мог бы пройти мимо своего замечательного открытия!)

Поясним, что означают два «страшных» слова — релятивистски неинвариантные. Они в самом деле страшные — эти два слова. В них заключен

суровый приговор физическим теориям. Теорию с таким ярлыком можно сдавать в архив: проку от нее не будет!

Дело заключается в следующем. Замечали ли вы когда-нибудь какую-либо разницу, скажем, в игре в мяч — на земле, на пароходе и, попробуйте себе представить, в самолете? Не замечали? Правильно, ее и нет. Но при одном условии: если пароход или самолет движутся равномерно, с постоянной скоростью.

Отличить покой от равномерного движения, с какой бы скоростью оно ни совершалось, если закрыть глаза и зажать уши, мы не сможем. Не видя смены дня и ночи, мы не улавливали бы движения Земли вокруг собственной оси. Не видя смены зимы и лета, люди не смогли бы догадаться о движении Земли по орбите вокруг Солнца. Строго говоря, два последних примера не совсем правильны: любое вращение совершается с ускорением. Но так как в нашем случае ускорения очень малы, можно считать оба движения равномерными.

Все движения тел в ракете, движущейся со скоростью, близкой к скорости света, не должны отличаться от тех же движений на Земле. (Конечно, если в ракете создано такое же, как на нашей планете, тяготение.) А раз движения тел не зависят от скорости той «системы», в которой отсчитываются их положения в пространстве с течением времени, — будь то Земля или фотонная ракета, — то, значит, и законы движения этих тел не должны зависеть от «системы отсчета».

Во всех системах, с какой бы скоростью они ни двигались равномерно относительно друг друга, запись законов движения в виде уравнений должна оставаться одной и той же. Иными словами, эта запись должна быть неизменной относительно разных скоростей.

Вот эти слова «относительно неизменный» и звучат на языке физики как «релятивистски инвариантный». Теперь нам понятен и их суровый смысл: если уравнение говорит, что в околосветовой ракете мяч летит по одной кривой (скажем, по гиперболе), а на Земле — по другой (например, по параболе), то это означает, что уравнение написано неправильно и должно быть отброшено.

Так случилось и при первых попытках видоизменить уравнение Шредингера.

Неожиданное открытие

Дирак в поисках выхода из этого затруднения предложил очень необычное средство: он ввел в уравнение Шредингера вместо одной сразу четыре волновые функции. Уравнение, которое он получил, оказалось очень мало похожим на исходное уравнение. Но новое уравнение давало прекрасные релятивистски инвариантные решения.

Решений было четыре, по числу участвующих в уравнении волновых

функций. Требовалось понять, что они означают, почему вместо одной «вероятности» для электрона сразу получались четыре!

Смысл первых двух решений оказался бы совсем темным и потребовал бы, наверное, многих лет для своего уяснения, если бы за три года до этого не был открыт спин электрона. Да, спин, тот самый старейший наш знакомый, по поводу которого мы сказали в свое время несколько горячих слов.

Два первых решения уравнения Дирака, оказалось, отвечают двум возможным направлениям спина электрона относительно направления его движения. Подсчитали величину спина по этому решению, и она оказалась в блестящем согласии с опытом!

Теперь нам предстоит поговорить о спине поподробнее. Прежде всего сам спин отвечает некоему движению электрона со скоростью, весьма близкой к скорости света. В самом деле, если на минутку (не более!) попытаться истолковать спин как результат электронного «вращения вокруг собственной оси» (мы уже говорили, что такое представление ни в малейшей мере не соответствует действительности!), то окажется, что скорость электрона в этом «вращении» лишь на ничтожную долю процента меньше скорости света.

Разумеется, то «некое» движение, о котором мы говорим в связи со спином, не имеет никакого отношения к обычному движению электрона в обычном пространстве. Спин электрона никак не зависит от этого обычного движения. Он существует независимо от того, движется электрон быстро, или медленно, или же вообще покоится. И значение спина при этом никак не меняется.

Спин является таким же неотъемлемым свойством частиц, как и, скажем, их энергия покоя. Спин частицы нельзя изменить, не изменив при этом сам род частицы. Об этом нам предстоит вести еще разговор.

Как же спин себя проявляет? Об этом мы уже вкратце упоминали, рассказывая об атомных спектрах. Еще в конце прошлого века выяснилось, что если вещество внести в магнитное поле, то его спектральные линии расщепляются на разное число более слабых линий. Впоследствии удалось установить, что подобное расщепление испытывают спектральные линии атомов решительно всех элементов.

Понять природу этого явления (оно было названо эффектом Зеемана), а тем более, почему линии расщепляются на разное число «спутников»-линий, удалось только в 1925 году, когда двое молодых физиков, Уленбек и Гаудсмит, ввели представление о спине.

Дальнейший ход рассуждений таков. Электрон имеет спин, то есть в конечном счете момент импульса. Не важно пока, какого он происхождения, важно лишь, что он отвечает некоторому движению электрона. Но движение электрона — это электрический ток. Только ток из одной частицы. «Настоящий» же ток образуется движением множества электронов.

Ток, как известно более века, обладает магнитным действием. Иначе говоря, электрон можно представлять в виде крошечного постоянного магни-

тика. Если такой магнетик внести в магнитное поле, то он будет в этом поле ориентироваться. В простейшем случае ориентаций будет две: одна вдоль направления магнитного поля (абсолютно устойчивая), другая—против поля (абсолютно неустойчивая).

Но что такое устойчивость? Когда магнетик установится вдоль поля, его потенциальная энергия в этом поле окажется наименьшей. В противоположном случае — магнетик против поля — эта энергия окажется наибольшей.

Какая количественная разница между этими энергиями? Ее нетрудно подсчитать и перевести в разницу длин волн фотонов, испускаемых в атоме электронами со спинами вдоль и против магнитного поля.

И тогда оказывается, что все спектральные линии-двойники расщеплены как раз на столько, сколько это дают две противоположные ориентировки электронного спина!

А как быть с линиями-«толстяками», расщепившимися на три, четыре и большее число «спутников»? Ведь две ориентировки спина (а больше, понятное дело, быть их не может: электронные магнетики моментально перескакивают в наиболее устойчивое положение, не останавливаясь на полдороге) дают только пару «спутников»!

И тут мы вспоминаем, что электрон, помимо «некоего» движения, ответственного за его спин, участвует еще и в движении около атомного ядра. В сущности, это движение — тоже «некое»: представление его в виде «облака вероятности» не позволяет и думать о более наглядном перемещении электрона в атоме.

Но, тем не менее, оно тоже движение, тоже «единичный» ток, тоже по своим действиям напоминает маленький магнетик. Дело теперь усложняется: электрон в атоме — как бы двойной магнетик.

Как же такой магнетик ведет себя в магнитном поле? Весьма интересно. Вместо двух ориентаций он может принимать и три, и четыре, и даже большее число их. Переходя от менее к более устойчивой ориентации, магнетик электрона может подолгу застревать в этих промежуточных положениях. Энергии же в этих положениях таковы, что являются целыми долями от наибольшей — между крайними положениями магнетика. Значит, эти энергии — не любые, а строго определенные, отделенные друг от друга интервалами-квантами определенной величины. Физики так и назвали явление определенных ориентаций электронных магнетиков в атомах в магнитном поле — пространственным квантованием.

Теперь становится понятным и остальное. Сколько ориентаций может принимать электронный магнетик, на столько «спутников» расщепляется спектральная линия! А подсчет разностей длин волн «спутников» опять обнаруживает отличное совпадение с опытом.

На этом мы пока закончим разговор о спине, так неожиданно выскользнувшем из уравнения Дирака. На очереди — еще два решения этого уравнения.

И еще более неожиданное открытие

Эти два решения очень похожи друг на друга, так же как и первые два, отвечающие противоположным ориентациям электронного спина.

Здесь тоже две противоположности: одна из ориентаций отвечает положительной, а другая — отрицательной полной энергии электрона. Что тут удивительного? Мы уже не раз видели, что полная энергия может иметь любой знак, в зависимости от того, свободно ли летит электрон или же он связан с другими частицами, например в атоме.

Но уравнение Дирака написано только для свободного электрона!

М-да... Выходит, что дираковский электрон одновременно свободен и связан. Вот так чушь!

Дирак и сам понимает, что это чушь. Проще всего, конечно, поступить так, как это делают, когда расчет дает, скажем, ответ: «Площадь помещения равна плюс-минус 20 квадратных метров». Отбросить отрицательное решение как противоречащее здравому смыслу! Исключить решение с отрицательной энергией свободного электрона как физически бессмысленное!

Но Дирак не торопится делать это. Как англичанин, он, может быть, полон здравомыслия. Но, как настоящий ученый, он начинает доискиваться той причины, которая привела к чепухе. Может быть, и в чепухе заключен какой-то тайный смысл. Но какой?

После долгих раздумий Дираку приходит в голову интересная мысль. Может быть, «нелепое» решение принадлежит не электрону, а какой-то другой частице с зарядом, противоположным заряду электрона? У электрона заряд отрицательный, у этой же частицы заряд, наоборот, должен быть положительным. По абсолютной же величине оба заряда должны быть равны. Такой частицей, как полагает Дирак, может быть протон. Однако быстро выясняется, что отрицательная энергия должна принадлежать частице с массой, равной в точности массе электрона. Протон, понятно, не подходит: он почти в две тысячи раз массивнее электрона. Такой частицей должен быть, таким образом, зеркальный двойник электрона.

Однако такое предположение еще не дает объяснения отрицательной полной энергии этой положительной частицы. Раз энергия отрицательна, значит частица с чем-то связана. Но с чем? Электрон абсолютно свободен, все другие частицы при решении уравнения «отведены» от него так далеко, что можно не учитывать его электрического взаимодействия с ними. Электрон движется один в безбрежной и абсолютной пустоте. Откуда же взяться второй, положительной, частице — зеркальному двойнику электрона?

И вот теперь Дирак высказывает главную, до безумия смелую мысль. Пустота, вакуум, в которой нет ни одной частицы, кроме одного-единственного электрона, она не пуста! Напротив, она забита до отказа электронами! Положительный же двойник электрона — это дырка в заполненной пустоте!

Пока, как мы видим, действительно безумие. В чем же смелость? А вот в чем.

Каким вы назовете пространство, в котором ни один прибор никогда не улавливает ни одной частицы, сколь чувствителен бы он ни был? Ну, конечно,— абсолютно пустым.

Осторожнее! А если в нем есть частицы, которые лишены возможности взаимодействовать с прибором? Тогда, даже если это пространство полно частиц, вы все равно будете считать его пустым?

Конечно. Но как частицы могут лишиться способности взаимодействовать? Это ведь противоречит самой их сущности!

Подождем делать такой вывод. Попробуем, например, прощупать строе-ние металла несильным электрическим полем. Пойдет ток, и мы скажем: металл заполнен свободными электронами. Однако если ограничиться одним этим опытом, мы получили бы неправильное представление о металле. В нем есть еще и атомы, чьи электроны лишены возможности взаимодействовать, например, с амперметром. Эти электроны сидят на атомных уровнях, в «яме». Выпрыгнуть из нее, чтобы провзаимодействовать с измерительным прибором, они не могут — не хватает энергии.

Но, скажете вы, не одним, так другим прибором, в другом опыте мы все-таки можем найти в металле и атомы, и даже ядра атомов. Вакуум же, понятно, никаким прибором не обнаружить. Значит, в нем ничего нет и быть не может.

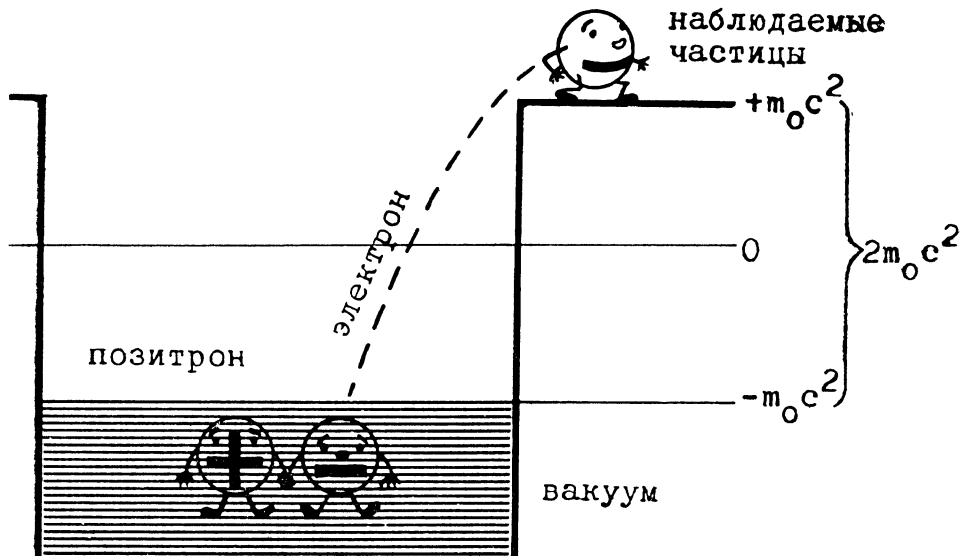
Это говорит здравый смысл. Дирак рассуждает иначе.

Вакуум заполнен электронами до отказа. Вся Вселенная участвует в образовании единого, бесконечно протяженного вакуума. Бесчисленное множество электронов в нем «доверху» заполняет бесконечное число уровней энергии вакуума, образуя единый связанный «коллектив» частиц. В соответствии с принципом Паули на каждом уровне могут находиться по два электрона с противоположными направлениями своих спинов но не более.

Общая «вселенская яма», в которой сидят электроны, не только исключительно вместительна, но и довольно глубока. Самый верхний ее уровень энергии лежит на энергетическом расстоянии m_0c^2 от нуля полной энергии вниз. Поэтому все электроны в вакууме должны иметь отрицательные энергии.

Эти вакуумные электроны не удастся обнаружить никакими приборами, пока они не выпрыгнут из ямы. Казалось бы, для этого им достаточно сообщить энергию m_0c^2 . Но этого мало. Выше мы видели, что любая частица, вне зависимости от того, движется она или покоится, имеет еще собственную энергию m_0c^2 .

Электрон, чтобы выпрыгнуть из вакуума, должен не только преодолеть барьер высотой m_0c^2 , но еще и приобрести энергию покоя m_0c^2 , которая ему по праву полагается. Таким образом, общая высота барьера, отделяющего вакуумные электроны от их взаимодействия с прибором, равна $2m_0c^2$.



Это не такая уж малая энергия. Достаточно сказать, что сообщать электронам такие энергии физики научились лишь лет двадцать назад. В те годы, когда Дирак высказал мысль о «переполненном» вакууме, о таких энергиях физики еще и не мечтали.

Но почему электроны не могут взаимодействовать с прибором, оставаясь в вакууме, наподобие того, как это имеет место в металле? Ответ опять же дает принцип Паули.

Любое взаимодействие тел есть изменение их энергии. Только по этому изменению и обнаруживается взаимодействие. Электрон в вакууме, взаимодействуя с прибором, мог бы изменить свою энергию, перейдя на какой-либо другой уровень.

Но куда! Все уровни в вакууме до отказа забиты электронами!

Вот в чем секрет «необнаружимости» вакуумных электронов. Они в вакууме есть, но взаимодействовать друг с другом и с прибором не могут. Эти электроны могут существовать у нас под боком сколько угодно времени, но мы никогда не догадаемся об этом: они просто не дают о себе знать.

Рождение „дырки“

Пусть в силу каких-либо причин (мы не будем уточнять, каких именно) из вакуума, приобретя необходимую энергию, вылетел электрон. Поскольку он стал свободен, его полная энергия теперь положительна. Что при этом произойдет в вакууме?

В нем образуется дырка. Вакуум в том месте, где он утратил вылетевший электрон, как бы ионизируется, то есть получает положительный заряд, по величине равный заряду электрона.

Дырка — но это же нам знакомо по полупроводникам! Там электрон вылетал в зону проводимости, а дырка оставалась в заполненной валентной зоне, в которой она имела отрицательную энергию. Замечательная аналогия, которая на этом же и кончается. В полупроводниках дырка — это действительно «пустое место», введенное просто для удобства описания разного типа движений электронов в валентной зоне и зоне проводимости.

Дырка же в вакууме — совсем другое дело. Дырка теперь ничем не отличается от электрона. Она оказывается самой настоящей частицей, ничуть не менее реальной, чем электрон. Дырка, так же как и электрон, имеет энергию покоя m_0c^2 , то есть энергию, как раз равную глубине самого верхнего уровня энергии в вакуумной «яме».

Иными словами, электрон и дырка рождаются из вакуумного «небытия» только парами. И на рождение каждой из них затрачивается энергия m_0c^2 (ведь массы обеих частиц одинаковы), а всего $2m_0c^2$ — величина, которую мы приводили выше.

Электрон, побродив в «свободном мире», может возвратиться обратно в вакуум. Для этого он должен повстречать дырку и слиться с ней, после чего станет вновь «ненаблюдаемым». Исчезнет также и дырка.

И все? Нет, прежде чем вернуться в вакуум, электрон должен сначала отдать ту энергию, которая была затрачена на его выбрасывание из вакуума, или, иными словами, — на рождение его и дырки, те самые $2m_0c^2$.

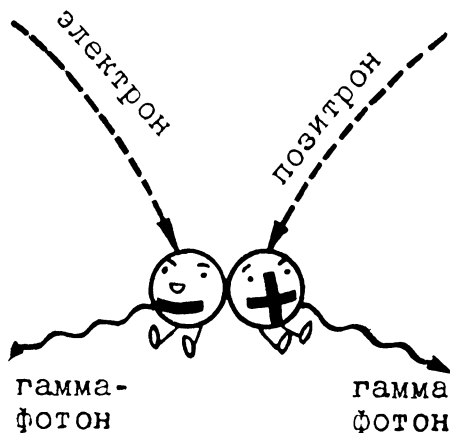
В виде чего появится эта энергия? В виде гамма-фотонов, которые, вылетев из места слияния электрона и дырки, унесут с собою эту энергию.

Остается вопрос: почему энергия будет унесена именно в виде гамма-фотонов? Дело в том, что энергия, отдаваемая парой из электрона и дырки перед тем, как они канут в «небытие», столь велика, что соответствует жестким гамма-лучам. Два, а не меньше (и чаще всего, не больше) гамма-фотона образуются потому, что сливающиеся электрон и дырка имеют противоположные направления спинов.

Это понятно: так как в вакууме общий спин электрона и дырки равен нулю, то они должны «погасить» свои спины при слиянии. Одному гамма-фотону поэтому нужен партнер тоже с противоположным направлением спина, так чтобы и у них общий спин оказался равным нулю. Этого требуют основные законы сохранения, о которых мы уже говорили.

Если поблизости от места встречи электрона с позитроном находится третье «тело», например ядро, то оно может отобрать на себя часть энергии и спина встретившихся частиц. Тогда вместо двух фотонов может появиться один.

Очертания пустоты



Физики слушали Дирака и качали головами. Даже искренние поклонники квантовой механики отказывались признать за теорией Дирака нечто большее, чем остроумный физический анекдот. Большую волю надо было иметь, чтобы отстаивать эту «сумасшедшую» гипотезу!

Но прошло совсем немного времени, и настал день, когда скептики и насмешники стыдливо отвернули свои лица. День, когда было сделано открытие, принесшее триумф теории Дирака.

На фотопластинке, экспонированной на космических лучах, англичанин Блэккетт и итальянец Оккиалини в 1932 году обнаружили два следа, соответствовавшие электрону и неизвестной частице той же массы, но положительно заряженной. Следы исходили из одной точки и расходились в разные стороны. Так как съемка производилась в специальной камере, помещенной в магнитное поле, то разное направление следов уверенно говорило о противоположности зарядов обеих частиц.

Так дырка получила права гражданства и под именем позитрона вошла в науку. Она открыла собой список микрочастиц, называемых сегодня античастицами. О них нам предстоит еще говорить.

Теория Дирака заняла бы почетное место в золотом фонде физики, даже если бы она ограничилась лишь одним предсказанием существования позитрона. Однако ее значение гораз-



до больше. Дирак открыл глаза физикам на совершенно новые стороны мира сверхмалых вещей.

Прежде всего — о вакууме. Он, согласно Дираку, заполнен невзаимодействующими с «надвакуумным» миром электронами. Стоит из вакуума вылететь электрону, как одновременно с ним возникает и позитрон. Частицы эти рождаются и умирают только парами.

Но почему не считать наоборот, — что вакуум заполнен позитронами и что электроны возникают лишь при вылете из вакуума позитронов? Теория Дирака в ее первоначальном виде считает такое представление вполне равноправным с первым. Однако мы все же отдаем предпочтение вакууму из частиц, а не из античастиц.

В самом деле, электронов мы наблюдаем сколько угодно, а вот позитрон, видимо, редкий гость в нашем мире. Отсюда, казалось бы, надо заключить, что позитронов в мире куда меньше, чем электронов. Но теория Дирака указывает, что частица возникает только в паре со своей античастицей. Значит, числа электронов и позитронов в мире должны быть одинаковыми.

Странно! И еще более странно, что наш мир и мы сами после всего этого существуем. В самом деле, ничто не мешает всем электронам, встретившись с позитронами, кануть в вакуум, оставив лишь бестелесный след в виде гамма-фотонов.

Однако встречи электрона и позитрона все же слишком редки, чтобы оправдалась столь мрачная картина погружения мира в вакуум. Выходит, что позитронов все-таки меньше, чем электронов! Но куда же они деваются?

Можно думать, что предусмотрительная природа постаралась как можно дальше развести позитроны и электроны. Такая точка зрения весьма популярна среди многих писателей-фантастов и у определенной части ученых. Они считают, что где-то в необозримой Вселенной существуют миры, «зеркальные» нашему и построенные из античастиц. В таких мирах, в частности, царствуют позитроны, а электроны являются редкими гостями.

Сейчас же на очереди еще один вопрос. Если электрон имеет свою античастицу, то почему бы не иметь ее и протону? Но тогда должен существовать и вакуум протонов! И вообще, любая частица должна иметь свою античастицу, а значит, и свой вакуум. Вакуум должен быть до отказа заполнен и нейтронами, и нейтрино, и мезонами.

Вот так пустота! Она скорее напоминает огромную «братскую яму» для всех еще не рожденных и всех уже умерших частиц.

Да, это выглядит впечатляюще! Но, если можно так выразиться, несколько «громоздко». И, действительно, прошло некоторое время, и физики отказались от дираковского вакуума, заменив его более «изящными» представлениями. Об этом еще будет речь впереди.

Выбираться из такой ямы частицы могут только парами, получив для этого достаточную энергию. Первыми, конечно, выбираются наиболее легкие частицы — нейтрино и электроны. Для протона и антипротона эта энер-

гия должна быть по крайней мере почти в две тысячи раз больше, чем для электрона и позитрона. Чем массивнее, «неповоротливее» частица, тем труднее ей выпрыгнуть из вакуума.

Пустота — пустое место?

Как умирает пара из электрона и позитрона, мы уже знаем: рождаются энергичные фотоны гамма-лучей. Но почему возникают именно фотоны, а не что-либо другое? Этим вопросом нам предстоит сейчас заняться.

...Ударим одним бильярдным шаром по другому. Результат взаимодействия очевиден: один шар отлетит в сторону, а другой начнет двигаться. Попробуйте сдвинуть с места неподвижный шар, направив другой мимо него! Другой пример: даже смешно вообразить, что лошадь будет двигать телегу, не будучи впряжена в нее и не касаясь телеги!

В этих примерах тела взаимодействуют, лишь соприкасаясь друг с другом. Неважно, кратковременно ли это взаимодействие (как при ударе шаров) или же длительно (когда лошадь впряжена в телегу). В обоих случаях взаимодействующие тела находятся в контакте.

Но есть и другой вид взаимодействия тел. Сорвавшееся с дерева яблоко падает на землю. Магнит притягивает к себе железные опилки. Наэлектризованные бузинные шарики притягиваются или отталкиваются друг от друга. Само слово «притягиваются» говорит о том, что тела «начинают» взаимодействовать, находясь на некотором расстоянии друг от друга.

Может быть, такое взаимодействие передается через воздух? Опыт уже давно ответил на это отрицательно. Земля притягивает Луну, а Солнце — их обоих, хотя между ними находится практически пустота. Атомное ядро притягивает электроны, хотя между ними абсолютный вакуум. Значит, тела могут взаимодействовать и без взаимного соприкосновения.

Еще век назад физики называли те области пространства, в которых наблюдается подобное действие на расстоянии, полем. Но то, что это пространство может быть совершенно пустым, казалось для них неприемлемым.

Нет, взаимодействие невозможно без промежуточной среды! Пусть очень эфемерная, но все же такая среда должна существовать. В соответствии с представлениями о чрезвычайной тонкости, «деликатности» этой среды она получила название эфира.

В течение ряда лет физики пытались понять свойства эфира, свойства, как мы уже говорили в начале книги, совершенно невероятные и даже противоречащие друг другу. Наконец, в конце прошлого века окончательный удар по представлению об эфире нанесли опыты со светом. А еще через несколько лет теория относительности Эйнштейна показала всю вздорность попыток возродить эфир в какой-либо форме.

Эфир рухнул, и заменить его оказалось нечем. Физики сдались и приз-

нали, что взаимодействие тел на расстоянии совершается принципиально в пустоте. Но как пустота может быть переносчиком взаимодействия — это было выше понимания самых глубоких умов. Пустота есть пустота.

Да, чем более «здро́во» обычное представление о вещах, тем труднее от него отойти. Разве у кого-нибудь из вас может вызвать хоть тень сомнения утверждение, что пространство есть вместительница всех тел? Это кажется простым как воздух, само собою разумеющимся.

Есть часть пространства, занятая веществом. Ее мы называем телом, частицей и еще множеством других названий. А есть не занятая веществом часть пространства. Ее мы называем пустотой, вакуумом. Эти две части ни в какой связи друг с другом не находятся. Пустота не действует на тела, тела не действуют на пустоту. Правда, тела могут действовать друг на друга через пустоту, но сама пустота тут ни при чем: взаимодействие обусловлено только самими телами.

Пустота зависит от тел!

Но вот появляется человек, который не только усомнился в этом обыденном представлении, но и коренным образом пересмотрел его. Речь идет об Альберте Эйнштейне и о его так называемой общей теории относительности. О хронологически первой, специальной теории относительности, посвященной быстрым движениям тел, мы уже говорили. Общая теория относительности рассматривает гораздо более широкий вопрос. Коротко его можно сформулировать так: связь тел и пространства.

Основная идея этой теории состоит в утверждении, что вещество оказывает влияние на окружающее его пространство. Совершенно однородное в отсутствие тел пространство (конечно, это возможно лишь мысленно) при «внесении» в него хотя бы одного тела теряет свою однородность.

В чем это проявляется? Как мерять эту неоднородность? Для этого предназначена геометрия.

Геометрия пустого пространства есть обычная школьная геометрия, созданная еще древнегреческим математиком Евклидом. В этой геометрии кратчайшим расстоянием между двумя точками является прямая, параллельные линии нигде не пересекаются. Она содержит еще несколько «очевидных» утверждений, потому и называемых аксиомами, то есть положениями, не требующими в силу своей очевидности никакого доказательства (которое, кстати, невозможно получить).

Однако в начале прошлого века наш гениальный соотечественник Лобачевский позволил себе усомниться в очевидности одной из этих аксиом («аксиоме о параллельности»). Он доказал, что можно создать столь же внутренне непротиворечивую, как евклидова, но в корне противоречащую здравому смыслу геометрию, отказавшись от справедливости этой аксиомы. Необычность, парадоксальность геометрии Лобачевского явилась причиной

того, что тогда ее почти никто не понял. Замечательные труды Лобачевского десятилетиями пылились на самых дальних полках университетских библиотек.

Мысли Лобачевского о том, что не существует никакой геометрии «вообще», справедливой для всех миров, что любая геометрия определяется свойствами конкретных тел, что геометрия пространства зависит от того, какие вещи в нем находятся и как они расположены, казались его современникам кощунственными. Человек, переустраивая вещи, мог бы изменять единую, «богом данному» геометрию мира!

И вот в трудах Эйнштейна эти мысли нашли достойное место. Как не существует пространства без тел, так нет и единого однородного пространства. В пустоте, окружающей тела, теперь кратчайшей линией между двумя точками является в общем случае уже не прямая, а кривая линия, называемая геодезической. Эта линия тем более «кривая», чем ближе к телам точки, между которыми она перекинута, чем массивнее эти тела.

Как же убедиться в этом? Здесь должен помочь луч света. «Искривление» пространства телами очень невелико и в обычных условиях совсем незаметно. Нужно перенести опыт в межзвездное пространство и выбрать в качестве «искривителя» какое-нибудь очень массивное тело, например Солнце. Искривление, понятно, удобнее всего наблюдать на линии, которую мы считаем прямой. Именно такую линию очерчивает луч света в пустоте, если верить классической физике. Ее-то и собирается опровергнуть Эйнштейн.

Настроим телескоп на какую-либо звезду и сфотографируем ее. Затем сфотографируем эту звезду, когда луч ее света пройдет поблизости от Солнца. При Солнце звезды не видны, так что первый снимок надо сделать ночью, а второй — во время полного солнечного затмения.

Согласно классической физике, оба изображения звезды должны оказаться на одном и том же месте фотопластинки. Свету от звезды «нет никакого дела», проходит ли он близко или далеко от Солнца. Согласно же общей теории относительности, путь света около Солнца должен искривиться. Луч света, пройдя мимо Солнца, должен чуть-чуть изменить свое направление, так что на фотопластинке он должен дать смещенное относительно первого изображение той же звезды.

В августе 1919 года специальная экспедиция отправилась в Аравийскую пустыню наблюдать полное солнечное затмение. Заодно она собиралась проверить предположение Эйнштейна. И через несколько дней после затмения телеграф принес сенсацию. Обработка фотографий показала, что искривление пространства существует, и притом почти в точности такое, какое предсказывал Эйнштейн!

С этого времени представление физиков о пустоте начинает коренным образом меняться. Пространство оказывается вместилищем не только тел, но и полей.

Вещество и поле

Что же такое поле? Физики называют этим словом область пространства, в которой проявляется взаимодействие тел. Невзаимодействующих тел, однако, не существует, все тела в конечном счете составлены из частиц, среди которых нет «равнодушных» друг к другу.

Поэтому поля существуют всегда и всюду. И не только между телами, но и в них самих, так как и там есть пустоты, не заполненные веществом. Это — первое и основное свойство поля. И отсюда сразу же следует другой, вывод: поле столь же реально и повсеместно, как и вещество.

Но у поля есть важное отличие от вещества: вещество «весомо и зримо», поле же, например электрическое, ядерное, гравитационное, невидимо. Но сказать, что поле неощутимо, нельзя. В простом наблюдении за яблоком, падающим на землю, действие поля обнаруживается по движению одного из тел.

Есть еще одно явление, в котором обнаруживается поле, на сей раз «само по себе», — это свет. Еще в прошлом веке было установлено, что свет — это особое, так называемое электромагнитное поле.

Эйнштейн в своей теории фотоэлектрического эффекта ввел фотон. Это очень важная идея. Электромагнитное поле, как оказывается, квантованно, то есть существует в виде отдельных частиц — квантов поля. Эти кванты и есть фотоны.

История поля движется дальше. Столетов в 1876 году установил, что свет может производить вещественные действия, выбивая электроны из металла. Лебедев в 1912 году обнаруживает прямое давление света на тела, как если бы свет представлял собой поток «настоящих» частиц, обладающих массой.

Эти два замечательных опыта и представление о фотоне совершенно неотвратимо ведут к заключению, что электромагнитное поле одновременно имеет вещественные свойства, что кванты поля могут иметь характеристики частиц вещества.

Это — первый пролет моста, возводимого над пропастью, которая, казалось бы, разделяет вещество и поле. Гипотеза де-Бройля достраивает этот мост с другого конца. Электроны могут иметь волновые свойства. Иными словами, вещество может проявлять себя с полевой стороны.

Поле — безграничное, невесомое — может иметь размеры и вес.

Вещество — ограниченное в пространстве, весомое — может лишиться и размеров и веса.

Следует ли отсюда, что вместо прежнего резкого противопоставления вещества и поля мы теперь должны слить их в нечто общее, неразличимое? Нет. Вещественные свойства поля проявляются наиболее заметным образом лишь при больших энергиях его квантов. Равно полевые свойства вещества резко проявляются лишь при больших энергиях его частиц.

А при малых энергиях? Тогда поле в основном выглядит как поле, а вещество — как вещество.

Пустоты не существуют!

Обнаружение на фотопластинке факта совместного рождения электрона и позитрона — это не только «открытие» вакуума. Здесь впервые на глазах людей совершилось превращение поля в вещество. Вскоре подтверждается и обратное предсказание теории Дирака: совместное умирание электрона и позитрона при их встрече, и рождение в этот момент двух гамма-фотонов.

«Постойте, о каком превращении здесь может идти речь? — может спросить читатель.— Ведь электрон и позитрон не превратились во что-то, а ушли в неизменном виде в вакуум. Отданная же ими энергия и имеет вид гамма-фотонов. Все произошло совсем так, как, скажем, в атоме, где электрон, перескочив с более высокого на более низкий уровень энергии, отдает часть своей энергии в виде фотона, но сам остается электроном!»

Однако на самом деле это не совсем так. Вот здесь-то вакуум, пустота и выступает в своем главном, полевом обличье. В атоме электрон действительно может отдать свою энергию, но всегда только ее часть. Он может даже потерять всю кинетическую энергию в свободном движении, остановиться, но «главную», собственную энергию он не отдает ни при каких обстоятельствах, если электрон хочет остаться электроном.

Ведь отдать энергию $E_0 = mc^2$, неразрывно связанную с массой покоя m_0 , — это значит потерять массу покоя, иными словами, утратить саму сущность частицы! Мы уже говорили, что частицы тем и отличаются от квантов электромагнитного поля, что могут находиться в покое и иметь притом не равную нулю массу.

Значит, когда электрон ныряет в вакуум, отдавая совместно с позитроном собственную энергию, он перестает быть электроном, равно как позитрон — позитроном. Разумеется, масса их не исчезает без следа, как и их энергия. Масса меняет свою природу и становится невещественной, полевой, а собственная энергия превращается в энергию квантов поля — гамма-фотонов. Выходит, что в вакууме никаких «настоящих» электронов нет, что они содержатся там только мысленно, если можно так сказать, — в позиции?

Да. Потому что вакуума, пустоты вообще нигде не существует, — есть только вещество и поле, заполняющие все пространство. Тот вакуум, который имел в виду Дирак, — это просто наглядное представление, позволившее ясно изобразить процессы взаимопревращения частиц вещества и квантов поля.

И пусть читатель не подумает, что автор столь долго «водил его за нос». Нет, наш рассказ надо было начать с «привычной» пустоты, затем сделать ее

«непривычной» и наконец вообще ликвидировать. Таков был естественный путь развития науки.

Электрон и позитрон превращаются при встрече в гамма-фотоны. Но если это так, то выходит, что возможен и обратный процесс, когда гамма-фотоны сами могут стать родителями упомянутой пары частиц? Совершенно верно,— если эти фотоны имеют достаточную энергию, по меньшей мере равную $2m_0c^2$ на два фотона.

Фотоны можно наблюдать, регистрировать, они вполне осязаемы. Вакуум же неощутим до тех пор, пока из него не вынырнут электрон и позитрон. Как согласовать одно с другим?

А здесь ничего и не надо согласовывать. Фотоны регистрируются как фотоны, пока их энергия не очень велика. Но как только она оказывается достаточной для превращения пары фотонов в пару частиц, тут и начинают ощущаться «вакуумные» свойства фотонов. Фотоны могут исчезать, а на их месте могут оказываться электрон и позитрон.

По существу «вакуум» — это возможность взаимных превращений вещественных частиц в кванты поля и квантов поля в частицы. Это сейчас для нас самое важное. К нему мы и ведем весь разговор с начала главы.

Впрочем, видимо, все уже более или менее понятно. Поскольку между веществом и полем перекинут мост, то по этому мосту в обе стороны может иметь место оживленное движение: частицы могут переходить через мост и превращаться в кванты поля, а кванты поля — в частицы. Важно лишь подняться на этот мост, а он довольно высок — энергетическая высота его составляет $2m_0c^2$, что для электронов соответствует миллионам, а для протонов — миллиардам электроновольт.

Итак, место вакуума в нашем рассказе заняло поле. Но все же в дальнейшем мы часто будем пользоваться представлением о вакууме для большей наглядности. Мы будем, как и выше, изображать его в виде некоего всемирного «океана», из которого выпрыгивают, чтобы вновь погрузиться в него спустя некоторое время, дельфины-частицы.

На чем стоят киты?

А теперь мы наконец можем дать обоснование одному из китов, на которых стоит «усовершенствованная» квантовая механика. Китов этих, как и в старинном предании, три: гипотеза квантов Планка, теория относительности Эйнштейна, гипотеза волновой природы частиц де-Бройля. Речь будет идти о последней гипотезе.

Не показался ли вам чуть выше несколько поспешным и необоснованным переход от общей теории относительности, установленной для миров огромных, астрономических масштабов, к миру, отличающемуся как раз сверхмалостью своих масштабов? Мы ведь уже не раз подчеркивали, что законы, справедливые для миров одних масштабов, оказываются в лучшем

случае неточными для миров других масштабов. По какому праву мы перенесли установленную Эйнштейном связь вещества и пространства на микромир?

Это право нам дает гипотеза де-Бройля, надежно проверенная и подтвержденная. Микрочастицы имеют волновые свойства. Эта их двуликость существует всегда и везде. Но что такое волна? По своим свойствам неопределенности в протяженности, вечной подвижности — она явно полевой объект. Тем самым гипотеза де-Бройля по сути дела говорит о том, что вещественные частицы имеют полевые свойства, и в этом смысле дополняет гипотезу Планка—Эйнштейна о том, что кванты поля — фотоны — имеют вещественные свойства.

В чем же проявляются полевые свойства микрочастиц? Это мы уже выяснили на многочисленных примерах. Наиболее характерным из этих свойств является некоторая размазанность электронов и других частиц в пространстве. Как говорят физики — нелокализованность. Электрон тут и вместе с тем не тут. Пытаясь измерить скорость его движения абсолютно точно, мы ничего не сможем сказать о его местоположении. Это очень типично для поля, локализовать которое, по причине его пребывания «повсюду», невозможно.

Если увеличивать скорость движения электрона, то по мере ее приближения к скорости света электрон начнет все более «тяжелеть». Откуда же он берет дополнительную массу? Электрон обычно разгоняется электрическим полем. При разгоне это поле как бы входит в электрон, передает ему свою энергию. А раз растет энергия электрона, то, по известному соотношению Эйнштейна (которое мы привели на странице 156) должны расти его скорость и его масса.

Но этот процесс «перекачки» массы из поля в частицу не может идти беспредельно. Масса нарастает очень быстро, наконец, кинетическая энергия частицы сравнивается с ее собственной энергией (это происходит, когда скорость частицы достигает примерно 80 процентов скорости света). И тут на сцену выступает новый процесс, в котором волновые, полевые свойства частиц проявляются наиболее ярко. Частицы получают возможность разом освободиться как от накопленной, так и от собственной энергии и превратиться в кванты поля.

Увеличение массы частиц при увеличении их скорости имеет своей причиной, так сказать, «инстинкт самосохранения», заложенный в них природой. Частицы не желают терять свою индивидуальность и сопротивляются повышению своей энергии, причем тем более яростно, чем ближе перед ними перспектива превращения в поле.

Частицы никогда не могут двигаться со скоростью распространения поля. Поле никогда не может распространяться с иной скоростью.

Частицы меняют свой облик

До сих пор, рассказывая о превращениях частиц, мы имели в виду только электрон (и, конечно, позитрон). После открытия нейтрона выяснилось, что он также способен к превращениям, но, в отличие от электрона, — не в кванты поля, а в другие частицы.

Нейтрон превращается, во-первых, в протон, электрон и нейтрино (при бета-распаде); для этого он должен быть свободным. Нейтрон в ядре превращается в протон и пи-мезон. Впоследствии удалось выяснить, что второе превращение нейтрона «в сумме» не очень отличается от первого. Свободный пи-мезон распадается на мю-мезон, который примерно на четверть легче его, и нейтрино. А мю-мезон в свою очередь распадается на электрон и два нейтрино. В результате.

распад свободного нейтрона:
нейтрон \rightarrow протон + электрон + нейтрино;
распад «ядерного» нейтрона:
нейтрон \rightarrow протон + пи-мезон
пи-мезон \rightarrow мю-мезон + нейтрино
мю-мезон \rightarrow электрон + 2 нейтрино

В и т о г е: нейтрон \rightarrow протон + электрон + 3 нейтрино.

Однако этот арифметический подсчет сходства обоих превращений в значительной мере обесценивается тем, что пи-мезон в ядре не распадается. Мы уже знаем, что в ядре между частицами, помимо электрических сил, действуют гораздо более значительные ядерные силы, обеспечивающие устойчивость ядер.

Новый тип сил — значит, новое поле. А раз новое поле — значит, оно имеет свои кванты. Переносчиками электромагнитных взаимодействий служат фотоны. По аналогии переносчиками ядерных взаимодействий должны быть пи-мезоны (мы уже говорили, что мю-мезоны слабо взаимодействуют с ядрами и потому быть квантами ядерного поля не могут).

Итак, пи-мезоны есть кванты ядерного поля. Но эти кванты, в отличие от фотонов, имеют массу покоя, и притом весьма заметную в мире сверхмалых величин: они почти в триста раз массивнее электронов! Но раз так, то пи-мезоны не могут двигаться со скоростью света. Вот так кванты! Казалось бы, скорее частицы, а не кванты, — и все-таки кванты. Стройная картина взаимоотношений поля и вещества, которую только что нарисовали физики, резко нарушается.

Пи-мезоны оказываются пределом двуликости. С веществом их роднит не равная нулю масса покоя, с полем — равный нулю спин.

На этом надо немного остановиться. Дело в том, что физики после возникновения квантовой механики установили еще одно резкое различие между частицами вещества и квантами поля. Это — различие в их спинах. Выяснилось, что «истинные» частицы вещества могут иметь только спин,

равный половине постоянной Планка h (точнее $h/4\pi$), в то время как кванты поля должны иметь спин либо равный нулю, либо равный целому числу постоянных Планка ($h/2\pi$).

Глубокое различие сущностей частиц и квантов проявилось в их спинах вполне оправданно. Оказалось, что от величины спина существенно зависит поведение микрообъектов.

Вспомним принцип Паули. Он требует, чтобы в общем «коллективе» никакие два электрона не находились в совершенно одинаковых состояниях. И действительно, не только электроны, но и протоны, нейтроны и вообще любые частицы с «половинным» спином беспрекословно подчиняются этому требованию.

Но вот для частиц с равным нулю или «целым» спином этот принцип не должен иметь места. И это выполняется в действительности. Например, в «коллективе» фотонов (их «братство» — вся Вселенная!) может находиться сколько угодно фотонов в одинаковых состояниях, то есть имеющих одну и ту же частоту, одно и то же направление спина (спин фотона равен единице).

Кстати, из такого разделения по спинам явствует, что «подкидыш» мю-мезон, на которого первыми натолкнулись физики, не мог быть квантом ядерного поля? Он имеет «половинный» спин. А вот пи-мезоны всем семейством обладают равным нулю спином и годны к службе в виде квантов поля. Но их не равная нулю масса покоя!..

Двуликий пи-мезон

Природа, действительно, преподнесла еще один превеликий сюрприз физикам. Попробуем в нем разобраться.

Может быть, нейтрон — это просто «спрессованная» комбинация из протона и пи-мезона? Нет, в этом нас убеждает простая арифметика: массы покоя нейтрона и протона соответственно равны (приблизленно) 1839 и 1836 электронных масс, а масса покоя пи-мезона — 273. Значит, испуская пи-мезон, нейтрон должен был бы похудеть на 273, а не на 3 электронных массы, как на самом деле.

Когда распадается свободный нейтрон, этой проблемы не возникает. Нейтрон теряет электрон, то есть одну электронную массу. Да еще электрону и нейтрону сообщает в полет двойную собственную энергию электрона, после чего приобретает массу протона. В случае же испускания пи-мезона похудание нейтрона почти в сотню раз больше. А между тем оно почему-то незаметно. Нейтронов, истощенных рождением пи-мезона, еще никто не наблюдал! Как же так получается?

Но представим себе такую картину. Нейтрон вырывает из себя отрицательно заряженный мезон и бросает его протону. Тот подхватывает мезон

и тут же превращается в нейтрон. Тот нейтрон, который был в положении форварда, превратился в облегченный протон, а протон-вратарь, схватив посланный ему мяч-мезон, стал утяжеленным нейтроном. Спустя ничтожный промежуток времени утяжеленный нейтрон, испустив захваченный им ранее мезон, превращается снова в нормальный протон, а облегченный протон, приобретя этот мезон, становится нормальным нейтроном. Мы видим, таким образом, что эта «игра в мяч» состоит из двух неравноценных этапов: первого, явно запрещенного всеми известными законами физики, и второго, вполне разрешенного.

Запрещение следует из того, что ни одна частица не может иметь массы меньшей, чем ее масса покоя, а у нас оказался облегченный протон. Можно это выразить и другими словами: нейтрон-форвард не может бросить мяч тяжелее, чем в 3 электронные массы. Для испускания мезона он должен был бы откуда-то из неведомых своих недр добыть солидную энергию, отвечающую остальным 270 электронным массам. Это, однако, явно противоречит закону сохранения энергии. В среднем в сумме обоих этапов «игры в мяч» этот закон выполняется, но на первом этапе он резко нарушен.

Когда это выяснилось, физики были склонны принять уже упоминавшуюся крамольную мысль, что закон сохранения энергии в явлениях микромира выполняется лишь в среднем, а в отдельных событиях может и нарушаться. Однако дальнейшее развитие науки еще раз подтвердило, что этот закон незыблем как скала. Так что тайна «игры в мяч» остается необъясненной с позиций классической физики.

Однако все становится на свои места, как только мы вспомним, что имеем дело с квантовыми свойствами частиц. Физики называли такие процессы, которые с классических позиций явно запрещены, — виртуальными процессами.

Система частиц или одна частица может превратиться в другую систему или частицу разными способами. Мы можем и не знать (и, в действительности, часто не знаем) этих способов, но вправе описывать это превращение, как нам удобно, используя такие промежуточные процессы, которые можно сегодня рассчитывать. Виртуальные процессы оказываются удобными и «наглядными» для сегодняшних физиков.

А не может ли обмен мезоном между протоном и нейтроном происходить так же, как, например, обмен электроном в водородной молекуле? Это ведь гораздо проще: электроны не испытывают никаких превращений, а связь между атомами все же возникает. Не может ли отрицательный пи-мезон так же «крутиться» около двух протонов?

Нет, это предположение не проходит. И вот почему. Недавно ученые умудрились пряпч в атом, на его оболочки, мю-мезон вместо электрона, и он исправно выполнял роль электрона. В частности, он объединял, подобно электрону, два атома водорода в единую молекулу — так называемую мезомолекулу водорода. Поскольку мю-мезон примерно в двести раз массивнее электрона, «его облако вероятности» располагается на столько же бли-

же к ядру, а значит, мю-мезон стягивает два атома в молекулу в двести раз меньших размеров.

Но это не пи-, а мю-мезон. И силы, которые действуют в мезомолекуле, опять-таки не ядерные, а электрические силы. Этим силам по величине очень далеко до ядерных сил.

А пи-мезон не может удержаться в атоме наподобие электрона, так как он сильнейшим и притом особым образом взаимодействует с ядром. Особенность эта и заключается в том, что пи-мезон превращает нейтрон в протон, а протон в нейтрон.

Тайна мезонного обмена проясняется

Действительно, можно считать, что пи-мезон циркулирует между ядерными частицами. Но эта циркуляция идет не вокруг частиц, а в них самих, путем испускания мезона одной частицей и захвата его другой. Однако эти-то процессы испускания и поглощения противоречат уже описанным выше законам. Но вместе с тем эти процессы идут! Идут виртуально.

Вообще говоря, виртуальные процессы нам не в новинку. Вспомним, как микрочастицы проникают сквозь потенциальные барьеры. Если стать в точку зрения классической теории, то появление частицы снаружи барьера возможно, лишь если она перепрыгнула через барьер. Между тем уравнение Шредингера показывает вероятность того, что частица, сидящая в яме, может оказаться вне ее, не приобретя ни капли энергии. Но это тоже ведь кажется противоречащим закону сохранения энергии! В самом деле, чтобы перескочить самопроизвольно через барьер, частица должна была бы извлечь энергию из самой себя,— а затем вновь эта энергия исчезает.

Выше мы объяснили это парадоксальное явление волновыми свойствами микрочастицы. Вспомним, в чем состояло это объяснение.

Согласно соотношению Гейзенберга, любая частица имеет неопределенность измерения как значения кинетической, так и значения потенциальной энергии. Пытаясь уличить частицу в проникновении сквозь барьер, то есть обнаружить ее внутри барьера, мы тем самым делаем ее энергию неопределенной. В результате эта энергия становится как раз такой, что позволяет частице перепрыгнуть через барьер совершенно законным, с классической точки зрения, путем.

В классическом смысле здесь, строго говоря,— нарушение закона сохранения энергии. Квантовая же механика показывает, что никакого нарушения этого закона не происходит.

Точно такое же объяснение можно дать испусканию и поглощению пи-мезонов ядерными частицами. Дело в том, что упомянутое соотношение Гейзенберга (второе, между энергией и временем, приведенное на странице 77) можно применять и к собственной энергии частицы. Тогда, например, похищение нейтрона при испускании им отрицательного пи-мезона или по-

худание протона при испускании им положительного пи-мезона, а также по-толстение частиц, поглотивших мезоны, можно рассматривать как некоторую неопределенность в собственной энергии этих частиц, связанную с известной неопределенностью в их массе.

Ясно, что эта неопределенность по величине не меньше, чем собственная энергия пи-мезона, $\Delta E = m_\pi c^2$, где m_π — масса покоя пи-мезона. Попробуем отсюда узнать, сколько времени может существовать указанная неопределенность в энергии. Иными словами — сколько длится полный цикл «игры в мяч» между протоном и нейтроном в ядре.

Из соотношения Гейзенберга

$$\Delta E \cdot \Delta t \sim h$$

получаем:

$$\Delta t \sim \frac{h}{m_\pi c^2}.$$

Подставляя в это выражение значения массы пи-мезона m_π , постоянной Планка h и скорости света c , получаем $\Delta t \sim 10^{-23}$ секунды.

Ничтожное время! Какое расстояние успеет пролететь за это время пи-мезон? Очевидно, предел его величины ставится тем, что пи-мезон должен двигаться со скоростью меньше скорости света. Поэтому предельное удаление пи-мезона от испустившей его ядерной частицы составит $R = c \cdot \Delta t \sim 10^{-13}$ сантиметра. Но эта величина по порядку совпадает с радиусом действия ядерных сил! Многозначительное совпадение! Оно подтверждает правильность наших рассуждений.

Итак, учесть пи-мезоны в «назаконном» вылетании из одних ядерных частиц и в столь же «назаконном» поглощении их другими частицами не удалось бы по той же причине, что и поймать электроны в момент их прохождения под потенциальными барьерами. Стоило бы только включить измерительный прибор (конечно, мысленно), как он сразу же повысил бы энергии протона и нейтрона, участвующих в обмене пи-мезоном, настолько, что этот обмен стал бы вполне законным с классической точки зрения.

И опять виртуальный процесс имеет в своей основе волновые свойства микрочастиц! Ядерные силы потому-то и обладают ограниченным радиусом действия, что кванты ядерного поля — пи-мезоны — имеют не равную нулю массу покоя.

Пи-мезон имеет вполне «устойчивое» поведение, однако лишь при исполнении служебных обязанностей в ядре. В свободном же состоянии эта частица ведет себя совершенно иначе. Оказавшись вне ядра, пи-мезон за очень малое время — порядка стомиллионных долей секунды — распадается. Положительный пи-мезон превращается в положительный мю-мезон, отрицательный — в мю-мезон того же знака заряда. Вместе с этим при распаде испускается и нейтрино.

Впоследствии был открыт и третий пи-мезон — электрически нейтральный. Этот мезон распадается еще в миллиард раз быстрее, чем его заряженные собратья. Умирая, он рождает два гамма-фотона, но гораздо большей энергии, чем те, что появляются при встрече электрона и позитрона.

В этой неустойчивости состоит серьезное отличие пи-мезонов от фотонов. Фотоны, например, могут менять свою энергию, могут даже полностью исчезать в частицах, передав им свою энергию. Но они никогда не распадаются. Никто еще не видел, чтобы фотоны дробились на более мелкие «фотончики», обладающие меньшей энергией, чем их родители.

Вот как усложнил пи-мезон нарисованную физиками картину взаимоотношений поля и вещества! Действительно, он — рекордсмен двуликости, странный гибрид частицы и кванта.

Секрет взаимодействия

Из всех известных науке полей электромагнитное поле сегодня изучено наиболее хорошо. Много известно и о каждой его «стороне медали» — электрическом и магнитном полях. Электрическое поле создается как неподвижными, так и движущимися зарядами, магнитное поле — только последними. Поскольку же всякое взаимодействие заряженных частиц связано с их движением и в нем проявляется, то в общем можно сказать, что при любом таком взаимодействии всегда выступает совокупное, электромагнитное поле.

Но отвлечемся для простоты от магнитного поля и присмотримся поближе к электрическому, точнее, электростатическому полю. Со школьных времен вы на всю жизнь запоминаете «священную» фразу: одноименные заряды отталкиваются, разноименные притягиваются. Школьные учебники разъясняют это таинственное поведение электрических зарядов следующим образом: электрический заряд создает вокруг себя поле, которое действует силой отталкивания на любой одноименный с ним заряд, попавший в это поле, и силой притяжения на любой разноименный с ним заряд.

Это объяснение, честно говоря, выглядит примерно так, как если бы на вопрос: «Почему человек умер?» — последовал бы ответ: «Из него ушла жизненная сила».

В учебниках слово «сила» сводится к слову «поле». Но мало ввести новое слово, надо еще пояснить, что оно обозначает. Однако по этому поводу ничего не говорится. Вводятся характеристики поля: напряженность, силовые линии и т. д., а вот большего не найдешь.

Действительно, классическая физика, излагаемая в этих учебниках, хотя и ввела в науку понятие поля, не смогла вложить в него сколь-нибудь конкретного, точного смысла. Поле оказалось имеющим столь сложную сущность, что она во многом еще и сегодня ускользает от физиков.

Но кое-чего квантовой механике в этом вопросе уже удалось добиться. Об этом и будет наш дальнейший рассказ.

Физика знает только два рода электрических зарядов — положительный и отрицательный. Первый принадлежит, например, протонам, второй — электронам. Это — единственные абсолютно устойчивые носители зарядов. Мы будем далее говорить только об электронах. Протон, как выясняется, «устроен» сложнее, и речь о нем пойдет позже.

Все отрицательные заряды, таким образом, принадлежат электронам. Что ж, выберем пару электронов и попробуем понять, как они враждуют друг с другом. Прежде всего, очевидно, они как-то должны «узнать» о присутствии друг друга.

Появляется первая мысль: каждый из электронов искривляет пространство вокруг себя, как это было уже установлено Эйнштейном для всех тел, сколь велики или малы бы они ни были. В результате каждый из электронов движется подле другого уже не по прямой, а по некоторой кривой линии. Совсем как шарик, когда он катится по полотну, прогнутому лежащим на нем другим шариком.

Однако такое искривление определяется массой, а не зарядом. Ему соответствует другое поле — поле тяготения.

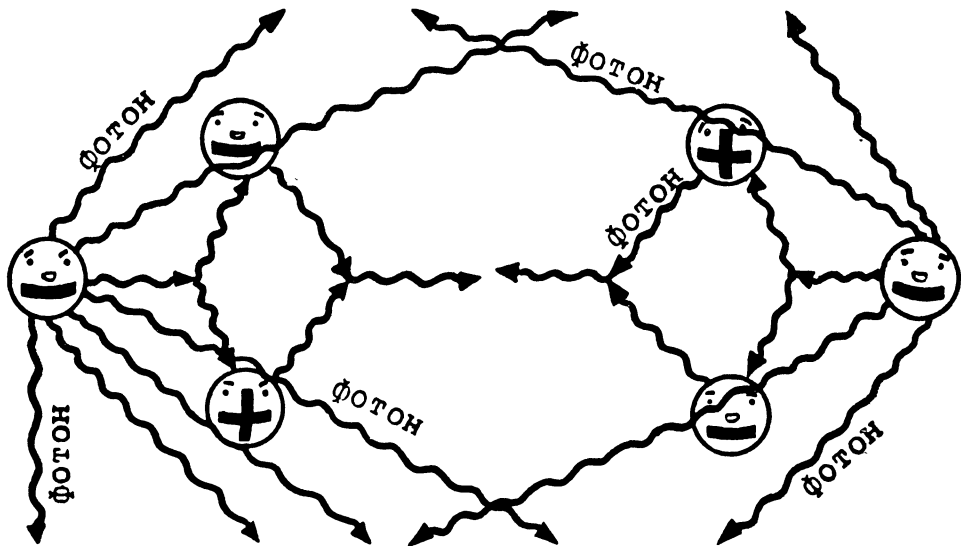
Вторая мысль: электрон нарушает однородность вакуума вокруг себя. В самом деле, если считать вакуум заполненным еще не рожденными электронами, то наш «надвакуумный» электрон должен отталкивать от себя вакуумные электроны. Когда у нашего электрона появляется партнер, он, понятно, должен действовать на вакуум аналогично.

Но отталкивание «настоящих» и вакуумных электронов — обоюдное. Значит, вакуумные электроны, постаравшись удалить от себя первый электрон, так же отнесутся и ко второму. Это и проявится во взаимном отталкивании наших обоих электронов.

Если, однако, вдуматься, то приведенное умозаключение представится не совсем «честным». Ведь мы пытаемся объяснить отталкивание. А вместе с тем вводим его без объяснения для «настоящих» и вакуумных электронов. Лошадку подменили, но с места так и не сдвинулись!

Это действительно так. Но все же представление о взаимодействии частиц через вакуум оказывается плодотворным. Для этого нужно только допустить, что электрон может самопроизвольно испускать фотоны.

Электрон, действительно, может испускать фотоны. Мы это видели при его перескоках на атомных оболочках. Но при этом он меняет свое энергетическое состояние. Правильно. А если свободный и неподвижный электрон испустит фотон и быстренько поглотит его обратно? Тогда энергия электрона останется неизменной. А сам процесс испускания окажется запрещенным с классической точки зрения. Квантовая механика, как мы уже видели, такие процессы разрешает, но с одним условием: они должны укладываться в рамки соотношения неопределенностей.



Как быстро электрон испустит и заберет обратно фотон,— это должно зависеть только от энергии фотона. Чем больше энергия последнего, тем быстрее электрон должен закончить эту операцию.

Однако за то время, пока фотон пребывает вне электрона, он успевает прощупать, подобно разведчику, окрестности пославшего его родителя. Сколь же далеко простираются эти окрестности? До бесконечности. Ведь электрон может испускать фотоны самой различной, а значит, и сколь угодно малой энергии. А такие фотоны могут уйти от своего родителя сколь угодно далеко. Однако для фотонов вполне определенной частоты радиус действия их — порядка длины волны фотона. Для фотонов видимого света это расстояние имеет порядок доли микрона.

Понятно, что фотоны не ограничиваются ролью наблюдателей. Если на их пути встречаются фотоны, испущенные другим электроном, то происходит то, что в военных сводках называется стычкой патрулей. В результате этой стычки может оказаться, что часть фотонов рассеется и не вернется к своим родителям. Например, они будут поглощены партнером.

Казалось бы, теперь нарушение закона сохранения энергии станет не виртуальным, а вполне явным. Однако нет. Энергия электронов изменится ровно настолько, сколько энергии заключено в не вернувшихся фотонах, и в результате оба электрона отодвинутся в разные стороны. В самом деле, чем дальше электроны друг от друга, тем меньше энергия их взаимодействия.

Общая же энергия фотонов и электронов при этом останется такой же, какой она была «вначале». Это слово мы взяли в кавычки потому, что ни

начала, ни конца взаимодействия двух электронов не существует. Взаимодействие нельзя включать и выключать. Сколь далеко ни пребывали бы электроны друг от друга, они всегда находятся во взаимодействии.

И все же такое объяснение оставляет некоторое чувство неудовлетворенности. Поле получается как бы привязанным к своему создателю. Между тем нам известно, что фотоны очень самостоятельны.

Что ж, для большего удовлетворения можно ввести еще один виртуальный процесс. О таком процессе мы уже говорили, он встречается и в действительности. Достаточно энергичный фотон, испущенный электроном, может за время своей недолгой «разрешенной» жизни превратиться в пару из электрона и позитрона!

Так вместо одного электрона у нас на мгновение окажутся два электрона и позитрон. Пройдет это мгновение — и снова электрон очутится в одиночестве. Но какой из двух электронов исчезнет, слившись с позитроном? Этого сказать нельзя: оба электрона неотличимы друг от друга.

Очень интересно! Жаль только, что наблюдать этот «букет» частиц, распустившийся из одного электрона, казалось бы, нельзя: слишком, видимо, коротко это мгновение.

Проверим, так ли это. Простой подсчет по соотношению Гейзенберга показывает, что наше мгновение длится примерно 10^{-21} секунды. За это время фотон успеет родить пару из второго электрона и позитрона на расстоянии около 10^{-11} сантиметра от первого электрона.

Вот эта-то величина и характерна для предельно малой размазанности электрона в пространстве. 10^{-11} сантиметра — это длина дебройлевской волны электрона, движущегося со скоростью, близкой к скорости света.

Знаменательнейшее обстоятельство! Оно показывает, что волновые свойства электрона (да и, понятно, всех других частиц) имеют в своей основе взаимодействие, то есть, иными словами, полевую природу электрона. Электрон размазывается потому, что он бесчисленное множество раз в секунду как бы ныряет в вакуум и выпрыгивает из него по соседству.

Физики назвали столь своеобразное поведение электрона «дрожащий электрон». Это образное сравнение очень близко к действительности. Электрон при таком процессе может «дрожать», находиться где угодно в пределах отведенного ему участка пространства. А этот участок определяется энергией, а значит, длиной волны фотонов, которые могут рождают пары из электрона и позитрона.

Царство виртуальностей

Итак, электрон виртуально испускает фотоны. Фотоны в свою очередь виртуально превращаются в пары электронов и позитронов. Пары, сливаясь, рождают фотоны. А фотоны поглощаются обратно электроном. Весь этот

калейдоскоп превращений обязан совершаться с фантастической быстротой — многие миллиарды миллиардов раз в секунду.

Фотон, испущенный каким-либо электроном, может быть захвачен не им, а другим электроном. Но электроны неотличимы друг от друга. Узнать, какой из них захватил испущенный фотон, нет ни малейшей возможности.

Но вот результат этого обмена не виртуален, а вполне реален: электроны стремятся уйти как можно дальше друг от друга. Но даже когда расстояние между электронами во много раз превышает степень их «вакуумной размazanности», фотоны достигают их и еще более удаляют друг от друга. Только чем больше это расстояние, тем менее энергичные фотоны могут его преодолеть, значит, тем меньше энергия передается электронам при их обмене фотонами, тем слабее отталкиваются электроны. Что ж, именно это и говорит закон Кулона.

Электронное взаимодействие всепроникающе. И участвуют в нем не два электрона, как мы считали для простоты рассуждений, а решительно все электроны Вселенной. Неизмеримо протяженное электромагнитное поле можно найти в любом уголке бесконечного мира!

Взаимодействие электрона и позитрона, электрона и протона и вообще любых разноименно заряженных частиц имеет ту же виртуальную природу. Но только теперь реальным следствием обмена фотонами является не взаимное удаление, а сближение частиц.

Природа двулика. Ей импонирует единство противоположностей и противоположность единств. Две частицы с противоположными зарядами и одинаковыми массами, зеркальные двойники, встречаясь, «выпрыгивая из зеркала», гасят свои заряды и превращаются в кванты того самого поля, которое осуществляет их взаимодействие.

Виртуальное становится реальным

Не очень-то удачное слово выбрали физики для обозначения процессов взаимодействия частиц. «Виртуальный» — ведь это по-латыни означает лишь «воображаемый». Но не стоило бы к этим процессам относиться с недоверием: мол, чистая фантазия физиков! Что-то вроде современного теплорода! Виртуальный вакуум, например, заявляет о себе неожиданно самым реальным способом.

Вспомним электронные переходы в атомах, дающие начало спектрам. Мы говорили, что эти переходы из одного состояния в другое возможны лишь тогда, когда облака вероятности электронов в этих состояниях перекрываются друг с другом в какой-либо области пространства.

Есть в атоме водорода два таких состояния, облака которых совершенно сливаются. Оба они относятся ко второй оболочке, которая начнет заселяться лишь у лития. И есть еще состояние в первой оболочке — самое

низкое по энергии, самое устойчивое состояние, в котором и находится обычно водородный электрон.

Обоим состояниям — на первом и на втором этажах атомного здания — отвечают нигде не перекрывающиеся шарообразные облака. Третье состояние, о котором идет речь, — это неудобная междуэтажная квартира, соединяющая первый и второй этажи.

Но, оказывается, междуэтажной она становится лишь у лития, а в атоме водорода она должна совпадать с квартирой на втором этаже. И тот электронный переход, который мог бы наблюдаться у лития, не должен наблюдаться у водорода: мы уже знаем, что непосредственно между этажами атомные жильцы обычно не прыгают, а предпочитают сначала попасть в междуэтажные квартиры.

Действительно, в атоме водорода никто таких переходов до поры до времени не наблюдал. Если по какой-либо причине жилец, пребывавший на первом этаже, оказывался заброшенным на второй этаж, то он вынужден был тосковать на нем до тех пор, пока ему не выпадал «незаконный» случай вернуться назад (вероятность такого перехода совершенно ничтожна).

Но вот лет пятнадцать назад физики обнаружили, что электрон умудрился нарушить этот весьма строгий запрет и довольно легко со второго этажа махнул на первый! И сделал это так, словно спустился через междуэтажную квартиру, как на лифте.

Объяснение этого правонарушения не заставило себя долго ждать. Физики со своими «фантазиями» оказались подготовленными к нему. Вспомним виртуальный процесс, в котором «настоящий» электрон отталкивал от себя «нерожденные» вакуумные электроны. Тогда казалось, что электрон, наподобие комического персонажа, враждует с собственной тенью.

Так вот, это взаимодействие электрона с пустотой, его «дрожание» сообщает ему дополнительную энергию, вполне реальную, хотя и очень маленькую. Но все же даже этой энергии — ничтожной по сравнению с энергией электрона в атоме — оказалось достаточно, чтобы упомянутые два слившиеся состояния в атоме водорода перестали сливаться. Чтобы электрон мог переходить с одного из этих состояний в другое, со второго этажа в теперь настоящую междуэтажную квартиру, а из нее на первый этаж!

Правда, удалось обнаружить, собственно говоря, лишь переход со второго этажа в междуэтажную квартиру. Но и этого было довольно: остальное, так сказать, совершается автоматически.

Какой же оказалась вакуумная добавка к энергии водородного электрона? Если ее по соотношению Планка перевести в частоту, то она окажется в области не гамма-лучей и даже не видимого света, а в диапазоне... радиоволн, правда высокой частоты.

Поэтому-то замечательное явление и не удалось обнаружить обычными спектральными методами. Зато когда после второй мировой войны были построены радиогенераторы высоких частот и этими радиоволнами облучили

атомы водорода, то они немедленно отрезонировали на частоту, отвечающую вакуумной добавке. В «радиоспектре» водорода на месте этой частоты появился глубокий провал: водородный электрон активно поглощал кванты этой частоты.

Спустя немного времени был открыт и второй вакуумный эффект. Мы уже рассказывали выше одних электронных магнетиках. Один из них был обусловлен движением электрона около атомного ядра, второй был вызван спиновым движением электрона. В магнитном поле эти два магнетика складывались вместе, получался некий единый магнетик определенной величины.

Физики точнейшим образом измерили силу этого магнетика. И оказалось, что ее величина чуть-чуть больше суммы каждого из слагаемых. Опять это чуть-чуть! И опять физикам ничего не осталось, как признать, что эта добавка в величине магнетика вызвана взаимодействием электрона с вакуумом.

И объяснение здесь похоже на предыдущее. Электрон, движущийся в атоме, отталкивает от себя вакуумные электроны как бы на всем своем пути, наподобие того, как неподвижный корабль лишь вытесняет из-под себя воду, а движущийся вызывает, кроме того, еще движение воды. Передача движения от электрона к вакууму и вызывает в нем ток вакуумных электронов. Магнитные действия виртуального тока добавляются к тем, которые отвечают движению «настоящего» электрона.

Квантовая механика, насквозь пропитанная виртуальностями, не только смогла объяснить эти замечательные явления. Она смогла и рассчитать их, а результаты расчетов блестяще совпали с опытом!

Вот и говорите после этого о «фантазиях» физиков! Нет, все-таки к виртуальным процессам нужно относиться с должным уважением...

На охоту за новыми частицами

Как только физикам стала ясна исключительная необычность мира микро-частиц, их взаимоотношений друг с другом и с полем, началась охота за новыми частицами. Ведь каждая новая частица — это новая сторона микромира, это новые открытые его особенности, подвигающие ученых еще на iota вперед в знании.

Для этой цели снаряжались целые охотничьи экспедиции. Они были вооружены наиболее совершенными капканами. Экспедиции в полном смысле этого слова.

Долгое время единственным поставщиком новых частиц были космические лучи — потоки частиц, обильно прибывающих на Землю из мирового пространства. Особенно интенсивными поиски стали после того, как в руках у физиков оказалось очень сильное оружие для поимки новых частиц. С этими приборами физики поднимались на вершины высоких гор, бороз-

дили моря, забрасывали их на ракетах в ближний космос. И охотничьи трофеи стали расти с быстротой, пугавшей даже самих физиков. Каждый год открывалось чуть ли не по десятку новых частиц!

Первыми от этого потока открытий опомнились теоретики. Они забили тревогу: помилуйте, не может быть такого огромного количества разных частиц! Физики-экспериментаторы критически пересмотрели результаты своих опытов... и «новые» частицы стали исчезать одна за другой еще быстрее, чем они возникали. В дальнейшем подобные «миражи» физикам уже почти не являлись.

Но все же трофеи оказались внушительными. Первым из них были пи-мезоны. В начале пятидесятых годов были обнаружены частицы с массами, большими, чем у протона и нейтрона, — гипероны. И, наконец, космические лучи преподнесли физикам особо ценный (почему — станет ясным немного позже) подарок — группу ка-мезонов.

А когда в строй вошли гигантские машины для разгона протонов до близсветовых скоростей, то это быстро привело к открытию еще двух частиц, которые своим появлением еще раз подтвердили правильность предсказаний теории Дирака, — антипротона и антинейтрона.

На сегодняшний день список различных микрочастиц выглядит довольно внушительно. Он насчитывает около тридцати видов частиц, тогда как еще четверть века назад их было известно только четыре. В этом возросшем списке нет ни одной миражной частицы — все они существуют в действительности.

Присмотримся к этому списку. Прежде всего из него видны очень широкие пределы, в которых заключены массы частиц: от массы электрона до двух с половиной тысяч электронных масс у кси-гиперона. При этом частицы распределены по массам совсем не равномерно. Они группируются по двое и по трое в кучки с близкими массами.

Заряды и спины же частиц не обнаруживают даже намека на разнообразие. Заряды частиц могут иметь лишь три значения (+1, 0 и -1, где за -1 принят заряд электрона), спины — тоже только три значения (1, $1/2$ и 0).

Наконец, большинство частиц в этом списке неустойчиво: они живут в среднем от миллионных долей секунды (мю-мезоны) до еще в миллиарды раз меньших промежутков времени (пи-нуль-мезоны). Но эти два времени — своего рода крайности. Средний же срок жизни неустойчивых частиц — от стомиллионных до десятимиллиардных долей секунды.

При этом, конечно, не надо смешивать срок жизни частицы со временем ее существования в нашем мире. Возьмем, к примеру, позитрон. Он действительно устойчив в том смысле, что не распадается на другие частицы. Но жилец в нашем мире он очень недолгий: встретившись с электроном, он, как правило, быстро исчезает. С другой стороны, неустойчивые в свободном виде пи-мезоны не обнаруживают в ядрах и признаков распада.

Класс частиц	Название частиц	Обозначение частиц	Масса частиц (в электронных массах)	Заряд частиц	Спин частиц (в единицах Планка $\hbar/2\pi$)	Устойчивость частиц (или срок жизни в секундах)	Схема распада частиц		
Лептоны (легкие частицы)	Фотон	γ	0	0	1	Устойчив			
	Электрон	e^-	1	-1	1/2		»		
	Позитрон	e^+	1	+1	1/2		»		
	Нейтрино	ν	0	0	1/2		»		
	Антинейтрино	$\bar{\nu}$	0	0	1/2		»		
	Мю-минус-мезон	μ^-	206,7	-1	1/2		$2,2 \cdot 10^{-6}$	$\mu^- \rightarrow e^- + \nu + \bar{\nu}$	
	Мю-плюс-мезон	μ^+	206,7	+1	1/2		$2,2 \cdot 10^{-6}$	$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu + \bar{\nu}$	
Мезоны (средние частицы)	Пи-минус	π^-	273,2	-1	0	$2,5 \cdot 10^{-8}$	$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}$		
	Пи-плюс	π^+	273,2	+1	0	$2,5 \cdot 10^{-8}$	$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu$		
	Пи-нуль	π^0	264,2	0	0	$2,3 \cdot 10^{-16}$	$\pi^0 \rightarrow 2\gamma$		
	Ка-минус	K^-	966,6	-1	0	$1,2 \cdot 10^{-8}$	$K^- \rightarrow 2\pi^- + \pi^+$ или $2\pi^0 + \pi^-$		
	Ка-плюс	K^+	966,6	+1	0	$1,2 \cdot 10^{-8}$	$K^+ \rightarrow 2\pi^+ + \pi^-$ или $2\pi^0 + \pi^+$		
	Ка-нуль	K^0	974,2	0	$0 \left\{ \begin{array}{l} K_1^0 \\ K_2^0 \end{array} \right.$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	$K_1^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$ или $2\pi^0$		
	Анти-ка-нуль	\bar{K}^0	974,2	0	$0 \left\{ \begin{array}{l} K_1^0 \\ K_2^0 \end{array} \right.$	$6,1 \cdot 10^{-8}$	$K_2^0 \rightarrow 3\pi^0$		
Барионы (тяжелые частицы)	Нуклоны (ядерные частицы)	Протон	p	1836,12	+1	1/2	Устойчив		
		Антипротон	\bar{p}	1836,12	-1	1/2		»	
		Нейтрон	n	1838,6	0	1/2		$1,0 \cdot 10^3$	$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$
		Антинейтрон	\bar{n}	1838,6	0	1/2		$1,0 \cdot 10^3$	$\bar{n} \rightarrow \bar{p} + e^+ + \nu$
	Гипероны (большие частицы)	Ламбда-нуль	Λ^0	2182,8	0	1/2	$2,5 \cdot 10^{-10}$	$\Lambda^0 \rightarrow p + \pi^-$ или $n + \pi^0$	
		Анти-ламбда-нуль	$\bar{\Lambda}^0$	2182,8	0	1/2	$2,5 \cdot 10^{-10}$	$\bar{\Lambda} \rightarrow \bar{p} + \pi^+$ или $\bar{n} + \pi^0$	
		Сигма-плюс	Σ^+	2327,7	+1	1/2	$8,1 \cdot 10^{-11}$	$\Sigma^+ \rightarrow n + \pi^+$ или $p + \pi^0$	
		Анти-сигма-плюс	$\bar{\Sigma}^+$	2327,7	-1	1/2	$8,1 \cdot 10^{-11}$	$\bar{\Sigma}^+ \rightarrow \bar{n} + \pi^-$ или $\bar{p} + \pi^0$	
		Сигма-нуль	Σ^0	2331,8	0	1/2	$< 10^{-11}$	$\Sigma^0 \rightarrow \Lambda^0 + \gamma$	
		Анти-сигма-нуль	$\bar{\Sigma}^0$	2331,8	0	1/2	$< 10^{-11}$	$\bar{\Sigma}^0 \rightarrow \bar{\Lambda}^0 + \gamma$	
		Сигма-минус	Σ^-	2340,6	-1	1/2	$1,6 \cdot 10^{-11}$	$\Sigma^- \rightarrow n + \pi^-$	
		Анти-сигма-минус	$\bar{\Sigma}^-$	2340,6	+1	1/2	$1,6 \cdot 10^{-10}$	$\bar{\Sigma}^- \rightarrow \bar{n} + \pi^+$	
		Кси-нуль	Ξ^0	2566	0	1/2?	$1,5 \cdot 10^{-10}$	$\Xi^0 \rightarrow \Lambda^0 + \pi^0$	
		Анти-кси-нуль	$\bar{\Xi}^0$	2566	0	1/2?	$1,5 \cdot 10^{-10}$	$\bar{\Xi}^0 \rightarrow \bar{\Lambda}^0 + \pi^0$	
Кси-минус	Ξ^-	2580,2	-1	1/2?	$1,3 \cdot 10^{-10}$	$\Xi^- \rightarrow \Lambda^0 + \pi^-$			
Анти-кси-минус	$\bar{\Xi}^-$	2580,2	+1	1/2?	$1,3 \cdot 10^{-10}$	$\bar{\Xi}^- \rightarrow \bar{\Lambda}^0 + \pi^+$			

Посмотрим на последний столбец таблицы. Какие частицы наиболее часто обнаруживаются среди продуктов распада их неустойчивых собратьев? Для мезонов и нейтрона ими являются электроны и нейтрино. А среди продуктов распада гиперонов регулярно присутствуют нуклоны и пи-мезоны.

Обработка охотничьих трофеев

Таковы первые, предварительные выводы, которые можно сделать из переписи населения микромира. Теперь надлежит с помощью теории сделать соответствующие выводы об условиях жизни частиц в микромире.

Почему столь широко разнообразие в массах частиц? Вместе с тем имеет ли оно границы, самой ли тяжелой частицей является кси-минус-гиперон? Почему частицы группируются по массам в двойки, тройки или четверки? Почему заряд частиц может иметь только три значения, а спин — два (если не считать фотона)? Почему большинство частиц неустойчиво, а вместе с тем есть и устойчивые частицы? Почему частицы из различных способов распада выбирают только один или два?

Сразу предупредим, что на большинство этих «почему» квантовая механика еще не дала ответа. А там, где ответы есть, они скорее говорят «как», нежели «почему». Что ж, и то хорошо.

Группировка частиц по массам выражена в приведенном списке очень отчетливо. Массы частиц в группе очень близки друг к другу по сравнению с тем широким интервалом, который отделяет одну группу от другой. Для объяснения этого была предложена очень интересная мысль: группа частиц — это на самом деле одна-единственная частица, но живущая как бы в разных обличиях.

Возьмем для примера пи-мезоны. Массы пи-минус- и пи-плюс-мезонов равны друг другу и отличаются от массы третьего, нейтрального электрически пи-нуль-мезона. Может быть, более высокая масса заряженных частиц возникает как раз по причине того, что они имеют заряд?

Выше мы уже говорили, что с полем связана часть массы частиц. Поскольку пи-мезоны — кванты ядерного поля, а оно куда сильнее электромагнитного, то резонно предположить, что основная масса пи-мезонов обязана именно ядерному полю, а добавление к нему электромагнитного поля, связанного с наличием зарядов у частиц, вносит небольшой вклад в их массу. Потому заряженные пи-мезоны оказываются массивнее нейтрального, масса которого, понятно, должна иметь целиком ядерное происхождение.

Понятно также, казалось бы, почему в таком случае легкие частицы не образуют троек. Ядерное поле отличается тем, что его кванты имеют не равную нулю массу покоя, тогда как у квантов электромагнитного поля —

фотонов — таковой нет. Электрон и позитрон, оба мю-мезона имеют явно не ядерное, а электромагнитное происхождение, поэтому среди них нейтральной электрической частицы быть не может. Тем самым остаются две возможности — положительная и отрицательная частицы, то есть двойка.

Но вот для ка-мезонов такое объяснение не подходит. Нейтральные ка-мезоны массивнее заряженных. Здесь — электромагнитное поле словно «вычитается» из ядерного.

Физики поэтому согласны с тем, что приведенное объяснение скорее лишь одна из догадок. Это подтверждается и тем, что среди гиперонов, имеющих ядерное происхождение, нет троек. И на этот счет тоже никакого объяснения сегодня не существует.

Слово за античастицами

До 1955 года в графе «нуклоны» перед физиками фигурировала только пара из протона и нейтрона. Эта пара была совершенно необычной: двойка составлена из заряженной и нейтральной частиц! Загадка казалась разрешенной, когда был открыт отрицательно заряженный антипротон. Вот теперь нормальная тройка, наподобие группы пи-мезонов!

Правда, в ней остается необычность: нейтральный нейтрон оказывается массивнее, а не легче протона и его античастицы. Электромагнитное поле словно «вычитается» из ядерного. Самое, однако, важное в том, что протон и нейтрон оказываются одной и той же частицей, только являющейся в разных видах. Впрочем, о подобном единстве физики догадывались и раньше, когда стало ясным, что обе эти частицы на равных правах превращаются друг в друга в ядре.

Однако спустя год после открытия антипротона был обнаружен антинейтрон. В группе появилась четвертая частица. В нее потребовалось втиснуть антинейтрон, но куда? И описанная выше схема группы рухнула. Остался один вывод: группа нуклонов состоит из двух пар: протона и нейтрона с их античастицами. Но тогда выходит, что протон и нейтрон — все же разные частицы? Вопрос оказывается трудным. Секрет четверки нуклонов нельзя считать окончательно раскрытым по сей день.

На эту группу частиц внешне похожа и четверка ка-мезонов. С ней нам предстоит познакомиться особо. Наконец, можно заметить, что гипероны группируются только парами.

Есть ли какой-нибудь закон, лежащий в основе столь разнообразного построения групп частиц? Наверное, есть. Сегодня он еще не известен. Перепись населения микромира производится, удалось даже выяснить в некоторых случаях распределение его жителей по родам занятий, но окончательные выводы делать еще рано.

А пока попробуем понять, чем отличается частица от своей античастицы. Теория Дирака в ее первоначальном варианте, как мы знаем, говорит: знаком электрического заряда. Это действительно так для электрона и позитрона, протона и антипротона, двух мю-мезонов и вообще для всех заряженных частиц.

Ну, а в чем отличие, скажем, нейтрона от антинейтрона? Оба они не имеют электрического заряда, массы их, как, впрочем, в любой паре из частицы и античастицы, равны. Оказывается, отличие содержится в направлениях спина.

Как, спин можно считать за «антисвойство»? Мы, например, знаем, что электроны в атомах занимают энергетические состояния парами, то есть имеют противоположно направленные спины. Но при этом они ведь оба остаются электронами, ни один из них не переходит в позитрон. Ядерные нейтроны тоже, как мы видели, в оболочечной модели ядра могут занимать энергетические уровни попарно, и при этом также не возникает антинейтронов.

Дело оказывается в другом. То, что спины атомных электронов попарно направлены в противоположные стороны, говорит лишь о том, что электроны движутся сами в противоположные стороны. Если изобразить электроны «облаками вероятности», два противоположных движения, конечно, трудно себе представить. По энергии, в частности, для свободного атома они не различаются. Но вот по отношению к направлению движения спин электрона всегда ориентирован определенным образом. Например, если электрон движется вправо, то можно условно считать, что его спин направлен, скажем, под некоторым углом вверх, а если влево, то вниз. Можно показать, что по мере того как скорость электрона приближается к скорости света, направление его спина все ближе к направлению его движения. У позитрона же спин при движении вправо должен указывать вниз, и наоборот. А у очень быстрого позитрона спин направлен почти точно против направления движения. Именно так надо понимать различие направлений спинов нейтрона и антинейтрона.

«Ну что это за различие!» — может разочарованно сказать читатель. Однако даже такого различия, видимо, достаточно, чтобы при встрече частицы со своей античастицей они обе исчезли, превратились в кванты поля.

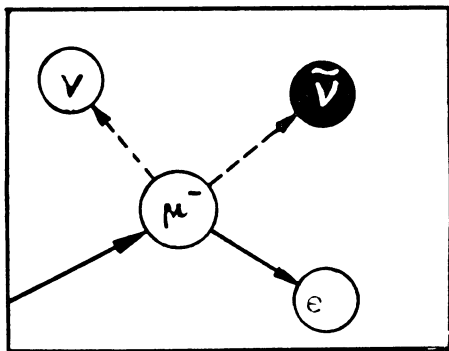
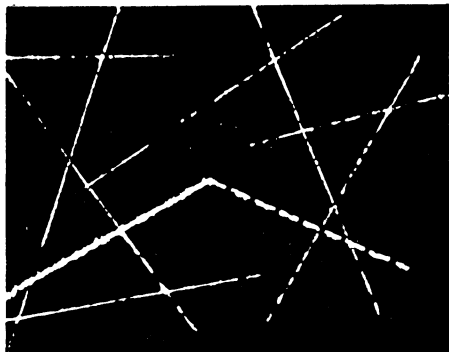
Частицы распадаются

Как рождаются и умирают частицы? В микромире свидетелями таких всегда радостных для науки событий являются фотопластинки.

Вот на пластинке в углу появился толстый след мю-минус-мезона. Не доходя до середины пластинки, след «сломался», стал почти пунктирным. Обломок следа принадлежит уже электрону. В месте излома следа роди-

лись еще две частицы, уносящие с собой остаток энергии и импульса мю-мезона, не переданный электрону. Эти две частицы — нейтрино и антинейтрино.

Пи-мезоны на электроны, как правило, непосредственно не распадаются. Они рождают сначала мю-мезоны. И здесь мы являемся свидетелями того, что ядерное и электромагнитное поля не отделены друг от друга непроходимой стеной. Частица ядерного происхождения превращается в частицу электромагнитной природы.



Почему же пи-мезоны распадаются на две частицы, а мю-мезоны — на три? На это нетрудно ответить. Дело в спинах частиц: сумма спинов дочерних частиц должна всегда равняться спину родительской частицы.

Мю-мезон имеет «половинный» спин, электрон — тоже «половинный». Но, поскольку электрон не может унести с собой всю массу мю-мезона, необходимо еще нейтрино, которое забирает остаток этой массы в виде энергии своего движения. Но спин нейтрино опять же «половинный», так что теперь общий спин рожденных частиц оказывается больше спина родительской частицы. Лишний спин нейтрино требуется «погасить». Так появляется антинейтрино с противоположным направлением спина. Итого — три частицы.

А при распаде пи-мезона достаточно одного нейтрино (или антинейтрино) со спином, направленным против спина рождающегося мю-мезона.

Оба этих спина «гасят» друг друга, давая в сумме нуль, что равно спину исходного пи-мезона.

Если обратиться к гиперонам, то конечным устойчивым продуктом их распада часто является протон. Наряду с этим гипероны испускают и пи-мезоны. Два мира — два предела превращений: электрон у легких частиц, протон — у тяжелых. Два мира — два неизбежных спутника распада: нейтрино у легких частиц, пи-мезоны — у тяжелых.

Пойдемте дальше. Существует ли какой-нибудь закон, который из все-

возможных вариантов распада частицы выбирает только один или в крайнем случае два?

Кое-какие особенности такого отбора мы уже подметили. Назовем их по аналогии с классической физикой законами сохранения. Наблюдения показывают, что при распадах сохраняются суммарный заряд, суммарный спин частицы. Но эти законы все же еще оставляют некоторый произвол в выборе варианта распада.

Следовало отыскать какие-то дополнительные закономерности распада, которые еще более суживали бы путь, по которому могут идти неустойчивые частицы, превращаясь в устойчивые кирпичики вещества — протоны и электроны.

Физики классифицируют взаимодействия

Проведем небольшую аналогию. Сколькими способами можно разрушить гору? Самый сильный и быстрый способ — это, конечно, взрыв; например, при вулканическом извержении. С меньшей силой, более медленно, но все же за достаточно короткое время гору может разрушить землетрясение. И, наконец, самое медленное — это разрушение горы водами, ветром, жарой и холодом. Взрыв может разрушить гору за считанные секунды, землетрясение — за несколько часов, вода и ветер — за многие тысячи лет.

Физики, изучая процессы разрушения микрочастиц, тоже подметили три процесса, идущие с разной силой и скоростью.

Первый из них, самый сильный, происходит при столкновениях ядерных частиц, при взаимодействиях между ними в ядрах. Этот процесс, для которого характерны большие энергии, порядка собственной энергии пи-мезона и выше, и, соответственно, по соотношению неопределенностей, очень короткие времена, физики так и назвали сильным взаимодействием. Характерное для него время мы уже подсчитывали: оно имеет порядок 10^{-23} секунды.

Следующий по силе и длительности процесс — это электромагнитное взаимодействие. Именно в результате этого процесса электрон и позитрон, встречаясь, рождают два гамма-фотона. Сюда же относится и рассмотренный выше распад нейтрального пи-нуль-мезона на гамма-фотоны. Длительность такого процесса — порядка 10^{-17} секунды.

И, наконец, самый слабый и длительный процесс, названный физиками слабым взаимодействием. Именно он ответствен за подавляющее большинство распадов, приведенных в таблице микрочастиц. Вследствие слабого взаимодействия распадаются мю-, пи- и ка-мезоны, нейтрон и гипероны. Длительность этого «универсального» разрушительного взаимодействия, поражающего частицы во всех группах, как видно из таблицы, превышает 10^{-10} секунды.

Изучая группировку частиц, ученые подметили одну интересную особенность. Ка-мезоны и гипероны объединялись в кучки отлично от того, как это делали остальные частицы.

В классификацию частиц, придуманную физиками, эти две группы частиц не желали укладываться. «Странно», — заключили физики, раздосадованные непокорством частиц. И воплотили свою досаду в том, что назвали странными сами частицы. Физики даже ввели специальную величину, которой количественно охарактеризовали степень отклонения свойств этих частиц от тех, какие должны были бы быть. И наименовали эту величину странностью.

Оказалось, что странные частицы не могут распадаться на обычные частицы каким-либо иным процессом, кроме медленного слабого взаимодействия. При столкновениях обычных частиц странные частицы могут рождаться только парами. И притом не любыми парами, а лишь такими, в которых сумма странностей частиц равна нулю, как и у обычных исходных частиц.

Иными словами, при сильных, а также электромагнитных взаимодействиях странность не менялась. Это и назвали законом сохранения странности. При слабых же взаимодействиях этот закон переставал быть справедливым.

«Слишком много законов!» — может посетовать читатель. — А где единый общий закон? Где объяснение всех этих законов? Пора бы уже рассказать о нем!»

Увы! Описанные здесь закономерности еще не имеют сколько-нибудь убедительного объяснения. Физики комбинируют эти правила и так, и этак, но все еще четко не выявляется та глубокая сущность, которая скрыта под ними. «Арифметика» законов сохранения позволила, правда, выполнить ту задачу, с которой мы начали разговор. Все упомянутые правила в совокупности оставляют частицам действительно только один, много два, пути распада.

Занятия физиков здесь пока что напоминают работу мальчишек, когда они устанавливают ограничительные флажки на лыжной трассе. Делается это по указанию инструкторов, но почему решили расставить флажки именно так, а не иначе, мальчишки еще не понимают.

Вот, например, почему «быстрым лыжникам» можно прокладывать короткую прямую трассу, а «медленным странным» нужно ставить так много запретительных флажков? Или почему странным ка-мезонам надо прокладывать две трассы, тогда как прочим «лыжникам», как правило, достаточно и одной?

Об этом мы сейчас и поговорим. Изучение распадов ка-мезонов позволило сделать самое крупное открытие в физике микрочастиц после обнаружения вакуумных эффектов. Речь пойдет о двух словах, которые облетели страницы многих журналов мира и, вероятно, известны вам: «несохранение четности».

Загадка ка-мезонов

Ка-мезоны были впервые обнаружены в космических лучах немногим более десяти лет назад. Среди огромного количества самых разнообразных следов, оставленных космическими частицами на фотопластинках, зоркие глаза физиков смогли разглядеть следы неизвестных частиц с массами, примерно в тысячу раз превышающими массу электрона.

Выяснилось, что существуют три вида ка-мезонов: положительный, отрицательный и нейтральный. Был определен и спин ка-мезонов — он оказался равным нулю. Первое время казалось, что семейство ка-мезонов ни в чем, кроме масс частиц, не отличается от более легкого семейства пи-мезонов: тоже нулевой спин, тоже тройка частиц, только вот нейтральные ка-мезоны были тяжелее, а не легче своих собратьев.

Физики пронаблюдали за следами, оставляемыми ка-мезонами на фотопластинках. Заряженные частицы создавали обыкновенные следы, часто обрывающиеся. В местах обрыва возникали более тонкие следы. Ученые знали, что это означает: ка-мезоны распадались на более легкие частицы. Изучение этих вторичных следов показало, что они принадлежат пи-мезонам.

Такому же исследованию, только более трудоемкому, подверглись события распада нейтральных ка-мезонов. И тут физиков подстерегала неожиданность. Из точки, отвечающей концу пробега ка-мезона, в одних случаях тянулись два, а в других — три следа. Все эти следы, как и ранее, принадлежали пи-мезонам.

Нейтральные ка-мезоны, таким образом, иногда распадались на три, а иногда — на два пи-мезона. Между тем как все другие частицы распадались на одни и те же дочерние частицы всегда одним-единственным способом.

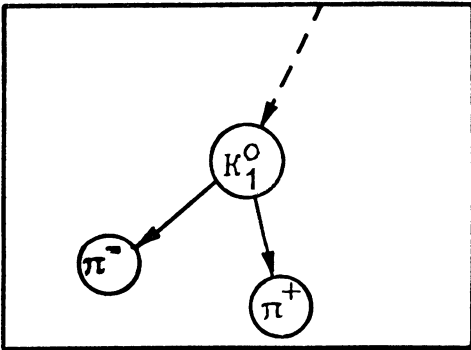
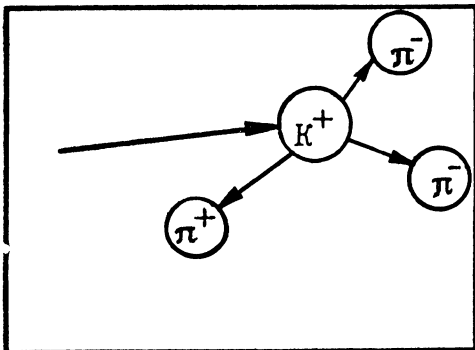
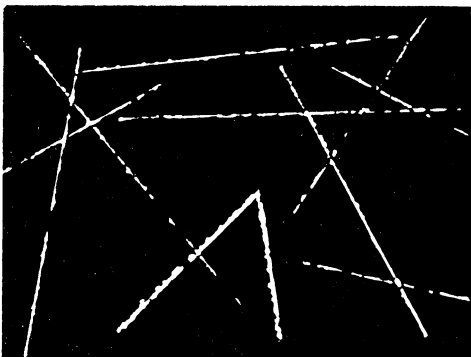
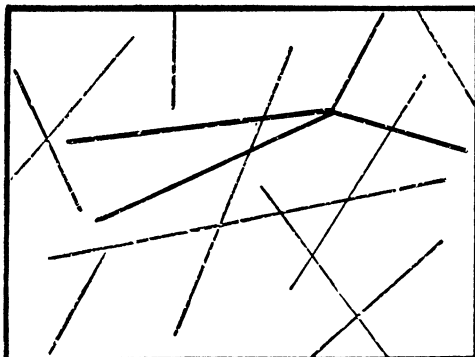
Уверенность физиков в том, что иначе быть не может, привела к тому, что они решили ввести два различных нейтральных ка-мезона. Один из них получил название тау-мезона, другой — тета-мезона. Два разных мезона — два разных способа распада. Кажется, все стало на место.

Однако спокойствия физики не обрели. Тщательнейшие измерения неизменно указывали на то, что тау-мезон и тета-мезон имеют совершенно одинаковые массы. Во всей таблице частиц это всегда означало одно: та и другая — одинаковые частицы. Но не может одна и та же частица распадаться и на две, и на три одинаковые дочерние частицы!

Так в начале пятидесятых годов ка-мезон приобрел репутацию самой загадочной частицы в физике. Возникла знаменитая загадка «тау-тета».

А что, собственно, в этом загадочного? Почему ка-мезон не может распадаться так, как описано выше? Закон сохранения энергии ему этого не запрещает, законы сохранения импульса и спина — тоже.

Однако запрет все же существует. Он выражается законом, о котором



мы не упоминали до сих пор: не было нужды. Теперь она появилась. Этот запрет, установленный квантовой механикой, носит название закона сохранения четности.

Отличается ли левое от правого?

Вспомним испускание фотонов возбужденными атомами. Электрон находился в одном состоянии, а затем перескочил в другое, с меньшей энергией. Мы тогда интересовались одной лишь энергией, а также тем, перекрываются ли «облака вероятности» начального и конечного состояний электрона.

Оказывается, что это перекрывание самым существенным образом связано с четностью. Если бы можно было перенумеровать квартиры в атоме, то выяснилось бы, что при каждом переселении атомные жильцы могут менять номер своей квартиры только с четного на нечетный и наоборот. Пе-

реехать, скажем, из десятой квартиры в восьмую электрон за один прием не может.

Это правило, установленное на опыте еще в 1924 году, затем было осмыслено квантовой механикой. Для этой цели физики ввели понятие четности волновой функции. А отсюда понятие четности было перенесено и на само состояние, описываемое волновой функцией.

Что такое волновая функция, мы знаем: это — решение уравнения Шредингера. О четности же нужно поговорить подробнее.

Как часто, рассматривая собственную фотографию, вы огорченно замечаете: «Ну, вот, совсем непохоже» — и, конечно, обвиняете неудачливого фотографа. И нередко — напрасно.

Мы можем взглянуть на себя со стороны с помощью зеркала. Но вопреки поговорке зеркало не дает точного изображения того, что есть на самом деле. Если ваш нос чуть-чуть скошен вправо, то в зеркале он будет скошен влево. Правое и левое в зеркале всегда меняются местами.

Когда вас фотографируют, то на лицевой стороне пленки получается ваше зеркальное изображение. Но этим дело не кончается. Пленку предстоит еще проявить, с негатива сделать позитив, то есть по существу еще раз отразить вас в зеркале. Иногда при съемке позитива негатив перевертывается, так что всего получается уже три зеркальных отражения. Но иногда негатив остается в том же положении, что и при съемке, и тогда таких отражений только два.

Со стороны вы всегда выглядите как в зеркале. А вот фотография может сделать вас таким, какой вы есть не в глазах людей, а так сказать, на самом деле.

Фотографическое и зеркальное изображения всегда совпадали бы лишь в идеальном случае — у человека с абсолютно симметричным лицом. Но это — чрезвычайная редкость. Природа очень любит холодный порядок симметрии, но никогда не отказывает себе в удовольствии разнообразить глаз, нарушая ее.

И вот что существенно: двойное отражение, вне зависимости от того, есть ли симметрия или ее нет, всегда восстанавливает первоначальную форму предмета. Как бы: минус на минус дает плюс и плюс на плюс тоже дает плюс. При двукратном отражении в зеркале все «минусы» вашего облика (асимметрия) не искажают изображения.

Волновые функции обладают теми же особенностями. Эти функции — обычные математические функции, среди которых очень часто встречаются синус и косинус. Нарисуйте их на бумаге и поднесите к зеркалу. Вы увидите, что синус «по ту сторону» перевернулся, стал вверх ногами. Что ж, это не новость: еще из школьного курса тригонометрии известно, что синус отрицательного угла равен синусу положительного, но с обратным знаком.

Наше зеркало как бы продолжает ось углов в сторону их отрицательных

начений.) А вот косинус в зеркале не изменит своего облика. Это подтверждает и тригонометрия.

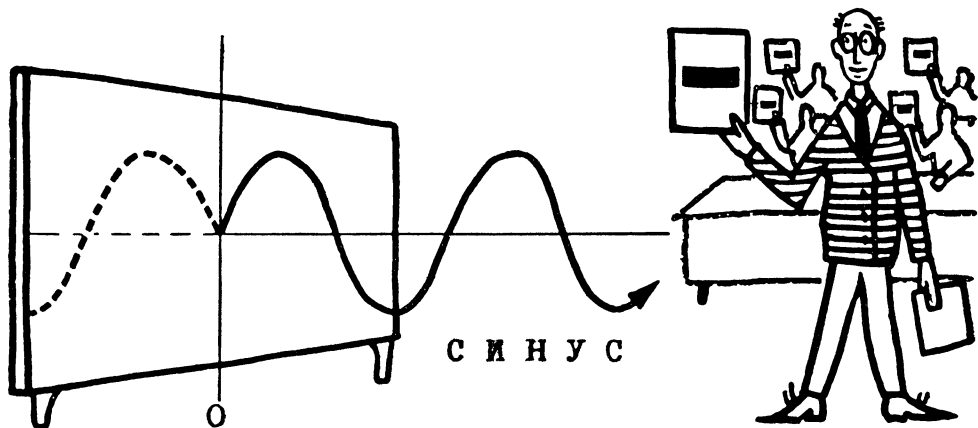
Математики назвали косинус четной, а синус — нечетной функцией. Отражение в зеркале они тоже наименовали по-ученому: пространственная инверсия. Чтобы отличить четные функции от нечетных, им приписали условные знаки: первым плюс «за хорошее поведение», а вторым — минус.

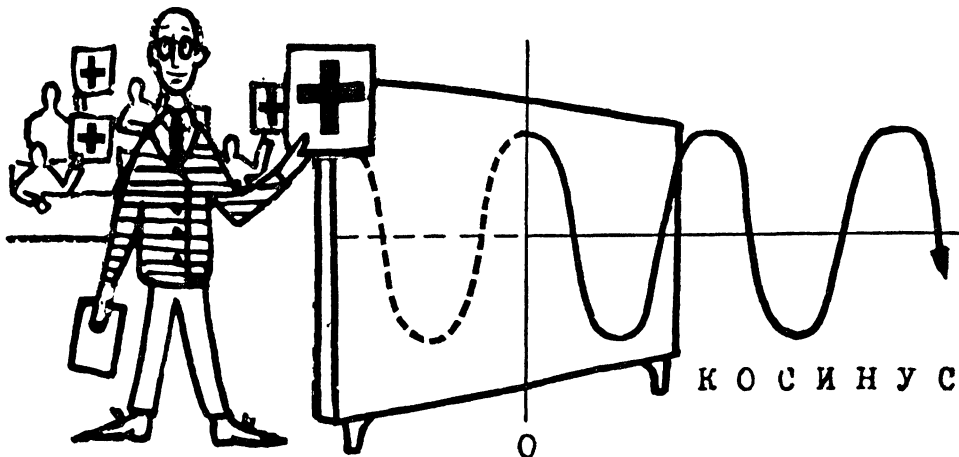
Если синус, отраженный в зеркале, рассмотреть еще в одном зеркале, то он восстановит свою форму. Действительно, «минус на минус есть плюс». С косинусом, понятно, и на сей раз ничего не случится.

Исследование решений уравнения Шредингера для атомных электронов показало, что их четность ни при каких условиях не изменяется. Если волновая функция электрона была вначале четной, а после его прыжка в другое состояние стала нечетной, то это означает лишь одно — нечетна волновая функция рожденного в этом прыжке фотона.

Со временем понятие четности было перенесено с атомных состояний на отдельные частицы. Началось с фотона, а потом наклеили ярлыки и на другие частицы. Электрон, например, оказался нечетной частицей.

Выше мы уже говорили, что спин электрона вполне определенным образом ориентирован относительно направления его движения. Например, если электрон движется вправо, то его спин смотрит вверх, если влево — вниз. Но попробуем — конечно, мысленно — отразить электрон в зеркале. Мы увидим, что при движении электрона вправо (в зеркале — влево) спин его в зеркале по-прежнему глядит вверх. Ведь зеркало только меняет правое на левое, но не переворачивает изображения. Зеркальный электрон имеет несуществующее у нормального электрона направление спина. Значит, электрон — явно нечетная частица. Будь он четным, он был бы в зеркале таким же, как и в действительности.





Пи-мезон является нечетной частицей.

Распространяя свою классификацию по четностям на неустойчивые частицы, физики по аналогии с испусканием фотона электроном установили, что четность исходной частицы обязательно должна быть равна произведению четностей всех тех частиц, которые образуются из нее при распаде. Что ж, до сих пор частицы никогда не нарушали этого установления, которое называлось законом сохранения четности.

И вот— нейтральный ка-мезон! Судя по тому, что он распадается на два пи-мезона,— это частица четная (минус на минус дает плюс). А распад его на три пи-мезона говорит о том, что это частица нечетная (минус на минус на минус дает минус). Какая же она на самом деле — четная или нечетная?

Ясно, что это одна, а не две частицы: уж слишком тесно совпадают массы тау- и тета-мезонов. Но тогда выходит, что этот ка-мезон — частица «двучетная»! Нет, нет, такого нельзя никак допустить! Все равно, что кривое зеркало одновременно считать правильным!

В тяжелое положение поставил квантовую механику ка-мезон!

Выход найден — и какой удивительный!

Как же быть? Признать, что четность при распаде нейтральных ка-мезонов нарушается? Но это означает, что природа пользуется кривым зеркалом! В этом зеркале левое отличается от правого, само пространство оказывается не симметричным! Ужасный вывод!

Физика за долгие годы своего существования привыкла к тому, что в

пространстве все направления абсолютно равноправны. Движение влево при одних и тех же условиях ничем не может отличаться от движения вправо. И это действительно так. На равноправие направлений — так называемую изотропность пространства — указывают все законы физики.

Признать, что этого нет,— значило отказаться от основных, фундаментальных законов физики, поставить ее вверх дном. Было от чего ужаснуться!

Однако молодые физики Ли и Янг нашли другой замечательный выход из этого трудного положения. Они смело заявили: да, четность в распадах ка-мезонов, как и вообще при любых слабых взаимодействиях (которые и вызывают распады мезонов и бета-распад нейтронов ядер) может нарушаться!

Ли и Янг указали на опыты, которые совершенно недвусмысленно должны были установить поразительное явление. Эти опыты стоят того, чтобы их описать.

Расчет показывал, что если четность в самом деле нарушается, то при бета-распаде ядер из них электроны должны вылетать преимущественно в том направлении, на которое указывает спин ядра. В обычных условиях, однако, ядра ориентируют свои спины как угодно, и электроны вылетают из них по всем направлениям.

Поэтому прежде всего потребовалось выстроить ядра так, чтобы все их спины смотрели в одном направлении, и сохранить эту стойку ядер по команде «смирно» на все время опыта. Для этого кусок бета-радиоактивного вещества поместили в сильное магнитное поле, которое и выстроило спиновые магнитики ядер. А чтобы тепловое движение ядер не сбивало их строя, вещество охладили до очень низкой температуры — всего лишь на пять сотых градуса выше абсолютного нуля.

Затем вокруг этой установки расположили счетчики электронов — под небольшим углом к направлению спинов ядер и в «зеркальном» ему направлении. Включили счетчики и начали измерять их отсчеты. И быстро обнаружилось, что счетчики в прямом направлении считали гораздо меньше электронов, чем счетчики в «зеркальном» направлении. Предсказания Ли и Янга сбылись.

Значит, все-таки пространство — кривое зеркало природы? Значит, основные законы физики летят вверх тормашками? И тут Ли и Янг и независимо от них выдающийся советский физик Л. Д. Ландау сделали решающий шаг. Нет, пространство тут ни при чем. Все дело в самих частицах.

Помните, мы отразили электрон в зеркале и получили несуществующий электрон с обратным направлением спина? Так вот, эта частица существует, но для этого нужно «отразить» и ее электрический заряд, поменять его на обратный. И возникает точное отражение электрона — известный нам позитрон!

У природы не кривое, а правильное зеркало! Но оно как бы двойное:

при отражении в нем частицы всегда получается ее античастица! У электрона появляется позитрон, а у нейтрального ка-мезона, вызвавшего такой переполох, тоже нейтральный... но анти-ка-мезон!

Те нейтральные ка-мезоны, которые наблюдались на опыте, оказываются смесью двух: ка-нуль-мезона и его античастицы. Но ка-нуль-мезон нечетен, а его античастица четна. Вот в чем разгадка «тау-тета»!

Открытие этого двойного отражения, называемого научно «комбинированной инверсией», принадлежит тем же Ли и Янгу. Честь этого открытия разделил с ними независимо пришедший к тому же выводу Л. Д. Ландау.

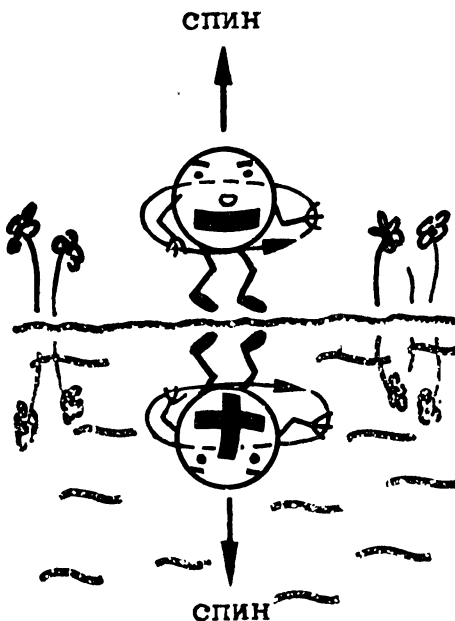
Так окончательно и неизбежно устанавливается, что спин частицы может только определенным образом ориентироваться относительно направления ее движения, причем противоположным тому, что имеет место у ее античастицы. Если на минутку допустить, что спин есть проявление «собственного вращения» частицы, то это выглядит так. Нанесем мысленно «метку» на «поверхность» электрона и проследим за ней при движении электрона, например с помощью «скоростной микросъемки». Мы увидим, что метка описывает спираль, причем в случае электрона эта спираль закручивается вправо. А вот метка позитрона опишет левую спираль.

В различии «спиральности» и состоит в конечном счете отличие частиц от их античастиц. Разумеется, понятия правого и левого так же относительны, как понятия положительного и отрицательного. Условно частицам можно приписать правую «спиральность», а античастицам — левую.

Мир и антимир

Мы как-то уже говорили, что в нашем близком мире позитроны — редкие гости. Из этого, в частности, можно заключить, что мир частиц несимметричен: правая спиральность в нем встречается гораздо чаще, чем левая.

Что ж, этому не надо удивляться. Достаточно взглянуть на наш мир



больших вещей. Улитка чаще имеет левую «спиральность»: ее раковина закручена в левую сторону. В химии известны так называемые стереоизомерные молекулы, являющиеся зеркальными изображениями одна другой. И среди них чаще встречаются то правые, то левые изомеры. Наконец, у людей сердце чаще всего находится слева, а «зеркальные» люди с противоположным расположением внутренних органов, хотя и встречаются, но все же большая редкость. Иногда попадаются и левши, но чаще всего у людей правая рука сильнее левой.

Поэтому не должна вызвать удивления мысль, что в еще большем мире космоса могут существовать и антимир, в которых все наоборот. Там в антиатомах возле антиядер, составленных из антипротонов и антинейтронов, движутся позитроны. Там живые организмы, если они существуют и похожи на наши, должны быть зеркальными изображениями земных организмов.

Законы антимира ничем не должны отличаться от законов нашего мира, если оба мира существуют в одинаковых условиях. Но только все они будут, если можно так выразиться, с обратным знаком. Поэтому, даже если такой антимир был бы у нас под ногами, мы не смогли бы и догадаться о его существовании.

Единственное, о чем можно было бы узнать, — это о границе между обычным миром и антимиром. На этой границе встречаются гости из обоих миров. Нет более враждебных встреч на свете, чем эти. Обитатель нашего мира, даже преисполненный дружелюбия к антимир, был бы встречен там всегда одинаково: нацело превращен в энергичные гамма-фотоны, разлетающиеся со скоростью света во всех направлениях от места встречи. Фотоны и опоясывают границу двух миров, указывая грозный рубеж на пути каждой частицы, осмелившейся проникнуть в противоположный мир. Такого рубежа в нашей солнечной (и, может быть, более широкой звездной) системе ученые пока не обнаружили.

Что происходит внутри частиц?

Начнем с вопроса, который мы уже не раз упоминали, но ответ на который все откладывали: каковы точные размеры микрочастиц? Имеют ли вообще эти частицы точные размеры?

«Что за вопрос? — мог бы сказать неискушенный читатель. — Все предметы на свете имеют размеры».

Однако читателю этой книги такой ответ уже не покажется вполне очевидным.

Физики в течение долгого времени были вынуждены вообще отказываться от рассмотрения этого вопроса по существу. Отчасти это не позволял делать сам математический аппарат квантовой механики, немедленно приходивший в негодность, как только частицы наделялись размерами. А с другой стороны, как мы уже видели, измерить размеры частиц нет ни-

какой возможности: не позволяют волновые свойства, «размазывающие» частицы по пространству.

Эти волновые свойства есть «внешнее» проявление взаимосвязи частиц с их полями. Иными словами, электрон «размазывается» благодаря его взаимодействию с другими частицами, в том числе и электронами.

Как физики сегодня представляют это взаимодействие, нам уже известно. Электрон виртуально испускает фотоны, которые взаимодействуют с фотонами, испущенными другими частицами. В результате возникает либо взаимное отталкивание, либо притяжение частиц. Электрон словно укутан в облако виртуальных фотонов, которые он испускает и вновь поглощает. Это облако беспредельно: всегда найдутся столь малознергичные фотоны, что соотношение Гейзенберга позволит им сколь угодно далеко уйти от испустившего их электрона. Фотонное облако, «размазывающее» электрон по всему пространству, и не позволяет говорить о его точных размерах.

Но все же оно быстро сгущается по мере приближения к «остову» облака. На расстояниях, где виртуальные фотоны имеют уже достаточную энергию для образования пар электрон—позитрон (оно порядка 10^{-11} сантиметра), перед нами возникает картина «дрожащего» электрона. И опять нельзя с точностью установить его размеры, по-прежнему электрон «размазан», хотя и по сравнительно маленькой области пространства.

Может быть, удалось бы измерить точно размеры «голового» электрона, освобожденного от фотонных и электрон-позитронных облаков? Нет — это напрасная задача. «Голого», иначе говоря, ни с чем не взаимодействующего электрона в природе нигде и никогда не найти. Он не может существовать ни при каких условиях. Сама частица и ее взаимодействия — это двуединая и притом неразрывная сущность!

Единственное, что можно допустить, — то, что внутри всех облаков существует некая сердцевина, керна, как ее называют физики. Но как выглядит керна и тем более — что происходит внутри него — ничего определенного сегодня сказать еще нельзя.

Аналогичным образом физики пытаются изобразить структуру другой фундаментальной частицы — протона. Протон виртуально испускает пи-мезоны, энергия которых, понятно, не может быть меньше их энергии покоя. Поэтому продолжительность жизни пи-мезонов очень невелика. А значит, невелико и расстояние, на которое они могут уйти от породившего их протона.

Действительно, как мы помним, размеры пи-мезонного облака вокруг протона очень малы — порядка 10^{-13} сантиметра. В отличие от электрона протон «размазан» пи-мезонами очень незначительно. Но известно, что протоны довольно активно взаимодействуют и с ка-мезонами. Поэтому у протона должно появиться еще одно виртуальное облако, отвечающее этому взаимодействию, — ка-мезонное. Поскольку энергия покоя ка-мезона в три с лишним раза больше таковой для пи-мезона, то ка-мезонное облако

должно иметь во столько же раз меньшие размеры и должно располагаться внутри пи-мезонного облака. Еще глубже должен быть сосредоточен «дрожжащий» протон, виртуально распадающийся на пары из протона и антипротона.

Физика приходит, таким образом, к поразительному, но неизбежному выводу, что структура частиц микромира является отражением всех их взаимодействий с другими частицами. Сущность микрочастиц оказывается очень подвижной и текучей.

Этот вывод утрачивает свою удивительность, если понять, что частиц без взаимодействий вообще не существует. Все микрочастицы связаны взаимодействиями друг с другом. Возможность этого взаимодействия не навязывается частицам откуда-то извне, а заложена природой в самой структуре частиц.

Да, структура частицы в каждый момент определяется всеми ее реально существующими взаимодействиями. И обратно, характер и степень взаимодействий определяются структурой частиц. В этом и состоит диалектическое единство вещества и поля, собственных свойств и взаимодействий, нерасторжимая общность ничтожной микрочастицы и всей Вселенной!

Старый груз тянет назад

Всегдашняя и повсеместная связанность, взаимная обусловленность вещества и поля поставила перед физиками задачу понять ее и выработать в соответствии с этим новые представления о веществе и поле. Здесь уже оказывается несколько консервативной сама квантовая механика с ее сложившимися представлениями, о которых мы рассказывали в этой книге.

Когда возникла квантовая механика, она унаследовала от своей предшественницы — классической физики — все ее понятия, применявшиеся той при подходе к явлениям в обычном мире, и перенесла эти понятия в мир сверхмалых вещей. Уравнение Шредингера было построено по типу классического волнового уравнения, только описывало не обычные волны, а «волны вероятности», которые выражали собой закон движения микрочастиц в пространстве и времени. Поначалу физики были вполне удовлетворены: этим законам движения микрочастицы охотно подчинялись.

Правда, на первых же порах квантовой механики обнаружилось, что тащить старые понятия в новую физику — дело не очень благодарное. Соотношения неопределенностей ясно показывали, что прежние понятия точного местоположения и скорости, энергии частиц и времени в микромире могли иметь лишь ограниченную область применимости.

Это полуудовлетворительное положение становилось совсем уже неудовлетворительным, когда микрочастицы набирали энергию, достаточную для начала их взаимных превращений. Описанный метод установления законов движения частиц в пространстве и времени здесь вообще давал осечку.

В самом деле: была одна частица, стала совершенно другая или другие, или же вместо частиц появились фотоны. Понятно, что описание с помощью прежней волновой функции не могло учесть самого факта этого превращения. Согласно квантовой механике, оно должно было совершаться в одной точке пространства и мгновенно. В результате рождаются другая частица или фотон, для которых прежняя волновая функция уже недействительна.

Как в таком случае поступала квантовая механика? Она «сшивала» в точке превращения оба закона движения, старый и новый, пользуясь при этом не раз уже упоминавшимися законами сохранения энергии и импульса.

Но сам процесс превращения при таком подходе совершенно выпадал из рассмотрения! Во-первых, потому, что совершается он в одной «точке» пространства и одной «точке» времени, так что в момент превращения частица не движется в обычном смысле этого слова. Во-вторых, потому, что исчезает частица одного вида, а появляется частица другого вида; уравнения движения же относятся всегда к одной, неизменного вида, частице.

Значит, обычный классический, взятый в квантовую механику подход к явлениям в мире сверхмалых вещей с помощью понятий пространства и времени оказывался явно недостаточным. Он не отражал основной сущности этого мира — взаимных превращений частиц друг в друга и в кванты поля, а также обратных превращений квантов в частицы вещества. На повестку дня встал вопрос о выяснении самого хода превращений. Но для этого необходимо было в корне изменить сам способ их описания.

Квантовая механика сделала это, введя упоминавшиеся уже виртуальные процессы. Но и они не дают полного решения задачи. Требуется более глубокий подход, в котором классические представления о пространстве и времени должны быть, видимо, существенно изменены.

Оборотная сторона очевидности

Как же начать это новое огромное дело? Отказаться от самих понятий пространства и времени, как это предлагалось некоторыми учеными?

Нет, такой отказ сразу бы поставил физику в очень тяжелое положение. Прежде всего потому, что существующие представления о микромире, несмотря на всю их необычность, все же основаны на привычных понятиях о пространстве и времени. От этих понятий, впитываемых человеком буквально с первого дня рождения, отказаться даже самому свободному уму необычайно трудно. С другой стороны, описание явлений в микромире, не сопровождающихся превращениями частиц, все равно требует введения понятий пространства и времени, очень удобных для такого описания.

Есть и другой путь, гораздо более реалистичный: еще раз пересмотреть наши представления о пространстве и времени. Впервые это сделал Эйнштейн полвека назад. Ныне предстоит дополнить представления Эйнштейн-

на, относящиеся к большому миру, теми особенностями, которые присущи миру сверхмалому.

В чем же состоит истинная сущность пространства и времени? Мы сжились с этими понятиями настолько тесно, что даже не задумываемся над их смыслом. Обыденное представление говорит нам, что пространство — это вместилище тел. И не больше? Вдумаемся на минуту, откуда, собственно говоря, возникает у нас представление о пространстве. С момента рождения человек начинает ориентироваться не в «чистом» пространстве, а между телами в нем. Тела же воспринимаются зрением.

Предметы кажутся нам тем более близкими, чем большее поле зрения в глазу они занимают. Но это ведь не что иное, как большее число фотонов, испущенных телом и попадающих в глаз. Иными словами, предмет нам кажется тем ближе, чем сильнее в глазу создаваемое предметом электромагнитное поле. И наоборот, немногочисленные фотоны, попадающие в глаз, говорят нам о том, что предмет либо мал (значит, в нем мало атомов, испускающих фотоны), либо далек (мало фотонов из общего их числа достигает глаза).

Если бы нам представилось от рождения познавать мир только глазами, то мы никогда бы не смогли различить между близким маленьким и далеким, но большим предметом. Так, например, на глазок, без дополнительных умозаключений, не определить, сколь далеки от нас предметы и какие размеры они имеют. Однако нам помогает осязание. Ощупывая предметы, мы узнаём их величину (тоже относительную—в сравнении с величиной нас самих).

Не было бы предметов — не было бы и никакого представления о пространстве. Не случайно ночью, когда не видно предметов, теряется и впечатление пространства.

Наши органы чувств, на основе «показаний» которых вырабатываются представления об окружающем большом мире,— это те же приборы. По своей чувствительности они вполне могут регистрировать и квантовые события. Но мир устроен так, что регистрируются ими одновременно многие миллиарды таких событий. Так что в целом наши ощущения (и представления) оказываются «усредненными» (как говорят физики,— классически). Необычность квантовых законов обнаруживается тогда, когда эти события начинают изучаться поодиночке.

Вещественное происхождение имеет в наших головах не только понятие пространства. Если бы мы оказались среди вещей, в которых ничего бы не менялось (на Земле в такое положение, пожалуй, можно попасть лишь в глубоком подземелье; будущим же космонавтам предстоит годами лететь в областях космоса, удаленных от небесных тел, так что при не очень больших скоростях полета картина неба не изменится ощутимо за долгие годы), то мы бы потеряли всякое представление и о времени.

Мы уже говорили, что в принципе существуют два времени: «свое», определяемое физическими (и химическими) процессами в данном теле, и

«общее», определяемое большими коллективами тел. В результате как не существует не связанного с телами пространства, так не существует и не связанного с событиями времени.

Ход времени определяется событиями, тесным сцеплением причин и следствий. Чем активнее развиваются события, чем быстрее следуют они друг за другом, иными словами, чем интенсивнее взаимодействия в какой-либо системе тел, тем, кажется, «быстрее» в ней движется время.

Мы уже говорили, что такое заключение оправдывается и на нашем собственном опыте. День, заполненный событиями, «пролетает», день спокойный «тянется». Под этой субъективностью впечатления о времени таится глубокое объективное основание.

Кванты — всюду и всегда

Новые представления о пространстве и времени, рассказом о которых мы закончим эту главу, еще не являются признанными всеми физиками. Более того, новые представления еще не получили подтверждения на опыте.

Они возникли уже около тридцати лет назад, но еще не имеют прав гражданства. Однако многие ученые считают, что в них заключена некоторая доля истины.

Основное положение о связи пространства и времени с существованием тел и их движением может в микромире выглядеть примерно так: поскольку сами микрочастицы и их движение обладают квантовыми свойствами, то должны быть квантованными сами пространство и время.

А раз так, то должны рушиться последние остатки классических представлений. Пространство и время теряют непрерывность, разбиваются на отдельные «порции»!

Как понять это? А так, что должны существовать своеобразные «ячейки», кванты пространства и времени. Размеры их должны определяться, видимо, массами, энергиями, импульсами (и, возможно, другими характеристиками) микрочастиц. Величина этих ячеек, понятно, должна быть наименьшей из всех возможных.

Однако до сих пор эти «элементарная длина» и «элементарный интервал времени» еще не обнаружены. Это может говорить о том, что они лежат за пределами чувствительности самых тонких современных методов оценки длин и времен в микромире. Предел этих методов — длины порядка радиуса действия ядерных сил — 10^{-13} сантиметра и времена порядка «ядерного времени» — 10^{-23} секунды. Некоторые ученые полагают, что «квант длины», если он существует, должен иметь величину, еще в сотни или тысячи раз меньшую.

Да, очень интересные представления! Понятно поэтому, что мы не замечаем никогда и нигде существования квантов пространства и времени. Они слишком малы. Ни одним хронометром не измерить промежутки вре-

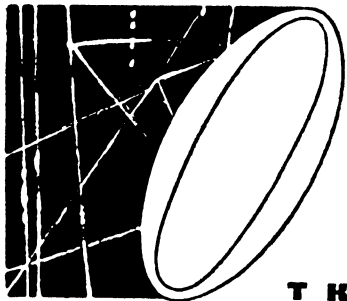
мени в триллион-триллионные доли секунды. Никаким микрометром не измерить длины в миллиард-миллиардные доли сантиметра!

И даже если на минуту вообразить, что мы обладаем столь сверхточными приборами, то все равно ни одно такое измерение нам бы не удалось. Вспомним, как грубо вмешиваются приборы в жизнь микромира. Вспомним, наконец, что наши классические понятия о длинах и временах в микромире ограничены, справедливы лишь до определенных пределов. Эти пределы ставятся двойственным вещественно-полевым обликом микрочастиц. И эти же пределы — те самые кванты пространства и времени, о которых мы только что говорили!

Тогда какой же смысл вводить все эти ячейки, кванты времени? Ведь в этих понятиях все равно живут отголоски наших обыденных представлений о пространстве и времени!

Это действительно так. Но мы уж не раз подчеркивали, что каждый новый пласт знания возводится не в пустоте, а на фундаменте предшествующих ему пластов. Предельно трудный процесс выработки новых представлений совершается не мгновенно, а очень медленно, всегда новые понятия несут на себе родимые пятна их предшественников. И рождение новых понятий всегда происходит с превеликим скрипом.

Этот скрип был явственно слышен и в первые годы жизни квантовой механики. Еще более ощутим он сейчас, когда квантовой механике предстоит взять новые высочайшие вершины на своем пути. Победить или погибнуть, уступив место новой, еще более мощной теории!



Т квантовой механики — к ...?

Неопределимые определенности

Масса, заряд, спин, четность... Попробуйте дать точное определение каждой этой характеристике частиц! Причем определение самостоятельное, не выражая одну величину через другую, например массу — через силу веса, а заряд — через силу притяжения и отталкивания.

С полной уверенностью можно сказать, что ничего из этого не получится. Мы очень часто пользуемся этими понятиями, но каков их «глубинный» смысл, сегодня не знает ни один физик.

Такое положение характерно для современной квантовой механики. Она широко пользуется понятиями массы, заряда и другими, заимствованными ею еще из классической физики. Квантовая механика открыла и новые характеристики частиц, например спин, четность. Но о происхождении этих характеристик она может сказать не больше, чем о происхождении массы и заряда.

В самом деле, что такое, скажем, масса? Существуют два ответа. Первый из них: масса — это мера количества вещества в каком-либо теле. Ее можно понимать, как количество атомных ядер (именно в них сосредоточена практически вся масса атомов) в данном объеме вещества. Массу ядра в свою очередь можно представить себе, как количество ядерных частиц — протонов и нейтронов — в нем.

Но что в таком случае разуметь под массой самого протона? Меру количества вещества в нем, как и раньше? Какую меру? Какого вещества? Само понятие меры означает, что что-то можно раздробить на еще меньшие доли

и брать их в одном случае побольше, а в другом — поменьше. Но ведь протон, видимо, вовсе неделим. А о том, что за вещество заключено в протоне, пока можно только гадать.

То, что мы говорим: протон имеет массу примерно 10^{-24} грамма, означает лишь, что в 1 грамме вещества содержится примерно 10^{24} протонов — и ничего больше. Значит, определение массы как меры вещества для протонов, да и для других микрочастиц не имеет большого смысла.

Второе определение массы гласит, что масса — это мера инерции тела, иными словами, мера сопротивления тела изменению его состояния. В простейшем случае масса определяет сопротивление тела изменению его положения в пространстве.

Тогда, может быть, понимать массу протона как меру той «неохотности», с которой он приходит в движение под действием сил со стороны других частиц? И это определение неудовлетворительно. Силы есть проявление взаимодействия, то есть в конечном счете поля. Убыстряя свое движение, протон всегда приобретает от поля добавочную массу, замедляя, — отдает эту массу полю. Как бы ни малы были эти добавки и потери массы, они принципиально всегда существуют. В результате масса всегда переменна, а значит, теряет свойство определенной меры.

Выходит, что в микромире саму массу нужно чем-то мерить. В нашем примере масса протона согласно соотношениям теории относительности определяется массой покоя протона и отношением скорости его движения к скорости света.

У нас появляется проблеск надежды. Масса покоя — действительно неизменная величина для данного рода частиц. Ее можно изменить, только изменив саму частицу. Не вытекает ли отсюда, что масса покоя — это тоже мера инертности? Но уже не по отношению к обычному механическому движению — перемещению в пространстве, а по отношению к движению в самом широком смысле слова — превращению частицы?

Что ж, видимо, это не далеко от истины. Мы помним, что когда кинетическая энергия частиц сравнивалась с их собственной энергией, определяемой именно массой покоя, частицы получали возможность реальных превращений в кванты своего поля.

Но если это так, то масса покоя оказывается словно мерой качественной устойчивости частиц. У одних частиц эта масса не очень велика и превращения в кванты могут наступать при не очень высоких энергиях. У других частиц она много больше, и соответственно частицы значительно более устойчивы.

Вспомним, что согласно современным представлениям частицы, кроме реальных, могут испытывать еще виртуальные превращения, лежащие в основе их взаимодействий. Так масса приобретает еще один аспект, определяя собой энергию виртуальных квантов полей.

В результате, как мы видим, сущность массы оказывается очень слож-

ной. С одной стороны, масса есть какая-то характеристика частицы самой по себе, а с другой стороны, масса входит определяющим фактором во все взаимодействия этой частицы.

Столь же сложной, вне всякого сомнения, сущностью должны обладать и прочие характеристики частиц. Сегодня все вопросы о выяснении этой глубинной сущности вещей в микромире упираются в высочайшую гору, еще не покоренную физикой. Эта гора — взаимоотношение двух основных видов материи — вещества и поля.

Частицы вещества обладают свойствами поля. Кванты поля имеют вещественные свойства...

Что же из них «более основное», так сказать, первичное — вещество или поле?

Век назад, когда в физику только что вошло понятие поля, ответ на такой вопрос казался очевидным: конечно, вещество! Частицы вещества создают вокруг себя поля. Поле — не более как вспомогательный инструмент для учета взаимодействий частиц. Нет вещества — нет и поля.

Но прошло время, и выяснилось, что поле может рождать частицы, что частицы могут исчезать, превращаясь в поле. Вот тебе и «вспомогательный инструмент»!

И тогда физики бросились в другую крайность. Они вслед за Эйнштейном заявили: первично поле, единое мировое поле, во всех многообразнейших его проявлениях. Частицы вещества — не более как «сгустки» поля! Нет поля — нет и вещества.

Эйнштейн много лет бился над теорией единого поля, которое включало бы в себя все известные виды полей и частиц, — но попытки построить такую теорию одна за другой оканчивались неудачей. И физики начали постепенно склоняться к мнению, что присудить пальму первенства нельзя ни полю, ни веществу. Оба они — в равной мере первичные, основные стороны материи.

Что ж, это правильный вывод, и спор между сторонниками единого поля и единого вещества мог бы утихнуть. Но и по сей день физики спорят о том, насколько правильно они познают мир сверхмалых вещей, соответствуют ли выработанные ими представления истинной сущности этих вещей. Не впадают ли они в ошибку, пытаясь навязать природе теории, рожденные в человеческой голове? В состоянии ли вообще человек — представитель мира больших вещей — познать вещи и события в куда более малом мире атомов, ядер и элементарных частиц.

Человек в состоянии правильно познавать законы природы, постепенно все ближе подходя к истине.

Но никогда познание не будет закончено, никогда знание о мире не станет абсолютно точным.

И, став на фундамент этих положений, физика решает вопрос о том, как надо понимать взаимоотношения двух основных форм материи.

Прежде всего, может ли быть единое поле или единое вещество? Нет. Поле и вещество — это две противоположные формы существования материи и ее развития. Одна из них невозможна без другой. Это — две стороны одной и той же медали. Вместе с их противоположностью они едины, неразрывно связаны: поле имеет свойства вещества, вещество имеет свойства поля.

Обладают ли, далее, наши представления о существовании и взаимосвязи этих двух форм материи какой-либо истинностью? Да, обладают, потому что эти представления, хоть и неточны, но в основном все же правильны. Наблюдаемые явления, как правило, укладываются в их рамки, а предсказанные на основе этих представлений явления наблюдаются в действительности.

Почему же в таком случае среди физиков идут споры, как истолковывать полученные ими результаты? Прежде всего потому, что далеко не все физики знакомы с диалектическим материализмом. Враждебная ему философия, особенно ее наиболее ядовитое течение, которое именуется субъективным идеализмом, утверждает, что весь мир существует лишь в воображении человека, так что устанавливаемые законы природы — не более чем плод игры человеческого ума. Исповедуя эту, с позволения сказать, философию, ряд, даже крупных ученых не склонен придавать реальному значению открытиям физики. Эти ученые предпочитают наделять мир «непознаваемостью».

Впасть в такую ошибку тем более легко, что мир сверхмалых вещей нельзя наблюдать непосредственно, нельзя убедиться в его существовании «своими глазами». И, что еще более важно, свойства микромира резко отличаются от свойств привычного нам мира. Настолько резко, что наши обычные представления не отражают реальной сущности микромира.

Наука же развивается так, что новые представления в ней рождаются очень медленно. Человек все-таки живет в мире обычных вещей, обычных представлений, мозг его привыкает именно к этим представлениям. А отвлечься от них к «невообразимым» представлениям, правильно отвечающим сущности микромира, — очень трудно. Но — надо: ведь очень неудобно говорить и думать «микрочастица», зная, что это не только частица, говорить «поле», зная, что это не только поле. И дело здесь не столько в словах, сколько в тех образах, которые связываются с ними, называются собственными представлениями.

Пока квантовой механике удалось соединить старые представления с образами частицы-волны, дырки-позитрона, кванта-мезона. Но в головах физиков эти двойственные сущности еще не вполне слились в единую действительную.

Это слияние — дело недалекого будущего.

Биография квантовой механики

За шестьдесят лет своего существования квантовая механика пережила три этапа развития.

Первый этап может быть назван так: от Планка до де-Бройля. Он охватывает 25 лет, начиная с открытия вещественных свойств световых волн и кончая открытием волновых свойств частиц вещества. За эти годы были созданы Эйнштейном и Бором теория световых частиц (фотонов), первая, еще очень несовершенная теория строения атомов и происходящих в них явлений.

С открытием де-Бройля в 1924 году начинается второй этап развития квантовой механики. За необычайно короткий срок — каких-нибудь пять лет — создается основной «рабочий инструмент» новой теории. Дирак осуществляет первый в истории квантовой механики синтез ее с теорией относительности Эйнштейна. В последующие годы, перед второй мировой войной, создается теория атомного ядра.

И, наконец, в основном в годы после второй мировой войны, наступает третий этап: распространение квантовой механики на элементарные частицы вещества и на вторую основную форму материи — поле.

На этом последнем этапе необычайно возрастают трудности, которые приходится преодолевать квантовой механике. После блистательных побед она впервые начинает вкушать горечь неудач.

Создается впечатление, что ее зубы, столь острые в разгрызании таких орешков, как атомы и молекулы, оказываются тупыми перед такими поистине крепчайшими орехами, как строение самих элементарных частиц и взаимодействия между ними.

Опыт сегодня уже ушел здесь вперед по сравнению с теорией. Ждут своего теоретического объяснения самые сокровенные процессы, происходящие в глубине атомных ядер. Встали на повестку дня вопросы о сущности самого понятия элементарных частиц.

Квантовая механика пока что не может решить этих вопросов. Все чаще становится видна ее ограниченность, те ее пределы, которые еще двадцать лет назад казались такими туманными и далекими. Сейчас настало время «подправлять» квантовую механику.

Не напоминает ли это то положение, в котором очутилась в конце прошлого века ее предшественница — классическая механика?

С одной стороны, казалось бы, пока нет фактов, противоречащих основным положениям квантовой механики. Речь идет лишь о ее неспособности объяснить ряд явлений — неспособности, видимо, самой теории, а не учебных. Может быть, для этого придется несколько расширить ее рамки, влить в нее новые силы, ввести в квантовую механику не противоречащие ее духу новые важные положения.

Но может случиться так, что эти положения, без столкновения с другими,

введенными ранее, включить не удастся. Что ж, тогда придется лишь ненадолго опечалиться.

Беспредельно могучих теорий никогда не было, нет и не будет. Жизнь каждой теории в науке, как и жизнь человека, знает робкое детство, когда только прорезываются ее зубы. Знает могучую юность, когда теория словно шутя расправляется с самыми трудными задачами, с загадками вековой давности. Знает спокойную зрелость, когда приостанавливается ее движение вглубь и теория разливается вширь, охватывая все большие пространства явлений, вторгаясь в технику и промышленность, устанавливая контакты с другими науками. Знает, наконец, и старость с ее предвестниками — первыми выкрошенными зубами в схватках с новыми фактами, открытыми на ее же основе, но которые она бессильна объяснить.

Тогда наступает, на первый взгляд, период застоя в данной области науки. Но это не так. В тиши кабинетов и лабораторий зреют новые идеи, которым тесно в рамках старой теории. Неприметные сначала, эти идеи в один действительно прекрасный день взрывают дом, в котором они родились. Вот когда наука делает прыжок вперед!

Место квантовой механики в этой шкале возрастов на сегодняшний день — скорее всего вершина ее зрелости и начало старости. Многие крупнейшие технические достижения связаны с нею. Огромен круг охватываемых ею вопросов — от строения гигантских звезд до структуры сверхмалых атомных ядер и элементарных частиц. Нет сегодня более сильной физической теории микромира, чем квантовая механика.

Нет такой теории, — но уже все настоятельнее необходимость в ней. Ученые — а их в этой области физики сейчас работает немало — пытаются либо омолодить квантовую механику, влив в нее новое содержание, не противоречащее ее основным принципам, либо хотя бы изменить сам ее дух, ищут более радикальных путей и готовы даже принести ее в жертву. Но никто из них пока что не может похвастаться серьезными успехами.

Все больше физиков склоняется к мнению, что слово за новой, еще более необычной, «сумасшедшей» теорией. Ученые не пугаются этого слова. Всякая принципиально новая крупная теория при своем рождении встречает реакцию старого. Всегда находятся люди, рекомендующие проверить психическое состояние ее автора. И квантовая механика, когда она появилась, для многих физиков попахивала «сумасшедшинкой». А теперь? Вряд ли найдется хоть один ученый, отрицающий ее правоту.

Так или иначе, но ясно одно: физика сейчас находится на пороге нового скачка. И этот скачок — не в неведомое. Ученые хорошо видят курс, по которому они ведут корабль новой физики, и знают ближайшие пункты его назначения.

Вот некоторые из этих пунктов. Строгая единая систематика всех открытых к настоящему времени и, возможно, в будущем элементарных частиц. Строение и глубинные свойства частиц материи. Природа сил, действующих

в атомных ядрах. Точные законы взаимоотношения между двумя основными видами материи — веществом и полем. Взаимная связь и обусловленность всех свойств движущейся материи: энергии и времени, массы и пространства, и определяемая этой связью особая сущность микромира — мира сверхмалых вещей.

В этой книге мы рассказали, как родилась и развивалась квантовая механика, как она стала той могучей наукой, какой мы ее видим сегодня. Мы рассказали также о том, как квантовая механика преодолевает современные трудности своего развития, как она ищет дверь в мир совсем уже ничтожно малых вещей, который уместно было бы назвать микромиром. Ибо познание и освоение невообразимо малых миров — это сегодня столбовая дорога науки и техники.

Вторая жизнь квантовой механики

Любая наука имеет как бы две жизни. Первая — это жизнь мысли, представлений науки, законов, формул. Вторая — жизнь технического воплощения науки — станков, приборов, умных и сильных машин.

В какие бы непостижимые дали абстракции не уходила мысль ученых, перед нею всегда зримо или незримо стоит цель — возвращение к реальному миру, в котором живут ученые, к насущным нуждам этого мира.

Знаменитые слова Маркса: «Философы лишь различным образом объясняли мир, но дело заключается в том, чтобы изменить его» относятся не только к философии. В них заключен истинный смысл существования и развития любой науки.

С каждым новым открытием увеличивается не только объем человеческих знаний. Возрастает и мощь людей в их борьбе с природой. И можно заметить, что с каждым веком сокращается срок, который отделяет дату крупного научного открытия от даты первого его применения на практике.

Наука всегда предугадывает те проблемы, с которыми впоследствии должно столкнуться человечество. Это предугадывание происходит не как «милость божья» или «милость гения». Нет — это совершенно объективная закономерность, в основе которой лежат законы развития общества.

Поздно будет, если наука обратится к решению жизненно важной проблемы, когда та станет уже с «ножом у горла»! И сознают это или не сознают ученые, но они приступают к решению таких проблем задолго до того, как эти проблемы окажутся жизненно важными.

Наука — это «передовое охранение» человеческого общества на марше. Она и разведчик будущего и надежнейший защитник настоящего.

Открытие и разработка квантовой механики могут служить хорошей иллюстрацией к сказанным выше словам. Второй жизни квантовой механики мы и посвятим заключительный раздел нашей книги.

Представление о существовании атомных ядер возникает примерно в 1912 году. Спустя двадцать лет это представление обретает правильные конкретные черты: выясняется, из каких частиц состоит ядро, обнаруживается необычность сил, действующих между ядерными частицами. Но «труднодоступность» атомных ядер — и для их обнаружения, и для их понимания — не останавливает физиков. Еще через тринадцать лет брезжит заря атомного века. Но это — зловещее, кровавое зарево американских атомных взрывов над Хиросимой и Нагасаки! Кажется, оно несет не изобилие, а смерть и массовое истребление человечеству. Проходит, однако, совсем немного лет — и над миром встает истинная заря нового века науки и техники: в 1954 году в Советском Союзе начинает работать первая в мире атомная электростанция.

Атом в миролюбивых руках! И в этих руках он способен на чудеса. Силу атома, служившую ранее войне и разрушению, наши ученые направили на службу миру и созиданию.

В горниле атомного реактора, где мечутся потоки нейтронов, расщепляя ядра тяжелых атомов, рождая тепло и электрический ток, нашла первое замечательное техническое воплощение квантовая механика.

Далее ученые обратились к попыткам извлечь энергию из легких ядер, — в первую очередь, ядер изотопов водорода. И снова два мира на Земле — мир социализма и мир капитализма — выявили в этих попытках ученых свою истинную сущность. В то время как в США все силы лучших физиков и инженеров были брошены на создание водородных «сверхбомб», Советский Союз ставил во главу угла основную гуманную цель этой работы — использование термоядерных реакций для мирной энергетики.

Эта благородная задача решается нашими учеными со все бóльшим размахом. Ведь в конце ее стоит заманчивая цель: отодвинуть угрозу оскудения земных источников энергии еще на тысячи лет, обеспечить возможность беспрепятственного развития человеческого общества на многие годы вперед.

И в этой работе свое веское слово говорит квантовая механика. Именно она рассчитала ход термоядерных реакций, позволила предсказать их огромную энергетическую выгоду.

А дальше? А дальше встанут новые проблемы. Эти проблемы будут неизмеримо труднее тех, с которыми сегодня сталкиваются ученые. Но и ученые того времени будут неизмеримо более знающими и могущественными, чем ученые сегодняшнего дня!

До недавних времен ученые редко задумывались над тем, к каким последствиям могут привести их открытия. Вряд ли молодой ученый А. Ф. Иоффе, заинтересовавшись в начале нашего столетия «бросовыми» веществами, как о них думали в те годы, мог представить себе, какое значительнейшее место в технике займут полупроводники. Иоффе был неутомимым исследователем, он сумел зажечь своим огнем молодых ученых и создать в

нашей стране прекрасный научный коллектив. Этому коллективу мы во многом обязаны тем, что полупроводники так широко вошли в нашу жизнь.

Но без квантовой механики полупроводники были бы мертвы. Она не только объяснила их удивительные свойства. Она подсказала, как их можно радикально улучшить. Сегодня тот из разделов квантовой механики, который называется зонной теорией твердых тел и о котором мы уже рассказывали выше, стал путеводной звездой для многих тысяч ученых и инженеров, работающих в области электроники.

Такие маленькие и такие могущественные электронные приборы внесли коренные изменения в промышленность и технику. Сегодня без них не мыслится ни один завод, ни один вид транспорта или связи. Трудно назвать хотя бы одну область практической деятельности человека, которая не испытала бы пришествия электроники.

Ученые уже всерьез задумываются над решением дерзновеннейшей задачи: избавиться с помощью полупроводников от зависимости от «ископаемых» источников энергии, черпать ее непосредственно из солнечного излучения, столь щедро падающего на нашу планету. И уже работают первые полупроводниковые батареи, превращающие солнечный свет в электрическую энергию. И уже появляются проекты установки этих батарей на безжизненной поверхности Луны, а может быть, даже и других планет солнечной системы.

Последний проект очень интересен. Чтобы создать на Земле полупроводниковые покрытия огромной площади, необходимые для улавливания значительной доли приходящего на Землю солнечного излучения, пришлось бы вторгнуться в области растениеводства и животноводства либо уже существующие, либо пригодные для будущего. На Луне же, естественно, такой проблемы не возникает.

Но как передать полученную таким образом энергию на Землю? В космосе линии электропередачи не построить. Да и такие линии, которые уже при небольших «земных» протяженностях вызывают значительные потери электроэнергии, не были бы идеальным решением задачи.

Но вот около десяти лет назад видный советский физик В. А. Фабрикант предлагает идею квантового усилителя электромагнитных волн. А квантовая механика, воплощенная сначала в идее квантового усилителя, а потом квантового генератора, вызвала к жизни новые приборы.

Что это за приборы? Сегодня их названия уже широко известны: маверы — усилители и генераторы радиоволн, лазеры — усилители и генераторы света. Чистейшая фантастика «гиперболоида инженера Гарина» нашла в лазерах реальное техническое воплощение.

О законах квантовой механики, управляющих электромагнитным излучением атомов, мы уже подробно говорили в начале нашей книги. Эти законы уже давно и надежно установлены. Настолько давно (почти тридцать лет назад — срок в истории квантовой механики весьма приличный) и

настолько надежно, что над ними к пятидесятым годам нашего столетия уже мало кто задумывался.

Но вот на них с новой точки зрения взглянул пытливый и вдумчивый исследователь — и эти законы «заиграли» совершенно новым блеском, воплотились в поразительных по своему могуществу приборах.

Мы смогли рассказать здесь лишь о нескольких, наиболее ярких технических воплощениях тех идей и представлений о мире сверхмалых вещей, которые принесла с собой квантовая механика. Уже сегодня число этих воплощений очень велико. С каждым годом квантовая механика все шире входит в технику и промышленность. Удивительно богата и многообразна вторая жизнь квантовой механики.

Мы являемся свидетелями ее начала. А нашим ближайшим потомкам выпадет на долю увидеть такие ее свершения, которые затмят предсказания даже смелых фантастов современности.

СОДЕРЖАНИЕ

От классической механики — к квантовой механике

Вместо введения	3
Контурь нового мира	4
Храм классической механики	6
Храм рушится	7
О названии новой теории	8
Физики в роли модельеров	9
Не всему можно придумать модель!	11
Мир, который не пощупать и не увидеть	12
Трудно,—но интересно!	13

Первые шаги новой теории

Тепло и свет	15
Чернее черного	16
Вместо «на глазок» — точный закон	18
Ультрафиолетовая катастрофа	19
Классическая физика в тупике	19
Выход из тупика найден	20
Кванты энергии	21
«Неуловимые» кванты	23
Непонятное явление	25
Фотоны	26
Что же такое свет?	27
«Визитные карточки» атомов	28
Почему тела испускают свет?	29
Биография атома, написанная Нильсом Бором	31
Как отсчитывать энергию?	34
Возбужденные атомы	35
Первые поражения	37

От теории Бора — к квантовой механике

Удивительная статья	40
Немного об обыкновенных волнах	41
Первое знакомство с «волнами материи»	42
Почему мы не замечаем волн де-Бройля?	42
Волна есть!	45
Двуликие частицы	47
«Волна-пилот»	48
Вместе или поодиночке?	50

Мы едем на стрельбище	52
Волны вероятности	54
Как вероятность была допущена в физику	55
Осторожные предсказания	56
Волны частиц и частицы воли	58
На пути к волновому закону	59
Рассказывает измерительный прибор	61
Соотношение неопределенностей	64
Кто виноват — прибор или электрон?	66
Попытка с «полунегодными» средствами.	67
Еще одно «чудо»	69
Опять соотношение неопределенностей	73
И опять «волны материи»	74
Волновая функция	75
Волны и кванты объединяются	77

Атомы, молекулы, кристаллы

Облака вместо орбит	80
Об однообразии и разнообразии	83
Еще одно чудо — но пока без объяснения	84
«Атомный архитектор» за работой	85
«Ненормальные» атомы	88
Атомы и химия	91
Рождение спектра	94
Линии-толстяки и линии-двойники	96
«Бракосочетание» атомов	98
Твердые тела — «крепкие орешки!»	101
Каркасы и этажи кристаллов	103
Изоляторы тоже проводят ток!	107
Как ток идет по металлу?	109
Чудесная «половинчатость»	112
Полезная «грязь»	114
Атомы щедрые и атомы жадные	115

В глубинах атомного ядра

На пороге	119
Первый шаг	120
Второй шаг	122
Поиски таинственного мезона	124
Самые сильные силы на свете	125
Еще об устойчивости ядер	129
Туннели в ядрах	130
Ядро состоит из оболочек?	132
Как появляются гамма-лучи	134
Ядро—капля?	135
Ядро-капля делится	137
Секреты ядерного деления	138
Сколько всего может быть ядер?	140
Ядро — и оболочки, и капля!	141
Из ядра вылетают частицы, которых в нем нет!	143
У электрона появляется сообщник	144
Электроны рождаются в ядрах	146
Ядро-обжора	148

От атомных ядер — к элементарным частицам

Открытие нового мира	151
Незримый рубеж	153
Еще немного о теории относительности	155
Первые трудности	156
Неожиданное открытие	157
И еще более неожиданное открытие	160
Рождение «дырки»	162
Очертания пустоты	164
Пустота — пустое место?	166
Пустота зависит от тел!	167
Вещество и поле	169
Пустоты не существуют!	170
На чем стоят киты?	171
Частицы меняют свой облик	173
Двуликий пи-мезон	174
Тайна мезонного обмена проясняется	176
Секрет взаимодействия	178
Царство виртуальностей	181
Виртуальное становится реальным	182
На охоту за новыми частицами	184
Обработка охотничьих трофеев	187
Слово за античастицами	188
Частицы распадаются	189
Физики классифицируют взаимодействия	191
Загадка ка-мезонов	193
Отличается ли левое от правого?	194
Выход найден — и какой удивительный!	197
Мир и антимир	199
Что происходит внутри частиц?	200
Старый груз тянет назад	202
Оборотная сторона очевидности	203
Кванты — всюду и всегда	205

От квантовой механики — к ...?

Неопределимые определенности	207
Биография квантовой механики	211
Вторая жизнь квантовой механики	213

Виталий Исаакович Рыдник

ЧТО ТАКОЕ КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА

Редактор **М. Г. Пожидаева**
Художественный редактор **В. В. Щукина**
Технический редактор **Т. Ф. Клапцова**

Сдано в набор 27/IV 63 г. Подписано к печати 24/VIII 63 г.
Формат бум. $70 \times 90^{1/4}$ Физ. печ. л. 13,75 Усл. печ. л. 16,0
Уч.-изд. л. 14,2 Изд. инд. НЛ-110. АО 9046. Тираж 27000 экз.
Цена 58 коп. в переплете

Издательство «Советская Россия».
Москва, проезд Сапунова, 13/15.

Полиграфический комбинат Верхне-Волжского совнархоза,
г. Ярославль, ул. Свободы, 97,
Заказ 339.

Механика



**Umo
makoe**

