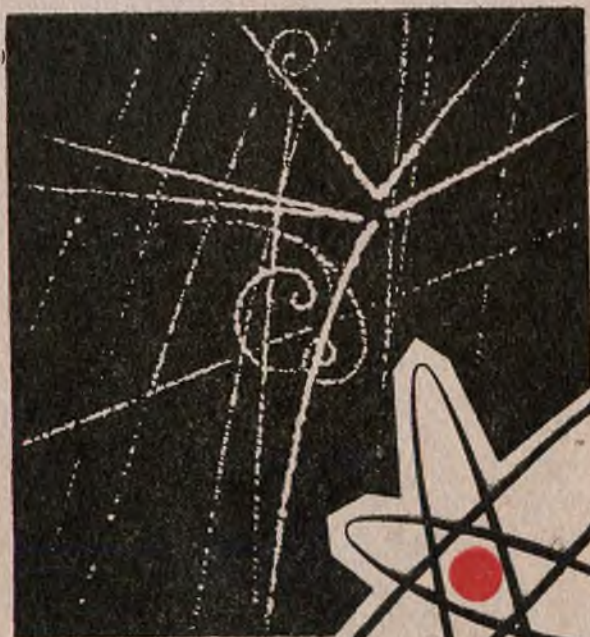




В ГЛУБЬ атома

— Е.М.БАЛАБАНОВ —



Е. М. БАЛАБАНОВ,
доктор физико-математических наук

В ГЛУБЬ А Т О М А

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЗНАНИЕ»
Москва 1967

25.
Б20

1-5-8
~~58-67~~

ВВЕДЕНИЕ

В процессе своей жизнедеятельности человек связан с окружающей природой. Но в отличие от других живых организмов связь человека с природой чрезвычайно активна. Он изучает и использует законы природы, создает материальные ценности. Он «переделывает» природу для своих нужд, облегчая тем самым свой труд.

Человек-мыслитель пытается не только познать те явления, которые он непосредственно наблюдает, но и понять причины этих явлений. Познавая причины, он узнает, что они, в свою очередь, являются следствием других, более глубоких причин. Используя и приспособляя природу, человек идет от сложного к более простому, от больших тел, непосредственно окружающих его, к атомам, атомным ядрам и элементарным частицам.

На различных этапах развития человеческого мышления всегда оставались необъяснимые явления. Древний человек приписывал их деятельности какого-либо божества. Так, например, не зная законов движения небесных тел, не ведая даже об их существовании, человек обожествлял Солнце. Если бог-Солнце захочет покарать, он пошлет засуху и оставит людей без пищи и воды. Надо просить, молиться этому богу, чтобы он был милостив к человеку. Другого средства не было.

Проходили века. Постепенно большинство «чудес» природы были объяснены, и места богам оставалось все меньше и меньше. Если и не все еще можно было объяснить, то не было сомнения в том, что это будет сделано в ближайшем будущем.

Самым загадочным для человека оставался сам человек с его мышлением, эмоциями, сновидениями... Люди «созда-

ли» единого бога по своему подобию. Бог был нужен для объяснения могущественных сил природы, для укрепления власти сильных и богатых, для царей на земле, которые считали себя наместниками этого бога на небе.

Но присутствие единого бога никак не отражалось на явлениях природы. Все физические процессы строго подчинялись фундаментальным законам природы. В конце XIX века большинство ученых считало физику практически законченной наукой. Для полной физической картины мира оставалось, казалось бы, «дорисовать» небольшие штрихи.

В начале XX века ученые проникли в микромир и обнаружили там, на первый взгляд, много весьма странных явлений. Прежде всего выяснилось, что микрочастицы не подчиняются законам классической механики. Невозможным оказалось, зная начальные условия, точно предсказать поведение микрочастиц: одна и та же причина приводила к различным следствиям.

Это было трудно понять, и мир ученых разделился на два лагеря, придерживающихся различных точек зрения. Многие рассуждали следующим образом:

Механика микромира должна и может быть сведена к классической, где существует абсолютный детерминизм; т. е. строгая зависимость между причиной и следствием. Для того чтобы это выполнялось, у микрочастиц должны существовать «скрытые от наблюдателя параметры». Одни говорили, что эти «скрытые параметры» следует искать в тщательно поставленных опытах; другие верили, что их можно получить логическим путем или с помощью математических преобразований. Но была еще и третья, самая, пожалуй, малочисленная группа ученых, которые утверждали, что скрытых параметров у микрочастиц искать не нужно. У частиц, мол, есть своя свобода выбора или проявление «воли». Конечно, здесь нет еще доказательства «бытия божьего» в микромире, но читатель хорошо понимает, какие выводы можно сделать из подобной «теории».

Ученые-материалисты пришли к единственно правильной точке зрения. Никаких «скрытых параметров» у микрочастиц нет. Об этом говорят экспериментальные исследования. Попытки (они делаются еще и сейчас) внести эти параметры логическим или математическим путем оказались бесплодными: они не только не дали ничего нового, но и не позволили понять все то, что хорошо объясняется современной физикой. Механика микромира — квантовая механика — дает вполне полное описание процессов. В этом описании нет места ни «скрытым параметрам», ни «свободе воли» частиц или «божественного провидения». Просто причинность здесь носит несколько другой характер, нежели в мире больших тел. В результате действия одной и той же причины могут

происходить разные следствия, но с различной вероятностью.

Об этом и рассказывает эта небольшая книжка. Читатель не найдет в ней подробных ответов на все вопросы, связанные с микромиром, она лишь приоткрывает дверь перед читателем к переднему краю науки. Но и этого уже достаточно, чтобы видеть, что в этом мире нет «чудес», и над ним не довлеет так же, как, впрочем, и в макромире, рука «божественного провидения».

Классическая механика и классическая статистика

Механика Ньютона и ее основные законы (постулаты) прочно завоевали умы ученых XVIII и XIX веков. В самом деле, механические закономерности прекрасно, насколько позволял опыт, объясняли все явления, происходящие как с малыми, так и с большими телами. Зная начальные координаты и импульс (количество движения) тела, можно точно рассчитать путь движения, соударения тел и тому подобные процессы. Классическая механика казалась настолько всесильной, что высшим достижением ученого считалось, если он вновь открытое явление сводил к уже известным механическим законам.

Представление об атомах — мельчайших частицах вещества — возникло еще в глубокой древности, но особое развитие получило в XVIII и XIX веках. Так, газ представлялся в виде материальных и невзаимодействующих друг с другом точек-частиц. Тепловое движение частиц газа и сейчас очень хорошо описывается как простое механическое движение материальных точек.

Схема логических построений здесь довольно проста: конечно, нельзя знать точно движение каждой частицы — атома. Но это и не так уж важно. Можно воспользоваться правилами теории вероятности — статистикой — законами больших чисел. Надо говорить не о каком-то действительном движении атома, а лишь о средних параметрах движения: средней скорости, средней длине свободного пробега и других. Понятие температуры газа, жидкости, твердого тела является понятием статистическим, поскольку определяется из значения средней энергии молекул и атомов. Таким образом, тепловые явления в конечном счете могут быть сведены к механическим движениям частиц, обладающих средними параметрами. Так, например, второе начало термодинамики, утверждающее существование необратимых процессов передачи тепловой энергии, расширения газа и другие подобные

процессы, можно объяснить движением атомов и молекул. В результате соударений всякое направленное (упорядоченное) движение материальных частиц стремится к хаотичности, к беспорядку. Мера этого беспорядка — энтропия — всегда должна увеличиваться в изолированном пространстве. Второе начало термодинамики описывает вполне объективные процессы в природе, а величина энтропии связана с вероятностью состояния, т. е. с случайными процессами. На этом нужно остановиться подробнее.

Перед нами два равных по объему сосуда с газом, соединенных между собой трубкой с краном. В одном — правом — сосуде газа больше, чем в левом, т. е. давление там выше. Что произойдет, если мы соединим сосуды, открыв кран, известно: газ из правого сосуда будет перетекать в левый, пока давление в обоих сосудах выровняется.

А может произойти обратное? Может, говорят физики, но с ничтожно малой вероятностью. Газ состоит из молекул, движущихся беспорядочно с разной скоростью. Они сталкиваются друг с другом и стенками сосудов. Этих ударов будет больше в правом сосуде, где молекул много. В результате столкновений молекулы из правого сосуда будут чаще переходить в левый, чем наоборот. В конце концов, когда число молекул в обоих сосудах станет равным, частота перехода из одного сосуда в другой будет одинакова. Раньше был какой-то «порядок»: в одном сосуде газа больше, чем в другом, молекулы двигались преимущественно в одном направлении. Теперь наступил полный «беспорядок»: частицы снуют в самых различных направлениях между сосудами. Вместе с тем это состояние, с равными количествами молекул в обоих сосудах, является наиболее вероятным и обладает также и наибольшим значением энтропии.

Поэтому второе начало термодинамики можно интерпретировать как закон, в результате действия которого любая система должна переходить из состояния менее вероятного в более вероятное. Но вероятность никогда не может быть равна единице, т. е. быть достоверностью. Поэтому существует всегда какая-то, может быть, небольшая вероятность, что процесс случайно пойдет в обратном направлении: газ будет скапливаться в одном из сосудов, тепло будет переходить от холодного тела к горячему... Вероятность можно подсчитать. И в случае если в сосудах будет нормальное давление (одна атмосфера), равномерное распределение молекул имеет вероятность, очень мало отличающуюся от единицы: что-то около нуля, запятая, а затем сорок девяток! Ну, а вероятность того, что газ будет только в одном сосуде, мало отличается от нуля, приблизительно нуль, запятая, пятьдесят-шестьдесят нулей, а потом 1. Эти цифры можно написать иначе, но для нас важно, что фактически первый

случай, равномерное распределение газа, бывает всегда, а второй случай никогда. Стоит ли тогда говорить о вероятности события, когда оно так мало отличается от достоверности? Надо говорить! Именно здесь физики впервые подошли к законам природы, имеющим вероятностный характер, связанный со случайными явлениями.

Ну, а если мы имеем дело с небольшим числом молекул, то «маловероятные» явления могут происходить весьма часто. Их называют флуктуациями. Так, при нормальном давлении в одном кубическом сантиметре воздуха находится в среднем около $3 \cdot 10^{19}$ молекул различных газов. Но отклонение от этого среднего значения в различное время и разных местах достигает 10^{10} частиц. Все же это слишком мало — стомиллионная доля процента — чтобы это можно было заметить. Однако если мы возьмем объем, равный кубическому микрону, то в нем будет всего $3 \cdot 10^7$ частиц, а отклонение от этой средней цифры может быть 10^4 молекул, т. е. порядка уже нескольких сотых процента. Это уже хорошо наблюдается. На этих микронных объемах воздуха рассеивается солнечный свет. Причем рассеивается преимущественно коротковолновое излучение. Именно этим объясняется голубой цвет неба и красный цвет самого Солнца при его восходе и закате, когда солнечный свет проходит через большую толщу атмосферы.

Но вернемся к нашему опыту с соединенными сосудами. Предположим, что в правом сосуде находится всего 6 молекул, а в левом 4. По-прежнему наиболее вероятным будет состояние, когда в обоих сосудах будет по 5 частиц. Но вероятность этого события значительно меньше единицы, и поэтому такое распределение будет сравнительно редким явлением. Гораздо чаще будут состояния с неравным числом молекул, и не так уж долго придется ждать, когда все частицы соберутся в одном сосуде. Когда же две молекулы из правого сосуда будут находиться в соединительной трубе, то мы вообще не можем сказать, в каком сосуде в следующий момент времени будет больше частиц: ведь вероятность одной из частиц пойти в правый или левый сосуд совершенно одинакова. А нельзя ли все-таки узнать, куда пойдут молекулы? Принципиально можно, утверждает классическая механика. Для этого нужно знать параметры движения каждой частицы. Если это так, то ни статистика, ни теория вероятности не нужны были бы. Нет, нужны, говорят физики, потому что невозможно узнать, как ведет себя каждая молекула газа.

Читатель, конечно, уже понял, что эти объяснения не вполне удовлетворительны. Из них следует, что объективные статистические законы природы зависят от нашего знания параметров частиц, т. е. приобретают субъективный привкус.

Статистика применяется и в других случаях. Предположим, что в какой-то южный курортный город ежедневно в среднем приезжает 1000 туристов и отдыхающих. Это статистические данные, и вполне закономерно, что в любой день могут быть отклонения от этого числа. Может быть, здесь тоже статистические закономерности можно принципиально сосчитать, зная досконально о «параметрах» каждого человека в стране? Нет, этого сделать нельзя, так как «принципиально» мы не можем все знать о поведении человека. Помимо чисто объективных обстоятельств (время года, погода, удобства жизни на курорте и т. п.) у каждого человека есть своя индивидуальность, свобода воли. Поэтому его поведение нельзя точно предугадать: человек может сам выбрать, куда ему поехать отдыхать, в Сочи или Ялту.

Но ведь частицы неразличимы; у них нет индивидуальности, нет свободы выбора и своей воли. Поэтому можно как будто бы хотя бы принципиально заменить статистические законы «абсолютно точными» законами, какие, например, управляют движением шаров или материальных точек в классической механике.

Займемся снова мысленными опытами с сосудами. В обоих сосудах равное количество газа, и установилось наиболее вероятное состояние: энтропия стала максимальной. Если мы теперь нагреем газ в одном из сосудов, подставив, например, на время зажженную газовую горелку, то энтропия снова уменьшится и состояние станет менее вероятным. Заметьте, что для этого нам пришлось затратить энергию горящего газа. Для простоты рассуждений мы исключим тепловой обмен сосудов с окружающей средой. Тогда тепло из нагретого сосуда будет переходить в холодный. Это значит, что будут в основном направленные (значит упорядоченные) потоки быстрых частиц из горячего в холодный и медленных частиц в обратном направлении. Так будет до тех пор, пока средняя кинетическая энергия молекул (а следовательно, и температура) в обоих сосудах не станет равной. Тогда опять наступит полный беспорядок в движении частиц; энтропия будет максимальной и состояние будет наиболее вероятным. Случайно быстрые частицы могут из одного сосуда перейти в другой, и температура его повысится. Но вероятность этого процесса очень мала. Десять, сто, тысяча частиц не изменяют заметно температуры газа, а вероятность перехода миллиардов быстрых молекул практически равна нулю.

Аппарат, в котором самопроизвольно происходит переход тепла от холодного тела к горячему, был предметом изобретения тысяч неудачников в XVIII и XIX веках. Это так называемый «вечный» двигатель второго рода. Легко себе представить, что было бы, если бы одно из таких «изобретений» можно было осуществить. Можно было бы, напри-

мер, понизить температуру морей и океанов в среднем на 1 градус и за счет этого иметь энергию, которую все существующие электростанции мира не могли бы выработать за 1000 лет. Конечно, при этом произошло бы изменение климата, увеличение ледяных полей у полюсов Земли, но... этих неприятностей не произойдет, так как на пути осуществления таких двигателей стоит серьезная преграда: второе начало термодинамики.

Один из основателей кинетической теории газов и статистических законов английский ученый Максвелл тоже принял участие в разработке вечных двигателей и преподнес свое «изобретение» в несколько шутливой форме. Мы последуем за ним и попробуем сделать нужное приспособление к нашим сосудам.

Для этой цели можно использовать кран в соединительной трубке между сосудами. Но лучше установить очень легкий клапан, которым будет управлять весьма информированный оператор. Этот оператор должен иметь сведения о всех подлетающих к клапану частицах. Если из правого сосуда летит медленная частица, клапан открывается, но перед быстрой частицей он захлопывается: она отражается и возвращается в сосуд. В том случае, когда из левого сосуда летит быстрая частица, оператор ее пропускает, но задерживает медленную. Таким образом, в правом сосуде будут скапливаться быстрые частицы, и его температура повышается. Тепло из холодного баллона переходит в горячий. Нарушается второе начало термодинамики. Причем, обратите внимание, что это «нарушение» производится оператором только потому, что он знает точные параметры подлетающих к клапану молекул.

Внимательный читатель заявит, что мой аппарат технически безграмотный, так как на открывание и закрывание клапана уйдет больше энергии, чем будет получено при переходе тепла из холодного баллона в горячий. Кстати, такой переход с затратой энергии не запрещен никакими физическими законами. Домашний холодильник именно это и производит: но в нем нет выигрыша в энергии, а есть весьма ощутимый проигрыш, оплачиваемый владельцем.

Мое возражение сводится к тому, что наш опыт мысленный и все же он имеет право на научную интерпретацию. Сколько энергии уходит на работу клапана, мы подсчитывать не будем. Важно то, что эта энергия не расходуется на перекачку тепла из одного сосуда в другой. Принцип работы холодильника совершенно иной, тут нет нарушения термодинамических законов: они там строго выполняются. Наш аппарат основан только на информации оператора: на его знании точных параметров частиц.

Дело не в том, что этот оператор должен быть наделен

весьма необычными свойствами: получать информацию и мгновенно реагировать. Максвелл назвал его «демоном». Сейчас можно говорить о весьма совершенной электронно-счетной машине будущего. Обсуждение наших мысленных опытов основано на законах классической механики, а выводы будут не очень утешительными.

Оказывается, выполнение вполне объективных статистических закономерностей зависит от нашего знания точных параметров микрочастиц. Почему нашего? — возразят некоторые, — мы-то не можем знать, но кто-то знает и производит «нарушение» термодинамических законов: совершает «чудеса», подразумевая здесь под кто-то «высшее существо» — бога.

Надобность в «высшем существе» отпадает, так как легко доказать, что никаких «чудес» не происходит, и статистические законы всегда выполняются. Независимо от того, будут ли в сосудах миллиарды миллиардов либо 2—3 частицы, не возможно узнать поведение каждой отдельной частицы.

Значит ли это, что существует нечто принципиально непознаваемое: «вещь в себе»? Материалист не может согласиться с подобным утверждением. Если мы принципиально не можем знать точных параметров движения микрочастиц, то, значит, этих параметров нет. Но тогда все, казалось бы, точные законы движения больших тел являются статистическими законами. Ведь все тела состоят из атомов, молекул, движения которых подчиняются вероятностным закономерностям.

Так ли это на самом деле?



Существует еще ряд явлений, которые классическая механика не смогла удовлетворительно объяснить. Дело касается не только микрочастиц, но и больших тел. Отклонения от законов классической механики существенны при очень больших скоростях тел, сравнимых со скоростью света в вакууме, равной 300 тыс. км/сек.

Речь идет о теории относительности, которая безусловно является темой для другой книги. Но нам нужно вспомнить о некоторых основных законах этой теории, без которых будет трудно понять процессы, происходящие в микромире.

Обратимся опять к опыту. Будем каким-то способом ускорять частицу. При этом мы обнаружим ряд интересных явлений. Какую бы мы энергию ни передавали частице, ее скорость не будет превышать c . Скорость света является предельной для движения всех материальных тел. По мере увеличения скорости частица начинает вести себя как-то странно. Надо затрачивать большую силу, чтобы получить то же

ускорение. А это значит, что масса частицы возрастает. И теория относительности дает закон этого возрастания:

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

где m_0 — масса тела, находящегося в покое, и v — скорость тела.

Если $v = c$, то масса тела равна бесконечности. Но, как мы увидим дальше, все же есть частицы, движущиеся со скоростью света: фотоны и нейтрино. И их масса не равна бесконечности. Это может быть только при одном условии. У этих частиц масса покоя m_0 всегда равна 0. Просто ни фотонов, ни нейтрино не существует, если они движутся со скоростью меньшей, чем c .

Тогда чему равна масса движущегося со скоростью света фотона?

Ответ на этот вопрос дает один из основных законов теории относительности — закон взаимосвязи энергии и массы. Он утверждает, что полная энергия W любого тела равна его массе m , умноженной на квадрат скорости света c^2

$$W = mc^2.$$

Энергия покоящегося тела $W_0 = m_0 c^2$. Так как для фотона $m_0 = 0$, то и $W_0 = 0$. А когда фотон движется, то, зная его энергию ϵ , можно определить и массу

$$m = \frac{\epsilon}{c^2}.$$

Как определить энергию фотона ϵ , мы потом узнаем. Этих сведений из теории относительности нам достаточно для знакомства с миром микрочастиц.

Волны или частицы

Книга — это не лаборатория и не демонстрационный кабинет. Здесь нельзя сделать опыт, а затем проанализировать полученные результаты. Но это не беда. Мы уже проводили опыты и будем продолжать их, обсуждая полученные результаты. Только эти опыты мысленные (но вполне реальные), и они дают нам ответ на часть поставленных нами вопросов.

Прежде всего поставим опыт со светом. Возьмем светонепроницаемую перегородку со щелью, пропустим через щель параллельный пучок света и направим его на экран. Пока щель широкая, мы не замечаем ничего необычного: на эк-

ране появится хорошо очерченное изображение щели той же ширины. Неожиданность ожидает нас, если мы будем сильно уменьшать ширину щели. Изображение щели, вместо того чтобы сжиматься, будет расширяться. Мало того, оно приобретает какую-то полосатую структуру. Если через щель проходит белый свет, то на экране будут чередоваться окрашенные во все цвета радуги полосы. В центре будет яркая белая полоса, а симметрично относительно нее будут находиться более слабо окрашенные полосы. И, как это ни странно, чем уже щель, тем шире полученное нами изображение.

Достаточно знающий читатель заявит, что здесь нет ничего непонятного. Свет — это электромагнитные волны, а явление дифракции, которое мы здесь наблюдаем, всегда сопутствует волновому движению. Объяснение кажется вполне правильным.

Это не совсем так. Сейчас я предложу провести подобный же опыт не со световым, а с параллельным электронным пучком. Вместо источника света я возьму электронную «пушку» (мы легко это умеем делать), а вместо белого экрана люминесцирующую поверхность, примерно такую, какая применяется для телевизионных и осциллографических трубок. Щель надо сделать очень тонкой. Можно взять, например, тонкий слой кристаллического вещества и за ширину такой «щели» считать расстояние между плоскостями, где расположены атомы кристалла. Это не имеет принципиального значения, так как таким же путем получается дифракция рентгеновских лучей: тоже свет, только с очень короткой длиной волны (большой частотой).

Электроны, которые мы считаем обычными частицами, дадут такую же дифракционную картину, которую мы наблюдаем в случае света — электромагнитных волн. Но ведь дифракция есть неотъемлемое свойство волн.

Тогда что такое электроны? Волны или частицы? Оказывается, утверждать, что свет — это только электромагнитные волны, также неверно. Целый ряд явлений, таких, как, например, фотоэлектрический эффект — вырывание электронов светом из поверхности металла — не могут быть объяснены волновыми свойствами света. Опыты показали, что свет состоит из самых настоящих частиц — фотонов, энергия которых зависит от частоты $\epsilon = h\nu$, где h — постоянная Планка (квант действия), равная $6,62 \cdot 10^{-27}$ эрг. секунд, а ν — частота (число колебаний в секунду).

Если мы проведем подобные опыты с любыми элементарными частицами, которых сейчас открыто больше 100, то во всех случаях мы будем наблюдать интерференционные и дифракционные явления. Можно, например, изучать кристаллическое строение тел, пропуская сквозь них нейтроны и

наблюдая получающуюся дифракционную картину. Приписывая нейтронам определенную длину волн, мы можем по дифракционной картине определить, как расположены молекулы и атомы в исследуемом кристалле. Широко применяется электронография для определения структуры поверхности различных металлов и их сплавов.

Итак, элементарные частицы — это волны или частицы?

И волны и частицы, сказал французский физик Луи де Бройль в 1923 году.

Гениальной догадкой Луи де Бройля является следующее утверждение. Не только фотону, но и каждой частице и даже любому большому телу при их движении сопутствует волна с длиной $\lambda = \frac{h}{mv}$, где m и v соответственно масса и скорость частицы.

В докторской диссертации де Бройля его теория обоснована достаточно строго. Но все же крупнейшие физики того времени очень недоверчиво отнеслись к волнам де Бройля. Однако начиная с 1926 года все экспериментальные исследования показали справедливость этой теории. Вначале американские ученые Дэвиссон и Джермер и советский физик Тартаковский, а затем и другие исследователи показали, что электронные пучки ведут себя, как волны с длиной $\lambda = \frac{h}{mv}$.

Не надо думать, что волновые свойства присущи только большим электронным потокам. В 1949 году советский ученый В. А. Фабрикант и другие прямыми экспериментами показали, что эти свойства имеются и у отдельного электрона.

Новое миропонимание

Если частица есть в то же время волна, то отсюда можно сделать очень важные выводы. У волны нет траектории и, следовательно, нельзя говорить о точных значениях координаты и импульса волны. Ведь эти параметры и определяют траекторию движения классической материальной точки. Возьмем, например, параллельный пучок света от Солнца или далекой звезды. Что можно сказать о траектории или координатах этой плоской волны? Они совершенно не определены. Правда, в этом случае направление движения волны, т. е. фотонов, известно точно. Следовательно, вполне определен и импульс фотона.

Но, может быть, можно «уточнить» координату волны, вырезав часть из бесконечно широкого пучка фотонов с помощью узкой щели? В этом случае координаты фотонов уточняются. Они могут быть только в пределах щели, которую мы можем сжимать. Однако как только ширина щели

станет сравнима с длиной волны света, импульс фотонов уже становится неопределенным. Пучки света размываются вследствие дифракции. Следовательно, фотоны, попадающие в различные точки экрана, имеют различные импульсы. Все, что сказано здесь о фотонах, можно отнести к электронам и другим элементарным частицам.

Читатель может подумать, что изменение импульса у частиц есть результат их взаимодействия с дифракционной щелью. Но это неверно. Классические частицы никогда не дают дифракционной картины, проходя через узкую щель. В какой-то степени щелью для пули является отверстие ствола ружья. Если стрелять из закрепленного ружья по бумажной мишени, можно наблюдать разброс пули. Этот разброс определяется случайным отклонением в заряде патрона, формой пули, колебанием ствола и т. п. Но рисунок разброса пули (как бы много их ни выпускали) не имеет ничего общего с дифракционной картиной. Дифракционные явления всегда связаны с волновыми процессами.

Итак, у микрочастиц нет одновременно точных значений координат и импульса.

Немецкий физик Гейзенберг, независимо от де Бройля, пришел к тому же выводу и показал, что неопределенность в импульсе Δp и неопределенность в координате Δx для частиц связаны между собой количественным соотношением

$$\Delta x \cdot \Delta p = h.$$

Это выражение является основным законом новой механики микромира — квантовой механики. Если мы хотим точнее определить координату частицы x , то для этого придется так воздействовать на частицу, что ее импульс p (скорость) становится очень неопределенным: Δp возрастает. И наоборот, уточняя импульс (скорость) частицы ($p = mv$), мы тем самым делаем более неопределенной ее координату x : Δx увеличивается.

Было показано, что как волновая теория де Бройля, так и принцип неопределенности приводят к одному и тому же результату — к новой механике. Квантовая механика не опровергает ни классической механики, ни законов Ньютона; она лишь ограничивает их применимость большими телами. При движении больших тел можно не считаться с принципом неопределенности Гейзенберга, так как неточность наших измерений значительно больше кванта действия. В этом случае тело движется по определенной траектории, описываемой законами классической механики.

Однако каждая микрочастица большого тела траектории все же не имеет. Поэтому можно утверждать, что законы классической механики — это статистические законы, описы-

вающие усредненное движение большого числа элементарных частиц. И вот опять физики пришли к статистике!

Но в отличие от классической квантовая статистика не определяется нашим незнанием точных параметров каждой частицы. Просто таких параметров у элементарных частиц нет. Это серьезное изменение наших физических представлений об окружающем нас мире! В микромире точные законы движения заменяются вероятностными, статистическими законами. Конечно, причинность в квантовой механике сохраняется. Но она приобретает другой, вероятностный характер. Мы не можем теперь сказать, что такая-то причина вызывает только определенное следствие. Нужно говорить о том, что эта причина с такой-то вероятностью приведет к этому следствию. Применение квантовых законов к большим телам приводит нас к классической механике.

Что такое элементарные частицы?

Сейчас уже насчитывается больше ста элементарных частиц, и предполагается, что их существует значительно больше. Читатель вправе выразить недоумение: какие же это элементарные частицы, если их так много? По-видимому, слово «элементарные» означает относительное понятие, соответствующее нашему уровню знания о природе материи.

В свое время атомы считались элементарными и неделимыми частицами вещества. Но скоро физики узнали, что они состоят из других, более «простых» частиц. Затем оказалось, что и эти частицы весьма сложные.

Около ста лет назад Менделеев составил периодическую систему химических элементов. Он обнаружил определенную симметрию в атомах различных химических элементов. Великий ученый в то время не знал, откуда происходит эта симметрия, но это не помешало ему оставить в периодической системе пустые клетки, заполнив их гипотетическими элементами с совершенно определенными свойствами. Многие из этих элементов были обнаружены уже при жизни Менделеева.

Так сейчас обстоит дело и с элементарными частицами. Физики подметили определенную симметрию в свойствах и способах взаимодействия с другими частицами. Они составили таблицы, в которых было обнаружено много свободных мест. Эти места сейчас заполняются предполагаемыми частицами с известными свойствами. Экспериментаторы в своих исследованиях находят эти недостающие частицы. Хотя пока и остаются пустые клетки в таблице элементарных

частиц, существует достаточно обоснованная уверенность, что эти клетки будут заполнены вновь открытыми элементарными частицами. Например, не так давно была обнаружена одна из предсказанных частиц: ω — минус — гиперон.

Несколько слов о том, как открываются новые частицы. Последние рождаются при взаимодействии уже известных элементарных частиц. Но для этого они должны обладать большой энергией. Ведь если масса частицы m_0 , то для ее образования необходима энергия:

$$W_0 = m_0 c^2.$$

Дело осложняется еще и тем, что не вся энергия переходит к новой частице: большая часть остается у взаимодействующих частиц. Частицы с большой энергией очень редко можно найти в космических лучах, приходящих на Землю из далеких звездных скоплений. В последние годы большинство вновь открытых частиц получено на мощных ускорителях заряженных частиц в Советском Союзе, Швейцарии и США. Однако физикам приходится все трудней и трудней, и для того, чтобы заполнить пустые места в систематике элементарных частиц, приходится строить еще более мощные и дорогостоящие ускорители.

Силы, действующие в природе

Взаимодействие как больших тел, так и микрочастиц определяется действующими между ними силами.

В настоящее время все силы, действующие в природе, могут быть сведены к четырем типам сил. Из них самыми большими являются ядерные силы, так называемое сильное взаимодействие. Они действуют между тяжелыми элементарными частицами — барионами. К барионам относятся протоны и нейтроны, из которых состоят ядра атомов всех химических элементов. Следующими по величине являются электромагнитные силы, действующие между всеми частицами, обладающими электрическими зарядами. Они на 2—3 порядка слабее ядерных сил. Эти силы действуют, например, в атоме между положительно заряженным ядром и отрицательным электроном. Еще более слабыми являются так называемые силы слабого взаимодействия. Мы знаем о них очень мало, и проявляются они лишь при распаде различных элементарных частиц на другие частицы. При этом распаде всегда появляется очень легкая частица — нейтрино, о которой рассказано будет ниже. Величина сил слабого взаимодействия в десятки миллиардов раз меньше ядерных сил.

Наконец, с четвертым типом сил — гравитационными силами — мы давно знакомы. Мы их всегда ощущаем в виде

силы тяжести — веса. Но вместе с тем это — самые слабые силы в природе. Они примерно в 10^{40} раз меньше сильного взаимодействия. В микромире, о котором мы рассказываем, с такими силами можно, по-видимому, совсем не считаться.

Такая классификация сил может показаться, на первый взгляд, странной. Читатель может недоуменно спросить: а куда же отнести, например, силу, которую развивает двигатель внутреннего сгорания — автомобильный двигатель? Однако здесь все разрешается просто. Горение — это химическая реакция, приводящая к перестройке молекул. В молекулах между атомами действуют электромагнитные силы. Таким образом силы автомобильного двигателя являются электромагнитными силами.

В атомном двигателе, ядерном реакторе работу производят ядерные и электромагнитные силы. Для использования сил слабого взаимодействия можно взять радиоактивное вещество, в ядрах которого происходит превращение нейтрона в протон. При этом вылетают быстрые электроны, энергия которых переходит в энергию электрического тока в специальных батареях. Что касается гравитационных сил, то они весьма широко нами используются в гидроэлектростанциях, где падающая под действием сил тяжести вода приводит в движение турбогенераторы.

Физики давно делают попытки свести все силы поля, действующие в мире, к единому универсальному полю. Но эти попытки пока не приводят к желаемым результатам. Пожалуй, наоборот, за последние годы число различных типов сил прибавилось. Ведь несколько более 30 лет назад мы ничего не знали о сильном и слабом взаимодействии, и все процессы в природе объясняли действием гравитационных и электромагнитных сил. Однако для объяснения явлений, происходящих в микромире, оказалось необходимым ввести еще два новых типа сил,

Обменные силы

Читатель уже, конечно, понял, что вопрос о силах был поднят не зря. Он имеет самое прямое отношение к элементарным частицам.

Электромагнитное поле (или волна) — одна из форм материи. Но мы уже знаем, что с ним непосредственно связаны фотоны. Если заряженная частица образует вокруг себя электромагнитное поле, то это значит, что она непрерывно испускает и поглощает фотоны — кванты электромагнитного поля.

Но ведь заряженная частица обладает определенной энергией. Энергией обладает и фотон. Тогда как быть с зако-

ном сохранения энергии? Весь накопленный наукой и практикой огромный опыт говорит о строгом выполнении этого закона в природе. А заряженная частица, испускающая и поглощающая фотоны, произвольно, хоть и временно, меняет свою энергию. Но оказывается, если учесть законы квантовой механики, с сохранением энергии все обстоит благополучно. На этом придется остановиться подробнее.

Читатель, знакомый с радиотехникой, знает, что если радиосигнал имеет длительность Δt , то частота передатчика ν не может быть строго фиксирована. Она расплывается тем больше, чем короче длительность сигнала Δt . По той же причине для того, чтобы приемник принимал неискаженные сигналы, его избирательность по частоте не может быть очень узкой. Ширина полосы пропускания по частоте должна быть не меньше $\Delta \nu$.

При этом: $\Delta \nu, \Delta t \geq 1$. Умножив обе части равенства на постоянную Планка h , получим $\Delta \nu \cdot h \Delta t \approx h$. Но

$$\Delta \nu h = \Delta W,$$

поэтому $\Delta W \cdot \Delta t \approx h$.

Это несколько другая формулировка принципа неопределенности Гейзенберга. Легко показать, что это соотношение действительно не только для квантов электромагнитного поля, но и для любой частицы.

Таким образом, любая элементарная частица (либо состоящее из них большое тело) может без нарушения закона сохранения энергии испускать другие частицы с энергией ΔW на время Δt . Разумеется, что в величину ΔW входит и масса испускаемых частиц. Чем меньше ΔW , тем больше промежуток времени Δt между испусканием и поглощением частицы.

В случае электромагнитного взаимодействия обменные частицы — это фотоны, масса покоя которых равна нулю. Поэтому энергия фотонов может быть как угодно мала. Это обстоятельство объясняет дальное действие сил электромагнитного взаимодействия. При очень малом ΔW Δt может быть очень велико, и фотон, двигающийся со скоростью $3 \cdot 10^{10}$ см/сек, пройдет большое расстояние.

Таким образом, при электромагнитном взаимодействии заряженные частицы (или тела) непрерывно обмениваются между собой фотонами с энергией ΔW и временем жизни Δt . Значение энергии и времени жизни таких частиц, называемых «виртуальными», ограничивается принципом неопределенности. Испускание виртуальных частиц не противоречит законам сохранения.

Вопрос о том, являются ли виртуальные частицы настоящими с точки зрения современной физики, не имеет смысла. Точно так же, как мы видели раньше, бессмысленно говорить о траектории микрочастиц и о точных значениях ряда

параметров. Мы несколько не сомневаемся в материальности сил электромагнитного воздействия, а они обусловлены виртуальными фотонами. Эти силы так и называются «обменными». Их природа не очень наглядна. Но что поделаешь! Ведь волна-частица также весьма непредставима, но она правильно отражает свойства микрочастиц.

Так называемые химические силы (которые в конечном счете являются электромагнитными) также имеют обменный характер. Возьмем, например, ион молекулы водорода. В такой молекуле два положительно заряженных ядра (протона) и один отрицательный электрон. Этот ион является вполне устойчивым образованием, и сила, которая определяет его устойчивость, связана с взаимодействием двух протонов с одним общим электроном. По-видимому, можно считать, что электрон движется то вокруг одного, то вокруг другого протона. В конечном же счете, как мы уже знаем, взаимодействие заряженных частиц электронов и протонов определяется обменом виртуальных фотонов.

Конечно, если заряженная частица по каким-либо причинам скачком изменяет свою энергию, то эту энергию она передаст уже не виртуальному, а обычному свободному фотону: излучаются электромагнитные волны.

В отличие от виртуального, значения энергии и времени жизни свободного фотона не связаны с принципом неопределенности. Такой фотон может жить в вакууме (без взаимодействия с другими частицами) бесконечно долго. Так, свет от далекой звезды идет к нам миллионы лет. Как мы увидим позже, уменьшение энергии электрона в атоме приводит к излучению квантов света с различной длиной волны.

В 1935 году японский физик Юкава пришел к выводу, что ядерные силы (сильное взаимодействие) имеют также обменный характер. Они могут быть объяснены обменом сравнительно тяжелых частиц — виртуальных мезонов.

Зная, что расстояние, на котором действуют ядерные силы около 10^{-13} см, можно, пользуясь принципом неопределенности, определить массу покоящегося мезона. Она оказалась равной приблизительно 300 электронных масс.

Если сильно взаимодействующие частицы, например протоны и нейтроны, будут иметь достаточную энергию, то они могут испустить не виртуальный, а свободный мезон.

Очень скоро, уже в 1937 году, частицы с подходящей массой были открыты в космических лучах. Но радость физиков была преждевременной. Новые частицы — мю-мезоны — практически не взаимодействовали с протонами и нейтронами. Поэтому они не могли быть теми частицами, которые осуществляют сильное взаимодействие.

Прошло десять лет, прежде чем физики обнаружили частицы ядерного взаимодействия. Ими оказались три сорта

пи-мезонов: положительный, отрицательный и нейтральный. Заряженные пи-мезоны живут сравнительно недолго: около 10^{-8} сек. Затем обычно превращаются в нейтрино и мю-мезоны. Последние в среднем через 10^{-6} сек. исчезают с образованием электронов и нейтрино. Образно говоря, пи-мезоны большую часть своей жизни проводят в виде мю-мезонов. Поэтому их было крайне трудно обнаружить в космических лучах. Но в настоящее время пи-мезоны в очень большом количестве получают на ускорителях. Они образуются при бомбардировке быстрыми протонами различных ядер. Что же происходит при такой ядерной катастрофе?

Пи-мезоны (заряженные и нейтральные) всегда имеются возле протонов и нейтронов. Благодаря обмену этими виртуальными частицами осуществляется ядерная связь (сильное взаимодействие). Мало того, даже свободный нуклон (общее название протонов и нейтронов) непрерывно испускает и поглощает пи-мезоны. Принцип неопределенности не разрешает виртуальной частице удалиться на время, большее чем 10^{-23} сек. А за это время пи-мезон может уйти лишь на расстояние порядка 10^{-13} см. Эта длина и определяет радиус действия ядерных сил. Таким образом, протон или нейтрон всегда окружен «атмосферой» различных пи-мезонов. Если мы передадим нуклону при бомбардировке заряженными частицами достаточную энергию, то пи-мезон может вылететь очень далеко уже в качестве не виртуальной, а свободной частицы. Величину энергии, необходимую для «освобождения пи-мезона», легко подсчитать, если учесть формулу $W_0 = m_0 c^2$, где m_0 в данном случае масса покоя пи-мезона, приблизительно равная 270 электронных масс. Эти расчеты показывают, что бомбардирующая частица должна иметь энергию около 140 мэв. На самом деле нужно несколько больше, так как значительная доля энергии, бомбардирующей частицы, обычно передается нуклону и связанному с ним атомному ядру. Кроме того, для обнаружения пи-мезона хотя бы по следу в фотоэмульсии надо, чтобы он обладал кинетической энергией, т. е. двигался достаточно быстро. Ведь живет он всего 10^{-8} сек.!

Для получения небольшого количества пи-мезонов можно использовать ускорители с энергией заряженных частиц около 300 мэв. Но мощные пучки таких частиц получают на ускорителях с энергией в миллиарды электрон-вольт.

Сейчас известны еще и другие мезоны, осуществляющие сильное взаимодействие между тяжелыми частицами (барионами), например, ка-мезоны — частицы, масса которых составляет около 1000 электронных масс, а время жизни порядка 10^{-8} сек. Они тяжелее пи-мезонов, и поэтому радиус действия сил, осуществляемых ка-мезонами, значительно меньше. Для получения свободных ка-мезонов различных ти-

нов нужны ускорители с энергией в несколько миллиардов электрон-вольт.

По-видимому, любые мезоны, как уже открытые, так еще не известные, связаны с сильным взаимодействием. Исключение составляют мю-мезоны. Эти частицы были названы мезонами только потому, что их масса является средней между массой нуклона и электрона. Как выяснилось позже, мю-мезоны никакого отношения к семейству мезонов не имеют, а скорей по своим свойствам напоминают электроны.

Фотоны и мезоны объясняют электромагнитные силы и сильное взаимодействие. А как же обстоит дело с другими силами: гравитационными и слабым воздействием? Физики уверены, что и эти силы носят обменный характер. Но соответствующие гипотетические частицы, например гравитоны, до сих пор не обнаружены.

Античастицы

Мир, окружающий нас, мог бы быть очень простым. Для его объяснения, казалось, было бы достаточно всего лишь семи частиц. В самом деле атомные ядра состоят из протонов и нейтронов. Эти частицы (нуклоны) связаны между собой ядерными силами, которые вызываются тремя типами пи-мезонов. Таким образом, для образования ядер нужно пять частиц. Но ядро имеет положительный заряд, и чтобы получить нейтральный атом, необходима оболочка, состоящая из отрицательных электронов. Ядро и электроны связаны электромагнитными силами, происхождение которых связано виртуальным фотонам. Электромагнитное излучение — свободные фотоны — получается при изменении энергий электронов в атоме. Таким образом, только семь частиц!

Но такого «простого» микромира не существует! Физики обнаружили сначала на бумаге, в виде математических выражений, а затем и в экспериментах, что должен существовать другой микромир, как бы противоположный нашему «привычному» миру. Вещество в этом мире должно состоять из античастиц: антипротонов, антинейтронов и антиэлектронов (позитронов). Чем же отличаются они от «обычных» частиц? Прежде всего электрическим зарядом: «родственные» частицы противоположны по знаку этого заряда. Так, антипротоны имеют отрицательный заряд, равный по величине положительному заряду протона, а позитрон (антиэлектрон) — положительный. Но этого различия явно недостаточно. Все остальные свойства: масса, собственный момент количества движения (спин), время жизни одни и те же как у частиц, так и у античастиц. Чем же отличаются друг от

друга нейтрон и антинейтрон? Ведь это незаряженные частицы.

Для того чтобы понять, в чем заключается различие частиц и античастиц, нам полезно обратиться к некоторой наглядной аналогии. Если соединить между собой два металлических шара с равными и противоположными зарядами, то, как следует из школьного курса физики, заряды компенсируются и заряд каждого шара станет равным нулю. Но при этом общее число заряженных частиц — электронов, которые и определяют заряды шаров, не изменилось. Просто часть электронов из отрицательно заряженного тела перейдет на положительное. Заряженные частицы при таких операциях не уничтожаются и не возникают. То же самое произойдет, если мы к положительному протону присоединим электрон. Заряженные частицы не исчезнут, они будут мирно сосуществовать в нейтральном атоме водорода. Физики говорят, что во всех процессах в природе действует закон сохранения электрического заряда.

А что произойдет, если встретятся друг с другом частица и античастица: например, электрон и позитрон? Это столкновение отнюдь не носит мирный характер. В соответствии с законом сохранения электрического заряда появляются нейтральные частицы — фотоны. Но здесь же и исчезают оба электрона. Это явление носит название аннигиляции (уничтожения) и оно случается при встрече любой пары: частицы со всей античастицей. Энергия, выделяющаяся в этом процессе, зависит от массы частиц. Например, масса покоя каждого из электронов соответствует энергии 0,51 мэв и при аннигиляции медленно движущихся электрона и позитрона получаются гамма-кванты (фотоны) с общей энергией 1,02 мэв. Конечно, если частицы будут быстро двигаться, то энергия фотонов соответственно будет больше, в полном согласии с законом сохранения энергии.

При аннигиляции нуклонов (протона и антипротона или нейтрона и антинейтрона) выделяется очень большая энергия: около 2 миллиардов электрон-вольт. Здесь обычно получаются различные пи-мезоны, и выделяющаяся энергия сосредоточена в массе покоя и энергии движения этих частиц.

Термин «аннигиляция» (уничтожение) нельзя признать удачным. Из того, что было сказано, видно, что аннигиляция никоим образом не является уничтожением материи. Такого процесса в природе вообще не может быть. При аннигиляции частицы с античастицей сохраняется и энергия и масса (только не масса покоя).

Нейтрализация есть компенсация противоположных электрических зарядов. Напрашивается аналогия, заключающаяся в том, что аннигиляция частиц с античастицами есть также уничтожение разных по знаку, но уже других, незлектриче-

ских, зарядов. И физики приписывают такие заряды различным частицам: барионные — тяжелым частицам (например, нуклонам) и лептонные — электронам. Основное различие между частицами и античастицами в том, что они обладают противоположными барионными или лептонными зарядами. Таким образом, например, нейтрон и антинейтрон несут с собой разные барионные заряды и при встрече аннигилируют. В результате получаются частицы, барионный заряд которых равен нулю. Мы вернемся к этому вопросу в разделе, посвященном законам сохранения. Нужно только помнить, что барионные или лептонные заряды никакого отношения (кроме некоторой аналогии) к электрическим зарядам не имеют. Любые барионы (тяжелые частицы) или лептоны (легкие частицы) обладают соответственным зарядом независимо от того, несут они электрический заряд или нет.

К лептонам надо причислять также и нейтрино, участвующие в различных превращениях частиц при слабых взаимодействиях. Эти частицы долгое время были гипотетическими. Они были «придуманы» лишь для того, чтобы в ряде превращений ядер и элементарных частиц выполнялись законы сохранения. Не так давно физики их обнаружили экспериментально. Это сделать было нелегко. Ведь нейтрино не имеет электрического заряда, не является квантом электромагнитного поля, и масса покоя ее равна нулю (так же, как у фотона).

Античастицы есть также и у мезонов. Так, отрицательный пи-мезон является античастицей положительного. Нет античастиц у фотона и нейтрального мезона. Но можно считать также, что у этих частиц античастицы не отличаются от своих сородичей.

Все, что нас окружает и мы сами, состоит в основном из частиц, хотя некоторые античастицы (отрицательный пи-мезон, позитрон и антинейтрино) и участвуют в ядерных процессах. Мы не знаем, случайно ли это либо связано с какой-нибудь еще не известной нам закономерностью. Сейчас нет пока ничего, что мешало бы существованию другого мира, состоящего из античастиц. В антимире ядра должны состоять из антипротонов и антинейтронов и иметь отрицательный электрический заряд. Вокруг антиядер в антиатомах вместо электронов двигаются положительные позитроны. Внешне в этом антимире все обстоит так, как у нас. Периодическая система Менделеева содержит все те же элементы с приставкой «анти»: антиводород, антигелий, антижелезо и т. д. Они вступают в связь между собой, образуя те же химические соединения, излучают тот же спектр света, что и обычные атомы. Ведь антифотонов нет.

Поэтому возможно, что часть звезд или галактик, которые мы видим на нашем небосводе, состоит из античастиц:

представляет собой далекие антимирь. Может быть, ответ на поставленные здесь вопросы даст в будущем так называемая нейтринная астрономия, призванная изучать нейтринные потоки от солнца, звезд и галактик. Физики приступили к решению этой весьма трудной задачи.

Странные частицы

Вернемся теперь к вопросу о том, из каких же все-таки частиц состоит весь мир. Теперь уже можно говорить не о семи, а, по-видимому, о двенадцати частицах и античастицах. Их можно свести в табл. 1.

Итак, как будто бы набор строительных материалов для вселенной найден. Конечно, нужны частицы для объяснения гравитационных сил. Физики твердо уверены, что такие частицы — гравитоны — существуют. Они не имеют массы покоя и заряда, не взаимодействуют с элементарными частицами, не участвуют, по-видимому, в их превращениях. Поэтому гравитоны будет обнаружить значительно трудней, чем нейтрино. Но результат обмена этими частицами налицо. Любые тела притягиваются гравитационными силами. Можно думать, что имеются и частицы, ответственные за силы слабого взаимодействия. Их мы также не видим в табл. 1.

Если не учитывать двух, еще недостающих свойства частиц, перечисленных в табл. 1, объясняют все явления, происходящие в микромире.

Все вещества состоят из атомов и молекул. В их состав входят ядра и электроны. Электромагнитные силы, для объяснения которых нужны фотоны, обеспечивают прочность атомов и молекул. Атомные ядра в свою очередь состоят из нейтронов и протонов. Ядерные силы объясняются обменом пи-мезонов. В различных превращениях ядер, о которых будет рассказано позже, протон может превратиться в нейтрон, или нейтрон в протон. При этом ядра будут излучать электроны и нейтрино. Кроме того, как теперь известно, природа устроена так, что должно существовать и антивещество, состоящее из античастиц. Перечисление явлений, обнаруживаемых в микромире, можно продолжить. Однако ни один из известных нам сейчас законов микромира не требует других частиц. Они просто не нужны.

Но ведь нам далеко не все известно! То, что мы знаем, это лишь ступень в бесконечном процессе познания. И как бы подтверждая это известное положение диалектического материализма, природа оказалась значительно сложнее. Приборы экспериментаторов регистрировали большое количество, казалось бы, «ненужных» и негодных в качестве «строительного материала» элементарных частиц.

Напомню, что в 1937 году в космических лучах были най-

Таблица 1

№ п/п	Семейство частиц	Наименование частиц	Обозначения	Масса покой в электронных массах	Спин в един. $\frac{h}{2\pi}$	Электрический заряд в электронных зарядах	Бар- онный заряд	Лептон- ный заряд	Время жизни в сек.
1	Фотон	Фотон	γ	0	1	0	0	0	Устойчивая
2	Лептоны	Нейтрино	ν	0	$1/2$	0	0	+1	\gg
3		Антинейтрино	$\bar{\nu}$	0	$1/2$	0	0	-1	\gg
4		Электрон	e^-	1	$1/2$	-1	0	+1	\gg
5		Позитрон	e^+	1	$1/2$	+1	0	-1	\gg
6	Мезоны	Пи-мезон положительный	π^+	273,2	0	+1	0	0	$2,5 \cdot 10^{-8}$
7		Пи-мезон отрицательный	π^-	273,2	0	-1	0	0	$2,5 \cdot 10^{-8}$
8		Пи-мезон нейтральный	π^0	264,2	0	0	0	0	$2,3 \cdot 10^{-16}$
9	Барионы	Протон	p	1836,1	$1/2$	+1	+1	0	Устойчивая
10		Антипротон	\bar{p}	1836,1	$1/2$	-1	-1	0	\gg
11		Нейтрон	n	1838,7	$1/2$	0	+1	0	1010,0
12		Антинейтрон	\bar{n}	1838,7	$1/2$	0	-1	0	1010,0

Таблица 2

№ п/п	Семейство частиц	Наименование частиц	Обоз- наче- ния	Масса покоя в электр. массах	Спин в едини- цах $\frac{h}{2\pi}$	Электр. заряд в зарядах	Барон- ный за- ряд	Лептонный заряд (электрон)	Лептонный заряд (мюонный)	Стран- ность	Время жизни в сек.
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	Фотон	Фотон	γ	0	1	0	0	0	0	0	Устойчивая
2	Лептоны Электронные	Нейтрино электрон.	$\bar{\nu}_e$	0	$\frac{1}{2}$	0	0	+1	0	0	»
3		Антинейтрино электрон.	ν_e	0	$\frac{1}{2}$	0	0	-1	0	0	»
4		Электрон	l^-	1	$\frac{1}{2}$	-1	0	+1	0	0	»
5		Позитрон	l^+	1	$\frac{1}{2}$	+1	0	-1	0	0	»
6	Лептоны Мюонные	Нейтрино мюонные	$\bar{\nu}_\mu$	0	$\frac{1}{2}$	0	0	0	+1	0	»
7		Антинейтрино »	ν_μ	0	$\frac{1}{2}$	0	0	0	-1	0	»
8		Мю-мезон отрицательный	μ^-	206,8	$\frac{1}{2}$	-1	0	0	+1	0	$2,2 \cdot 10^{-6}$
9		Мю-мезон положительный	μ^+	206,8	$\frac{1}{2}$	+1	0	0	-1	0	$2,2 \cdot 10^{-6}$
10	Мезоны	Пи-мезон положитель.	π^+	273,2	0	+1	0	0	0	0	$2,5 \cdot 10^{-8}$
11		Пи-мезон отрицат.	π^-	273,2	0	-1	0	0	0	0	$2,5 \cdot 10^{-8}$
12		Пи-мезон нейтральный	π^0	264,2	0	0	0	0	0	0	$2,3 \cdot 10^{-16}$
13		Ка-мезон положит.	K^+	966,6	0	+1	0	0	0	± 1	$1,2 \cdot 10^{-8}$
14		Ка-мезон отрицат.	K^-	966,6	0	-1	0	0	0	-1	$1,2 \cdot 10^{-8}$
15		Ка-мезон нейтрален.	K^0	974,2	0	0	0	0	0	+1	$K^0, \sim 10^{-10}$
16		Анти-ка-мезон нейтрален.	\bar{K}^0	974,2	0	0	0	0	0	-1	$\bar{K}^0, \sim 6 \cdot 10^{-8}$

Продолж. табл. 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
17	Барiony	Протон	$\frac{p}{p}$	1836,1	$\frac{1}{2}$	+1	+1	0	0	0	Устойчивая
18		Антипротон	$\frac{p}{p}$	1836,1	$\frac{1}{2}$	-1	-1	0	0	0	»
19		Нейтрон	$\frac{n}{n}$	1838,7	$\frac{1}{2}$	0	+1	0	0	0	1010,0
20		Антинейтрон	$\frac{n}{n}$	1838,7	$\frac{1}{2}$	0	-1	0	0	0	1010,0
21		Ламбда-гиперон	Λ^0	2182,8	$\frac{1}{2}$	0	+1	0	0	-1	$2,5 \cdot 10^{-10}$
22		Антиламбда-гиперон	$\bar{\Lambda}^0$	2182,8	$\frac{1}{2}$	0	-1	0	0	+1	$2,5 \cdot 10^{-10}$
23		Сигма-гиперон положит.	Σ^+	2327,7	$\frac{1}{2}$	+1	+1	0	0	-1	$8,1 \cdot 10^{-11}$
24		Анти-сигма-гиперон положительный	$\bar{\Sigma}^+$	2327,7	$\frac{1}{2}$	-1	-1	0	0	+1	$8,1 \cdot 10^{-11}$
25		Сигма-гиперон отрицательный	Σ^-	2340,6	$\frac{1}{2}$	-1	+1	0	0	-1	$1,6 \cdot 10^{-10}$
26		Анти-сигма-гиперон отрицательный	$\bar{\Sigma}^-$	2340,6	$\frac{1}{2}$	+1	-1	0	0	+1	$1,6 \cdot 10^{-10}$
27		Сигма-гиперон нейтральный	Σ^0	2331,8	$\frac{1}{2}$	0	+1	0	0	-1	$1 \cdot 10^{-11}$
28		Анти-сигма-гиперон нейтральный	$\bar{\Sigma}^0$	2331,8	$\frac{1}{2}$	0	-1	0	0	+1	$1 \cdot 10^{-11}$
29		Кси-гиперон отрицательный	Ξ^-	2580,2	$\frac{1}{2}$	-1	+1	0	0	-2	$1,7 \cdot 10^{-10}$
30		Анти-кси-гиперон отрицательный	$\bar{\Xi}^-$	2580,2	$\frac{1}{2}$	+1	-1	0	0	+2	$1,7 \cdot 10^{-10}$
31		Кси-гиперон нейтральный	Ξ^0	2566,0	$\frac{1}{2}$	0	+1	0	0	-2	$3 \cdot 10^{-10}$
32		Анти-кси-гиперон нейтральный	$\bar{\Xi}^0$	2566,0	$\frac{1}{2}$	0	-1	0	0	+2	$3 \cdot 10^{-10}$
33		Омега-гиперон отрицательный	Ω^-	3290,0	$\frac{3}{2}$	-1	+1	0	0	-3	$7 \cdot 10^{-11}$
34		Анти-омега-гиперон отрицательный	$\bar{\Omega}^-$	3290,0	$\frac{3}{2}$	+1	-1	0	0	+3	$7 \cdot 10^{-11}$

* Нейтральные ка-мезоны (K_0 и \bar{K}_0) состоят из смеси K_0^0 и \bar{K}_0^0 и имеют разное время жизни.

дены отрицательные и положительные мю-мезоны. Сейчас мы уже не причисляем их к семейству мезонов (хотя это название за ними сохранилось). Они не выполняют функцию связующего звена в сильных взаимодействиях, как, например, пи-мезоны. Мю-мезоны ведут свою, сравнительно изолированную, жизнь, не принимая, насколько нам пока известно, никакого участия в строении вещества. Правда, они являются некоторой ступенью при превращениях пи-мезонов. Пи-мезон обычно превращается в мю-мезон и нейтрино, а затем уже мю-мезон распадается на электрон и нейтрино. Но это можно рассматривать как некоторую «причуду» природы. Ведь вполне возможно превращение пи-мезона прямо в электрон и нейтрино, что, кстати, иногда и происходит.

Однако таких «причудливых» частиц оказалось много. В начале пятидесятых годов физики обнаружили целую серию новых элементарных частиц.

Среди них имеются гипероны — частицы с массой, большей, чем нуклон. Их следует отнести к семейству барионов. Были открыты также и ка-мезоны с массой около 1000 элементарных масс. Новые частицы получили название «странных». Они действительно оказались странными, и наибольшее удивление вызвал сам процесс их рождения. Рождаются они только при сильных взаимодействиях и всегда в компании с еще одной или несколькими странными частицами. Никогда не бывает так, чтобы в результате, например, бомбардировки быстрыми протонами других протонов (или ядер) рождалась одна странная частица. Их всегда получается две или больше. Получается так, как будто бы при их рождении должна сохраняться некая неизвестная величина. Она была введена физиками совершенно формально и названа «странностью». Мы пока не знаем, что это такое, но если приписать частицам различное значение странности, то закон сохранения этой величины может объяснить их коллективное рождение. В качестве примера возьмем столкновение двух протонов, странность которых равна нулю. В результате этого взаимодействия должны рождаться частицы, сумма странностей которых будет также равна нулю. Так это и есть:

протон + протон \rightarrow протон + лямбда-гиперон + ка-плюс-мезон.

Если приписать лямбда-гиперону странность (-1) , а ка-плюс-мезону $(+1)$, то странность сохраняется. Не было обнаружено ни одного случая нарушения закона сохранения странности при рождении элементарных частиц.

Теперь мы можем значительно расширить таблицу элементарных частиц (табл. 2).

Эта таблица значительно представительней предыдущей. В ней перечислено уже 34 элементарные частицы, разделенные на пять семейств. Античастицы следуют сразу за части-

цей. Обратите внимание! Только у двух частиц нет античастиц: у фотона и нейтрального пи-мезона. Это так называемые истинно нейтральные частицы. Они лишены всякого заряда: электрического, барионного и лептонного. Вместе с тем это разные частицы, и они выполняют различные функции в природе. Фотоны обеспечивают электромагнитное взаимодействие, а мезоны — сильное.

Хотя нам еще не ясна роль мю-мезонов, мы вынуждены теперь относить их к отдельному, мюонному семейству. По своим свойствам они напоминают электроны, но обладают своим собственным мюонным зарядом. Открытые недавно мюонные нейтрино ничем, кроме заряда (мюонного), не отличаются от своих собратьев. Но при образовании и превращении мю-мезонов появляются именно мюонные нейтрино и антинейтрино.

Большая группа странных частиц — гиперонов представлена семейством барионов. Все они имеют массу большую, чем протоны и нейтроны (это тоже барионы) и по этой причине должны очень быстро (10^{-22} — 10^{-23} сек.) распадаться. Ведь с увеличением массы покоя растет внутренняя энергия частицы, что приводит к ее неустойчивости. Устойчивыми частицами в семействе барионов являются только протон и антипротон. Они самые легкие и им не на что распасться, так как барионный заряд при распаде должен сохраняться. Нейтрон лишь на 1% тяжелее и то уже неустойчив. Что же говорить тогда о гиперонах: они намного массивнее. Но гипероны спасаются от быстрой смерти только благодаря своей странности; вернее, квантовому числу, носящему наименование «странности». Подробней об этом в следующем разделе. Такое положение в мире элементарных частиц наводит на мысль, что список, приведенный в табл. 2, далеко не полный. Должны существовать частицы, которые, не обладая странностью гиперонов, исчезают столь быстро, что мы не успеваем заметить их в физическом приборе. Ведь если время жизни частицы 10^{-23} сек., то даже двигаясь со скоростью света, она сдвинется с места своего рождения всего лишь на 10^{-13} см. Безнадежно искать след этой частицы в фотоэмульсии или в пузырьковой камере.

Но физики все же научились регистрировать такие частицы. И вот в шестидесятых годах была открыта большая серия коротко живущих частиц — призраков, которые были названы резонансными частицами, или, короче, «резонансами». Число резонансов уже перевалило за 100, а физики все открывают новые.

Если читатель думает, что резонансы это частицы низшего сорта по сравнению, например, с гиперонами, то он ошибается. Просто резонансы обладают несколькими другими свойствами: либо очень большой массой, либо малой странностью.

В результате они могут распадаться за счет очень быстрого сильного взаимодействия, что и осуществляется. Такой возможности нет у странных частиц, они «умирают» в результате медленного слабого взаимодействия и живут сравнительно долго.

Среди резонансов, таблицу которых мы приводить не будем, есть и мезоны и барионы. В табл. 2 нет схем распада элементарных частиц. Их можно найти в специальной литературе. Здесь важно подчеркнуть, что процесс превращения и взаимодействия элементарных частиц неоднозначен. Мы не можем знать, сколько и каких частиц получится в результате. Даже если обнаружится несколько определенных частиц в конце процесса, то нельзя утверждать, что никаких других частиц в нем не участвовало. Эти частицы могли появиться на очень короткое время, а затем исчезнуть, давая жизнь другим частицам. Тут могут быть «резонансы» или пары: частицы и античастицы, которые, почти не сходя с места, аннигилируют. Значит ли это, что при превращении могут быть какие угодно частицы? Нет, это не так! Нельзя сказать, что рождение и превращение частиц не подчиняются никаким законам. Но законы, действующие в микромире, определяют лишь вероятностный характер явлений. Вероятность одних превращений равна 0, других — очень мала или велика. Лишь иногда вероятность каких-либо превращений становится равной единице, т. е. достоверности. В этом случае результат превращения всегда один и тот же.

Впервые физики столкнулись с вероятностными статистическими явлениями при изучении тепловых процессов. С точки зрения классической механики вероятностное описание процессов являлось неполноценным, так как оно предполагало наше незнание точных параметров движения молекул и атомов.

Когда ученые проникли в глубь атома, то они обнаружили, что точных параметров у микрочастиц вообще нет. Законы квантовой механики, в частности принцип неопределенности, приводят к статистическому описанию явлений. Классическую статистику уже можно рассматривать как результат действия вероятностных процессов в микромире.

В мире элементарных частиц мы обнаруживаем новую неопределенность, связанную с тем, что нельзя точно сказать, сколько и каких частиц участвует во взаимодействии. И здесь оказывается необходимым ввести вероятностно статистическое описание процессов.

Связаны ли между собой вероятностный характер явлений в макромире, в атоме и в мире элементарных частиц? Будут ли дальше по мере углубления наших знаний о микромире увеличиваться наши сведения о неопределенностях в поведении микрочастиц? На эти вопросы надо, по-видимому,

ответить утвердительно. Но все известные нам сейчас (и в будущем) неопределенности не говорят о незнании или о принципиальной непознаваемости каких-то явлений. Они указывают лишь на объективные закономерности в природе, на неисчерпаемость свойств материи.

Физики не знают еще пока, чем вызван вероятностный характер процессов в природе. Однако они уверены, что суть явлений заключается в том, что здесь основную роль играют фундаментальные законы природы — законы сохранения.

Законы сохранения

В современной науке значение законов сохранения трудно переоценить. Эти законы, так же, как и все основные законы природы, носят опытный характер. Они не выводятся аналитически, а просто постулируются. Наблюдая в разных явлениях, что что-то обязательно сохраняется, ученые выделяют эту сохраняющуюся величину и связывают с различными процессами природы. Часто мы не очень хорошо представляем, что такое сохраняющаяся величина, а иногда просто не знаем, что это такое (например, странность). Но во всех случаях полученные законы сохранения позволяют нам глубже понять явления природы и найти другие вторичные законы, управляющие процессами.

Законы сохранения энергии, количества движения, момента количества движения, электрического заряда являются абсолютными законами не только в мире элементарных частиц, но и в различных процессах, имеющих место при движении больших тел, больших потоках частиц (например, в электрическом токе). Можно показать, что большинство известных опытных законов вытекает из законов сохранения.

Например, используя закон сохранения механической энергии, можно получить второй закон Ньютона. В учебниках физики и механики поступают обычно наоборот: применяя второй закон Ньютона, получают закон сохранения механической энергии.

Из закона сохранения количества движения можно получить третий закон Ньютона, утверждающий, что действие равно противодействию. Известный закон Ома можно вывести из закона сохранения электрического заряда. Можно было бы привести еще много примеров, когда из законов сохранения получаются известные законы макромира. Но здесь надо подчеркнуть и очень важное различие между законами сохранения и точными законами движения больших тел (или большого количества частиц).

В то время как законы сохранения имеют более общий характер и действительны для макро- и микромира, законы, управляющие большими телами, работают, как мы уже зна-

ем, только в макромире. Это законы «больших чисел» — статистические законы.

По-видимому, элементарные частицы подчиняются только законам сохранения и пока еще, очевидно, не все законы такого рода нам известны.

Абсолютные законы утверждают, что при любых взаимодействиях и превращениях частиц должны сохраняться энергия, количество движения, момент количества движения, электрический, барионный, лептонный (электронный и мюонный) заряды. К этим законам надо прибавить еще один, восьмой — абсолютный закон сохранения, о котором мы расскажем немного позже.

Известный уже нам закон сохранения странности имеет меньшую силу: он действует в сильных и электромагнитных, но не выполняется при слабых взаимодействиях.

Нам нужно продолжить рассказ о других законах сохранения микромира. Но прежде следует рассмотреть подробно закон сохранения момента количества движения — векторной величины, характеризующей вращательное движение тела или частицы. В природе мы очень часто сталкиваемся с действием этого закона. Нас будет интересовать его роль в мире микрочастиц. Элементарная частица может обладать собственным моментом количества движения, проекция которого на какую-либо ось носит название спинового числа (или просто спина). Эту величину можно измерить, в согласии с квантовыми законами, она оказалась равной либо целому (ноль это тоже целое число), либо полуцелому числу ($1/2$, $3/2$ и т. д.) в единицах $\hbar/2\pi$. В таблицах 1 и 2 приведены максимальные (по абсолютной величине) значения спинов.

Все взаимодействия элементарных частиц происходят в полном согласии с законом сохранения момента количества движения. Причем так, добавляет квантовая механика, что у каждой из частиц спин может изменяться лишь на единицу. Так, у мезонов спин вообще не может измениться: его максимальное значение равно 0. У фотонов могут быть значения спинов $+1$, 0 , -1 , а у электронов $+1/2$ и $-1/2$. Омега-гиперон, по-видимому, обладает полуцелым спином, равным $3/2$. Поэтому у этой частицы могут быть четыре спиновых состояния: $+3/2$, $+1/2$; $-1/2$, $-3/2$. Обратите внимание, что одни и те же элементарные частицы могут находиться в различных состояниях. Мезон выступает только соло — это так называемый синглет. Из электронов можно составить дуэт — дублет, из фотонов трио — триплет. А омега-гиперонов уже четыре — квадруплет. Это положение говорит о какой-то симметрии элементарных частиц в отношении одного из их свойств — спина. Существование особых групп частиц в виде синглетов, дуплетов, триплетов и др. наводило известного физика Гейзенберга на мысль, что должны существовать сим-

метричные группы частиц, которые различаются, может быть, еще не известными свойствами.

Возьмем, например, нуклоны и пи-мезоны. Для сильных взаимодействий не играет роль электрический заряд частиц. Поэтому в ядерном поле протон ведет себя точно так же, как и нейтрон. То же самое можно сказать о положительном, отрицательном и нейтральном пи-мезонах. Нельзя ли рассматривать нейтрон и протон как два состояния одной и той же частицы — дуплет, а пи-мезоны — как триплет? Гейзенберг сумел показать, что состояния в таких группах должны отличаться особым свойством, которое он назвал изотопическим спином. Никакого отношения это свойство к обычному спину не имеет. Есть лишь некоторая аналогия в математической теории. Изотопический спин — это тоже вектор. Но трудность заключается в том, что он должен рассматриваться не в обычном реальном, а в вспомогательном пространстве изотопического спина. Но эта математическая абстракция помогла найти вполне реальное, очень важное свойство элементарных частиц — изотопический спин. В сильных взаимодействиях существует закон сохранения изотопического спина. В электромагнитных и слабых взаимодействиях этот закон не имеет силы.

Прежде чем рассказать о еще трех законах сохранения, давайте подумаем: хорошо ли мы понимаем такое наглядное понятие, как симметрия? Не так просто ответить на этот вопрос.

Архитектор скажет, что здание симметрично потому, что если правую часть заменить левой, то ничего не изменится: все закономерности в пространственном расположении дома сохранятся. Не важно, что практически это сделать нельзя, разве лишь на разборной модели. Никакие перемещения, повороты не приведут к желаемым результатам. Говорят, что изображение в зеркале предмета симметрично относительно самого предмета. Но никаким поворотом или вращением нельзя совместить предмет с его зеркальным отображением. Существует также симметрия масштабов. Два подобных треугольника симметричны, так как, несмотря на то, что мы уменьшим стороны, например, в 10 раз, их форма, углы, очертания сохранились. Если конструктор изготавливает уменьшенную в несколько раз модель действующей машины, то здесь также действует принцип симметрии. Конструктор знает, что он может проверить работу машины на модели. Практически все закономерности, найденные при работе модели, сохраняются и для большой машины.

По-видимому, можно дать следующее определение понятия симметрии. Если при какой-нибудь мысленной или практической замене одних объектов (или их частей) другими сохраняются законы, которыми определяется форма, очерта-

ние, рисунок или что-либо подобное, то сравниваемые объекты (или их части) симметричны.

До сих пор мы говорили в основном о пространственной симметрии. Но бывают симметрии и другого типа.

Время неумолимо течет всегда в одном направлении: в сторону возрастания. Однако мысленно, для какого-нибудь изолированного явления, можно представить себе обратный ход времени, при котором все закономерности сохраняются. Здесь следует говорить о временной симметрии. Представим себе два положительно заряженных шарика. Если расстояние между шарами достаточно велико, то сила взаимодействия между ними описывается законом Кулона. Все сохранится, если мы заменим положительные заряды шаров такими же по величине отрицательными. Здесь уже действует зарядовая симметрия.

Список различных видов симметрий, конечно, этим не исчерпывается. Не надо думать, что если мы говорим о мысленном изменении или замене, то понятие симметрии субъективно. В нашем сознании отражаются вполне реальные и широко распространенные в живой и неживой природе явления симметрии. Примеров множество: кристаллическое строение твердых тел, правые и левые стороны большинства живых существ. Весьма сходны закономерности в строении тел, например, семейства кошачьих: от домашней кошки до свирепого тигра. Это симметрия масштабов в природе.

Симметрия в природе служила (и служит еще и сейчас) своеобразным «доказательством» присутствия божественного провидения. Смотрите, говорят богословы, как в природе все симметрично. В этом проявляется высшая гармония божественного духа. Только бог мог создать красивые одинаковые рисунки у крыльев бабочек, такие прекрасные симметричные кристаллы.

Но бог здесь ни при чем. Конечно, не все еще доказано и много еще пока неясного, но успехи биологии, химии и других наук вселяют в нас твердую уверенность, что гармония, симметрия в природе, в макромире в конечном счете должны объясняться законами микромира, симметрией в мире элементарных частиц.

Из того, что было сказано, видно, что существует глубокая связь между явлениями симметрии и законами сохранения. Во всяком случае в микромире каждый вид уже открытой симметрии приводит к определенному закону сохранения — инвариантности. При какой-либо замене должны сохраняться группы действующих законов. Еще не доказано пока, но, по-видимому, верно также, что каждый закон сохранения приводит к своему виду симметрии.

В мире элементарных частиц действует так называемая Т-симметрия. Утверждается, что все законы инвариантны от-

носителем мысленной замены прямого хода времени на обратный. Время измеряется цепью последовательно происходящих событий. Если вам дадут в руки серию фотографий из жизни одного человека и предложат расположить их по времени, т. е. по возрасту, вы сделаете это без труда: первой фотографией будет ребенок в пеленках, а последней старый человек. Обратная последовательность невозможна. Кинолюбители иногда любят пускать заснятый ими фильм в обратном направлении. Это очень смешно, но именно потому, что здесь возникают неправдоподобные ситуации, связанные с обратным течением времени. Это, конечно, принципиально невозможно в том мире больших тел, в котором находился и снимал кинолюбитель. Но если мы имеем дело с микрочастицами, то здесь вопрос с обращением времени обстоит совсем не так просто. Возьмем два сосуда: в одном имеются молекулы газа, второй совершенно пустой. Соединим их между собой и с этого момента начнем отсчет времени. Ход времени, как всегда, определяется событиями. Прямое течение времени: молекулы постепенно заполняют пустой сосуд и в конце концов равномерно распределяются в обоих сосудах. Обратное течение времени уже не является принципиально невозможным: равномерно распределенный газ постепенно уходит из одного сосуда, и в конце процесса все молекулы собираются в другом сосуде. Этот ход событий крайне невероятен. Он, может быть, произойдет один раз за миллиарды миллиардов лет или за еще большее время. Но такой процесс не противоречит ни одному физическому процессу: он возможен.

Если мы будем иметь дело всего с 4 молекулами, то ждать «обратного течения» времени нам придется не так долго. Вероятность такого процесса равна $1/16$, т. е. из 16 различных возможных распределений в одном случае все молекулы придут обратно в свой знакомый сосуд. Учитывая, что скорость молекул достаточно велика, такое явление будет наблюдаться очень часто. Ну, а если в каком-либо сосуде находится одна молекула, то прямой и обратный процесс имеет совершенно равные шансы.

Вот видите, как опасно признавать неправдоподобную ситуацию за неосуществимую! Необходимо понять, что имеется существенное различие между маловероятными и принципиально невозможными процессами.

В отношении элементарных частиц T -инвариантность означает, что если невозможен процесс обратный по времени, то никогда не происходит и прямой процесс. Слово «никогда», пожалуй, здесь слишком сильное. В последние годы выяснилось, что закон «обращения» времени не выполняется при слабых взаимодействиях. Почему это так, мы пока не знаем.

Сходное положение и с P -симметрией или P инвариант-

ностью. Здесь производится мысленная замена реального пространства на зеркальное. Очевидно, что все физические законы, действующие в прямом пространстве, сохраняют свое действие и в зеркальном. Такой закон сохранения гораздо наглядней и понятней, чем закон «обращения» времени.

В самом деле, если отдыхая на диване, я не вижу экрана телевизора, то почти всегда можно приспособить для этой цели зеркало. Мы не заметим особой разницы в картине. Вполне можно следить за развивающимися событиями, за сюжетом фильма. Некоторые несоответствия проявятся, если на экране появятся надписи или часы. Буквы у надписей будут необычны, но после некоторой тренировки вы без особого труда их прочтете. Часы ходят в обратную сторону, это особенно заметно по движению большой секундной стрелки. Но буквы и часы — это некоторая условность, вполне можно изобрести письмо, которое пишется справа налево перевернутыми буквами и изготовить часы с обратным ходом.

Однако есть более существенные различия, на первый взгляд менее заметные. Начнем с того, что в зеркале все действующие лица левши: они пишут левой рукой, здороваются и прощаются левыми руками. Изучать гимнастические упражнения или танцы в зеркале будет трудновато: придется привыкнуть, что диктор постоянно ошибается и, говоря о правой руке или ноге, показывает левые. Если по телевизору покажут знакомые места, в зеркале вы их можете не узнать. Большой театр, снятый от памятника Карла Маркса, выглядит как будто нормально, но Малый театр и универсальный магазин в зеркале находятся слева. Более внимательное рассмотрение покажет, что и правая сторона Большого театра и улица Петровка переместились налево и так далее. В различных кадрах показываемого фильма можно тоже заметить ряд изменений. Левые повороты становятся правыми, и наоборот. Машины бегут почему-то по левой стороне улиц, тогда как у нас принято ездить по правой. Даже винт с правой резьбой в зеркале окажется левым. Да, зеркальный мир необычен! Здесь все наоборот? Нет, не все! Время течет нормально. Это видно хотя бы из рассмотрения последовательности событий: люди и машины двигаются вполне нормально. Но с пространственными представлениями в зеркале действительно все наоборот. Если мир, в котором мы живем, условно назвать правым, то в зеркале будет левый мир.

Однако зеркальный (или левый) мир нисколько не хуже обычного, и мы не знаем ни одного физического закона, который противоречил бы зеркальному миру. Правые и левые миры совершенно равноправны.

Физики называют это положение законом сохранения четности. Придется поверить мне на слово, что это означает то,

что все явления в природе идут так, что «правые» и «левые» процессы одинаково вероятны.

Следует отметить, что ученые считали этот закон сохранения (P -инвариантность) столь же очевидным, как абсолютные законы сохранения энергии или количества движения. Ведь все законы физики действовали одинаково в прямом и зеркальном мире. Поэтому физики были ошеломлены, когда несколько лет назад эксперименты показали, что в микромире этот закон не всегда выполняется. Оказалось, что при превращении частиц в результате слабого взаимодействия «правые» и «левые» процессы совсем не равноправны.

Почему это так, мы опять-таки пока не знаем.

Наконец, несколько слов о третьем законе сохранения: C -симметрии. Он утверждает, что законы, действующие между частицами, сохраняются, если заменить все частицы на античастицы. Так же, как и два предыдущих закона, он не выполняется при слабом взаимодействии.

Таким образом, симметрии, определяемые законами C , P и T (отдельно), не имеют места при слабом взаимодействии. Однако симметрия будет полной, если произвести эти замены одновременно. Это так называемая CPT -симметрия. Соответствующий абсолютный закон сохранения можно сформулировать так: если произвести одновременно замену частицы на античастицу, пространство его зеркальным отображением и прямой ход времени на обратный, законы любых взаимодействий элементарных частиц сохраняются.

Вполне возможно, что будут найдены еще какие-нибудь законы сохранения. По-видимому, каждое новое свойство элементарных частиц, если оно не сможет быть связано с известными законами, потребует формулировки нового закона сохранения.

Законы сохранения, конечно, не могут дать точных сведений о поведении, взаимодействии или превращении элементарных частиц. Они лишь ограничивают возможности различных явлений. Элементарная частица может взаимодействовать и превращаться любым способом, лишь бы это не запрещалось законами сохранения. В некоторых случаях физики, пользуясь законами сохранения, могут подсчитать вероятность какого-либо события в жизни элементарных частиц. Но только вероятность, так как, по-видимому, именно законы сохранения и приводят к статистическим закономерностям.

Условия для поведения элементарных частиц при сильном взаимодействии более жесткие, чем при слабом, так как ограничения здесь накладываются большим числом законов сохранения.

Слишком много элементарных частиц

Если учесть открытые в последние годы резонансы, то число элементарных частиц становится уже слишком большим. Есть основания подозревать, что либо не все частицы действительно «элементарны», либо они состоят из других, еще не найденных «субэлементарных» частиц.

Легко заметить, что в каждом семействе наиболее устойчивой является частица с наименьшей (или нулевой) массой покоя. Особенно наглядно это видно в семействе барионов. Единственной устойчивой частицей является протон (и антипротон), он и обеспечивает устойчивость окружающего нас мира. Можно рассматривать любой барион (гиперон и резонанс), как находящийся на более высоком энергетическом уровне возбужденный протон. Но величина энергии связана с массой. Поэтому масса покоя всех остальных барионов больше массы протона. Каждый раз, чтобы получить известный барион, мы должны передать протону вполне определенную энергию. Однако все барионы стремятся перейти в устойчивое состояние и, распадаясь, переходят на более низкие энергетические уровни. Излучая мезон, электроны и другие частицы, они уменьшают свою массу и все в конце концов превращаются в протоны (за исключением нейтронов в атомном ядре). Протон не может превратиться в частицы меньшей массы из другого семейства (мезоны, электроны). Для этого ему необходимо (так же как и другим барионам) встретиться со своей античастицей. В нашем мире это ему удается очень редко.

Превращение резонансов в более легкие барионы может происходить в результате сильного взаимодействия. Но гипероны не могут этого сделать, так как этому препятствует закон сохранения странности. Ведь странность протона равна нулю. Поэтому распад гиперона происходит сравнительно медленно в слабых взаимодействиях. Это относится и к такой тяжелой частице, как омега-гиперон: ее странность равна —3. Странность большинства резонансов равна нулю, и они очень быстро (10^{-22} сек.) превращаются в другие частицы путем сильного взаимодействия. В этом и заключается основное отличие резонансов от более долгоживущих частиц-гиперонов.

Примерно так можно описать и семейство мезонов. Самый легкий пи-мезон наиболее устойчив. Остальные мезоны (ка-мезоны и резонансные мезоны) можно считать возбужденным состоянием пи-мезонов. Странные ка-мезоны не могут распадаться путем сильного взаимодействия. Им опять-таки мешает закон сохранения странности, и они испытыва-

ют медленный «слабый» распад. Резонансы очень быстро превращаются в более легкие мезоны. То, что в этом семействе отсутствует устойчивая частица, легко объясняется тем, что барионный заряд мезонов равен 0. Поэтому заряженные пи-мезоны с помощью слабого взаимодействия превращаются в мю-мезон и мюонные нейтрино. А затем уже мю-мезоны — в электроны, нейтрино и мюонные нейтрино. Здесь действуют законы сохранения лептонных электронного и мюонного зарядов. Нейтральный пи-мезон живет значительно короче, так как его распад происходит путем более быстрого электромагнитного взаимодействия: он превращается в два гамма-фотона. Здесь опять-таки действует закон сохранения всех зарядов.

Лептонное семейство малочисленное и никогда не испытывает сильного взаимодействия (поэтому здесь не найдено резонансов). Оно имеет две группы: электроны и мюоны. Мю-мезон по своим свойствам весьма близок к электрону: имеет тот же электрический заряд и спин. Но масса его в сотни раз большая, и поэтому-то ему приходится приписывать свой мюонный заряд (и соответствующий закон сохранения). Путем слабого взаимодействия мю-мезон сравнительно медленно превращается в электрон и два нейтрино. Здесь действуют все законы сохранения, предусмотренные для слабого взаимодействия.

Таким образом, можно как будто бы считать более тяжелые частицы «возбужденным» состоянием более легких. Следует, однако, заметить, что эта трактовка многими не разделяется и содержит ряд противоречий. Однако она позволяет свести все открытые частицы к небольшому числу «вечноживущих» элементарных частиц: фотон, электрон, нейтрино электронное, нейтрино мюонное, протон, нейтрон (внутри атомного ядра) и соответствующие античастицы. К этому списку необходимо добавить пи-мезоны, дающие начало семейству мезонов. Время жизни их невелико, но без этих частиц невозможно существование ядерных сил, необходимых для образования атомных ядер.

Парадоксально то, что серьезным доводом против такой интерпретации является тот факт, что элементарных частиц слишком мало. В самом деле! Почему для «возбуждения» барионов или мезонов нужно скачками увеличивать их энергию (или массу)? Почему нет частиц с любой массой? В чем причина того, что при некотором «возбуждении» элементарных частиц возникает новое свойство, квантовое число — странность, имеющее значение 1, 2 и 3? Все это указывает, что в конструкции барионов и мезонов есть определенные закономерности: они имеют сложную структуру, которая не объясняется «возбуждением» наиболее устойчивых частиц.

Желание физиков найти структуру барионов и мезонов

привело в последние годы к открытию высших (унитарных) симметрий у элементарных частиц, это так называемые $SU(3)$ - и $SU(6)$ -симметрии. К сожалению, здесь нельзя их подробно рассмотреть. Укажем только, что $SU(3)$ - и $SU(6)$ -инвариантности основаны на законах сохранения странности, изотопического и обычного спинов и поэтому действуют только при сильных взаимодействиях.

На основе этих симметрий родилась гипотеза о существовании субэлементарных частиц — кварков и антикварков, из которых состоят все барионы и мезоны, включая и резонансы. Самое интересное заключается в том, что кварки обладают дробным по отношению к заряду электрона электрическим зарядом и имеют массу, во много раз превышающую массу элементарной частицы, которая образовалась в результате их синтеза. Таких частиц физики еще не встречали, и до последнего времени они были уверены, что не существует электрического заряда, меньшего, чем заряд электрона. В том, что масса элементарной частицы много меньше массы образующих ее кварков, нет, пожалуй, ничего удивительного. Если кварки существуют, то, очевидно, при образовании из них элементарной частицы выделилась очень большая энергия, которая и унесла с собой массу (в виде массы других быстро движущихся элементарных частиц). Эта энергия носит название энергии связи, и мы с ней еще встретимся в рассказе об атомном ядре. Такую же энергию надо затратить для того, чтобы разбить элементарные частицы на составляющие ее кварки. Отсюда видно, что элементарная частица является очень устойчивым образованием, и для получения кварков нужна энергия, значительно превышающая энергию, получающуюся на современных ускорителях. Сейчас физики строят очень мощные ускорители, где надеются обнаружить кварки. Независимо от того, найдут в будущем кварки или нет, существование высших симметрий указывает на наличие структуры у барионов и мезонов.

Еще меньше сведений мы имеем о лептонном семействе. Казалось бы, что это более простые частицы. Они участвуют лишь в слабом и электромагнитном взаимодействиях. Но никаких указаний на наличие структуры у этих частиц не дают ни эксперимент, ни теория. Мы также не знаем, почему существуют два типа электронов: легкий и тяжелый (мю-мезон) и два типа нейтрино. Много еще загадок у природы. Но не надо забывать, что здесь находится передний край науки. Каждый год и даже каждый день приносит нам нечто новое, и часто под тяжестью этих новых данных рушатся созданные с таким трудом гипотезы физиков, а иногда и, казалось бы, твердо установленные законы.

Ансамбль из элементарных частиц

Теперь мы знаем, что составная часть любого атома, да и сам атом представляют собой довольно сложную конструкцию, состоящую из элементарных частиц.

Но не так давно, около 60 лет назад, физики и не подозревали о существовании атомного ядра. Было твердо установлено, что все вещества состоят из атомов. В распоряжении физиков была лишь одна элементарная частица — отрицательно заряженный электрон.

Английский физик Максвелл показал, что излучение электромагнитных волн, в том числе и света, получается при ускоренном движении или колебании электрических зарядов. Немецкий ученый Герц сконструировал вибратор из металлических проводников. Этот вибратор, если его питать быстропеременным электрическим током, испускал не акустические, а электромагнитные волны. А русский физик Попов построил передатчик и приемник: осуществил впервые радиосвязь, заложив тем самым основы современной радиотехники.

Электрический ток в металлах — это движение электронов. Полчища электронов работают в больших вибраторах Герца и Попова, излучая длинные радиоволны. Для света нужны другие, совсем маленькие вибраторы: ведь длина волны света ничтожно мала по сравнению с длиной радиоволн. Такими вибраторами могли быть только атомы. Надо было разгадать их устройство. За это взялся английский физик Томсон. Нелегко пришлось этому крупному ученому: ведь в его распоряжении были только отрицательные электроны, а атомы должны быть нейтральными частицами. Любое вещество, если не применять никаких усилий (например, механического трения), не имеет электрического заряда. Томсон все-таки вышел из положения. Его модель атома представляет собой сферическое ядро размером порядка 10^{-8} см, заполненное тяжелой положительно заряженной жидкостью, в которой плавают во взвешенном состоянии электроны. Электроны находятся в равновесном состоянии. Но если какие-либо внешние причины выводят электроны из равновесия (например, тепловое движение атомов), то они приходят в колебательное движение и излучают короткие электромагнитные волны, т. е. свет.

Модель атома Томсона просуществовала недолго. Соратник и ученик Томсона, великий английский физик Резерфорд показал, что эта модель не соответствует действительности.

В то время было уже известно, что при радиоактивном распаде некоторых веществ излучаются положительно заря-

женные альфа-частицы. Масса альфа-частиц была приблизительно равна четырем атомным единицам массы (1 а.е.м. равна $1/12$ массы атома углерода), а скорость ее около 20 тыс. км/сек. Резерфорд решил исследовать атомы с помощью этих быстрых частиц. Он поместил на пути узкого пучка частиц тонкую золотую фольгу и наблюдал их рассеяние с помощью люминесцентного экрана. Каждая альфа-частица вызывала вспышку (сцинтилляцию) в люминесцентном слое, и Резерфорд с учениками сравнительно просто определили место, куда попадала бомбардирующая альфа-частица после прохождения или отражения от фольги.

Он обнаружил нечто весьма примечательное. По Томсону, «тонкая» фольга (около 1 микрона), содержащая на самом деле 10 тыс. слоев атомов, должна быть сплошь заполнена «тяжелой жидкостью». Удивительным было уже то, что большая часть альфа-частиц без отклонения легко проходила сквозь фольгу. Небольшое количество частиц все же отклонялось. Совсем мало частиц отскакивало обратно, как будто бы они встречались с непроходимой преградой. Резерфорд точно определил, куда и сколько частиц рассеивалось, и пришел к заключению, которое даже ему на первый взгляд показалось неожиданным. Атом был почти пустым. Лишь в центре атома находилась очень маленькая и тяжелая положительно заряженная частица — атомное ядро — размером порядка 10^{-12} см. Чтобы атомы были нейтральными, необходимо, чтобы вокруг атома находились электроны. Но они не могут быть неподвижными, а должны вращаться вокруг ядра, наподобие планет вокруг Солнца. Только в этом случае модель атома будет механически устойчива.

Модель атома Резерфорда, значительно обновленная и уточненная, существует до настоящего времени. Сейчас нас пока интересует центральная «фигура» в атоме — атомное ядро.

Исследования показали, что практически вся масса атома сосредоточена в атомном ядре, объем которого в 10^{-12} раз меньше объема самого атома. Поэтому плотность ядра колоссальна! Заряды всех ядер положительные и соответствуют номеру в периодической системе элементов Менделеева. Обратите внимание, что в природе не так уж много различных атомов (т. е. химических элементов). Всего вместе с искусственными элементами их насчитывается пока 104, меньше, чем элементарных частиц. Правда, различных ядер, как мы увидим, значительно больше.

Как же устроено атомное ядро? Какие силы там действуют? Было много попыток создать конструкцию атомного ядра. Не имеет смысла все их рассматривать. Как только в 1932 году была открыта тяжелая нейтральная частица — нейтрон, физики поняли, что атомное ядро состоит из нейт-

ронов и протонов. Нам уже известны свойства нейтронов и знакомы ядерные силы, действующие между нуклонами. Эти силы не зависят от сорта частиц и действуют одинаково между протонами и между нейтронами или между парой нейтрон-протон. Очень важной особенностью этих новых сил является то, что они действуют на весьма малых расстояниях: порядка 10^{-13} сантиметра. На больших расстояниях с ними можно и не считаться.

Но в атомном ядре работают еще и другие силы. Они меньше по величине, но зато действуют на весьма больших расстояниях. Это силы электрического отталкивания между одноименно заряженными частицами — протонами. Можно принять, что в то время, как ядерные силы действуют только между соседними частицами ядра, электрические силы расталкивают все протоны ядра. Довольно простые расчеты позволяют нам оценить давление электростатических сил, расталкивающих все протоны атомного ядра. По порядку величины оно оказалось равным 10^{24} атмосфер!

Очевидно, что давление, вызываемое ядерными силами, должно, по крайней мере, уравновешивать это расталкивающее давление. Да, твердый орешек — это атомное ядро! Становится понятным, почему так долго ученые не только не могли его «раскусить», но и не имели понятия о существовании атомного ядра. Ведь силы и давления, с которыми мы имеем дело в нашей обыденной практике, ничтожно малы по сравнению с ядерными.

Итак, атом и атомное ядро представляют собой ансамбль из элементарных частиц (нуклонов и электронов). В ядре Z протонов и N нейтронов. Массовое число A равно полному числу нуклонов.

$$A = Z + N$$

Энергия атомного ядра

В атомных ядрах, где действуют колоссальные силы, совершается огромная работа. В ядерных процессах происходит превращение большого количества одних видов энергии в другие. Но ведь энергия связана с массой. Поэтому если атомное ядро изменило свою энергию, то и его масса стала другой на величину

$$\Delta m = \frac{W}{c^2}.$$

При образовании ядер из свободных нейтронов и протонов выделяется колоссальная энергия. Эта энергия, которая носит название энергии связи, равна

$$W_{\text{связи}} = \Delta m \cdot c^2.$$

Отсюда следует, что масса ядра меньше суммарной массы нуклонов на величину Δm . У физиков имеются очень точные приборы, с помощью которых можно измерить величину Δm и, следовательно, определить энергию связи. Как легко понять, энергия связи равна энергии, которую надо приложить к ядру для его разрушения на составные частицы: нейтроны и протоны.

Если мы разделим полную энергию связи ядра на число частиц (массовое число), то получим так называемую удельную энергию связи.

$$W_0 = \frac{W_{\text{связи}}}{A},$$

где W_0 — средняя энергия, которую надо приложить, чтобы «вытащить» из ядра один нуклон. Эта величина определяет прочность ядер и различная для разных ядер. Наиболее прочными являются ядра с наибольшей энергией связи: это ядра с массовым числом около 60. Сюда входят ядра химических элементов: железо, кобальт, никель, медь. Удельная энергия очень резко растет с увеличением массового числа для легких ядер. Она остается примерно постоянной для значения A от 40 до 120, а затем медленно уменьшается для более тяжелых ядер.

Почему это так? Все определяется короткодействующими ядерными силами — сильным взаимодействием. Ядро водорода, протон не имеет никакой энергии связи — это свободная частица. Так как сильное взаимодействие действует только между соседними частицами, то довольно быстро происходит так называемое насыщение ядерных сил. Прочность ядер становится приблизительно одинаковой. Уже ядро гелия, состоящее из четырех нуклонов, имеет удельную энергию около 7 мэв. Дальнейшее увеличение числа нуклонов мало влияет на прочность ядра. Удельная энергия связи слабо растет и достигает максимального значения (примерно 8,7 мэв) при числе нуклонов 60. Казалось бы, здесь, когда достигнуто полное насыщение ядерных сил, прочность ядра должна оставаться постоянной. Ведь ядерные силы не действуют между далеко расположенными нуклонами. Прочность, например, бумаги не зависит от того, возьмете вы маленький лист или большой рулон. Нужно затратить одинаковые усилия, чтобы зачерпнуть ложку воды из ведра или большой бочки.

Но здесь надо вспомнить о силах электростатического отталкивания. Эти силы действуют практически одинаково во всем ядре. С увеличением массового числа увеличивается число протонов, а следовательно, растут электростатические силы. Они разрыхляют ядро, делают его менее прочным, и энергия связи у больших ядер становится меньшей.

Значения энергии связи для различных ядер подсказывают нам два способа получения ядерной энергии. Очевидно, нужно применять такие ядерные реакции, в результате которых получаются ядра с наибольшей энергией связи. Можно синтезировать (соединять) легкие ядра в более тяжелые и, наоборот, разделить очень тяжелые ядра на ядра среднего массового числа.

Сейчас для получения ядерной энергии в промышленных целях применяется цепной процесс деления тяжелых ядер. Синтез легких ядер даст возможность использовать почти неограниченное количество ядерного горючего, имеющегося на Земле. Но он может быть получен лишь в управляемой термоядерной реакции, над осуществлением которой работают ученые всего мира.

Атом — квантовая система

Вернемся к атому. Оказалось, что механическое вращение электронов вокруг ядра не спасает атом Резерфорда от катастрофы. Электроны должны упасть на ядро. Читатель может спросить: почему? Ведь не падают на Солнце вращающиеся вокруг него планеты! Да, планеты не падают. А вот спутник Земли, движущийся даже в весьма разреженной атмосфере, в конце концов упадет на Землю.

Внутри атома нет, конечно, какого-нибудь мифического газа, и все же электрон должен в согласии с законами классической физики тормозиться и упасть на атомное ядро. Различие между планетой в солнечной системе и электроном в атоме прежде всего, конечно, в размерах. Мир атома — это микромир. Но классическая физика не признает этого различия. Она утверждает, что поскольку электрон — заряженная частица, то, двигаясь ускоренно, он должен излучать электромагнитные волны. То, что движение электрона ускоренное, не вызывает сомнения, поскольку любое движение по кругу или эллипсу имеет центростремительное ускорение.

Может быть, это не так уж плохо. Ведь свет должен излучаться такими миниатюрными вибраторами, как атом.

Электрон, двигаясь по круговой орбите, излучает электромагнитные волны с частотой, соответствующей числу оборотов электрона вокруг ядра. Но при этом он теряет свою энергию и приближается к ядру. Радиус вращения его уменьшается, а частота увеличивается до бесконечности, пока электрон не упадет на ядро. Но вся беда заключается в том, что этот процесс не соответствует опыту. Прежде всего никаких атомных катастроф подобного типа не происходит. Атомы и состоящие из них молекулы очень устойчивые частицы и, если не применять к ним довольно больших сил, живут миллионы и даже миллиарды лет без каких-либо из-

менений. Кроме того, такой механизм приводит к излучению сплошного спектра: от длинных до самых коротких волн. На самом деле эксперименты говорят о том, что свободные атомы (в газе) излучают отдельные характерные для такого сорта атомов линии спектра.

Все, о чем здесь было рассказано, прекрасно знал и создатель ядерной модели атома Резерфорд. Он знал, что его модель неустойчива и должна излучать совсем не так, как это происходит на самом деле. Но он был великим ученым и честно рассказал о том, что следовало из его многочисленных опытов.

Спасти модель атома Резерфорда взялся другой крупнейший физик — датский ученый Нильс Бор. В то время (1913 г.) были известны работы Планка и Эйнштейна, утверждавшие, что свет состоит из квантов-частиц.

Но для того, чтобы атом излучал или поглощал порции света — кванты, его конструкция должна быть не простой. Порции энергии, меньшей, чем квант света, нет, и поэтому электрон в атоме не может получать или терять энергию непрерывно, т. е. изменять постепенно свою орбиту. А отсюда и вытекает модель атома водорода Бора — первый шаг на пути к новой механике микромира.

В теории Бора электрон ведет себя почти как классическая частица. Он движется вокруг ядра, правда, не по любому, но все же по вполне определенным круговым орбитам. Радиусы этих стационарных орбит, скорость и энергию электрона можно точно вычислить. Когда атом находится в нормальном (невозбужденном) состоянии, то его электрон вращается по самой ближней к ядру орбите радиусом около $0,5 \cdot 10^{-8}$ см, что совпадает с опытными данными.

Вместе с тем теория Бора подрывает основу электродинамики Максвелла. Она утверждает, что, двигаясь по стационарной орбите, т. е. ускоренно, электрон не излучает (и не поглощает) электромагнитные волны. Интересно, что это положение действует только в микромире. Если заставить электрон двигаться по большой кольцевой орбите, например в ускорителе-синхротроне, то он в полном соответствии с классической физикой излучает свет.

Когда атом находится в нормальном состоянии, он не излучает света. Для возбуждения атома ему надо передать энергию, достаточную, чтобы его электрон перешел на более высокие орбиты. Излучение возбужденного атома происходит фотонами-квантами света с энергией $E = h\nu$. Частоты излучения ν определяются изменением энергии электрона Σ при самопроизвольном переходе электрона на более низкую орбиту.

Теория Бора была блестяще подтверждена экспериментальными исследованиями. Расчеты, проведенные на основе

этой теории, совпали с опытными данными по исследованию спектра водорода.

Но эта теория «спасла» только одноэлектронный атом, да и то не вполне. Она позволила вычислить частоты излучения различных линий спектра, но ничего не могла сказать об их интенсивности. Помещая излучающие атомы водорода в сильное магнитное поле, физики получили линии спектра, существование которых не следовало из теории Бора. Все попытки применить эту теорию к многоэлектронным атомам ни к чему не привели.

Но главный вывод, который можно сделать из теории Бора, все же остался и сейчас. Он заключается в том, что у электрона в атоме имеется целый ряд дискретных энергетических состояний, и спектр излучения атомов определяется переходами электронов из одних состояний в другие. Правда, эти энергетические состояния никоим образом не указывают на какие-то орбиты электрона внутри атома. Как мы уже знаем, никаких траекторий у микрочастиц не может быть.

Состояния электронов в атоме и вероятности их перехода из одного состояния в другое определяют частоты и интенсивности излучений различных линий спектра. Все это можно рассчитать, воспользовавшись методами квантовой механики. Здесь, как и всегда в механике микромира, мы получим не точное значение состояний электронов в атоме, а целый ряд возможных состояний. Отличаются эти состояния друг от друга значениями трех целых, так называемых квантовых чисел: n , l и m . Главное квантовое число n определяет энергию, а l и m — момент количества движения электрона в атоме. В отличие от спина этот момент количества движения называют орбитальным (помня, конечно, что никаких орбит у электрона нет). Энергия — это скаляр — величина, не имеющая направления в пространстве, а момент количества движения — вектор, который не может быть задан одним числом. Поэтому величина l позволяет вычислить абсолютное значение вектора, а m — проекцию вектора момента количества движения на любое направление.

Выражение: «Проекция вектора на любое направление» многих смущает, а некоторых даже возмущает. Ну а на самом деле здесь ничего нового нет. Вектор в пространстве точно определяется либо тремя проекциями, либо абсолютным значением вектора и двумя проекциями. Но принцип неопределенности показывает, что такой вектор, как момент количества движения микрочастицы, вполне определяется абсолютным значением и одной проекцией вектора, второй проекции у него просто нет. Значение единственной проекции, конечно, не зависит от выбранного направления. Представить себе это невозможно, так же, как движение микро-

частиц без траектории, но понять можно. Просто у микрочастицы нет такого параметра движения, как вектор момента количества движения с тремя проекциями. Физиков это обстоятельство не беспокоит.

Ученых привело в смущение другое. Оказалось, что орбитальный момент количества движения электрона в атоме не сохраняется. А это нарушает один из основных законов природы. Но все стало на свое место, когда обнаружили, что электрон, как и всякая микрочастица, обладает собственным моментом количества движения — спином. Суммарный момент электрона (орбитальный и собственный) в изолированном атоме всегда сохраняется.

О спине мы уже рассказывали, но сейчас следует кое-что уточнить. Читатель теперь уже понимает, что значения проекций спинов частиц (они обозначаются квантовым числом S), приведенные в таблицах 1 и 2, не зависят от выбранного направления.

Казалось бы, что можно интерпретировать существование спина у элементарных частиц, приписывая им механическое вращение вокруг оси. Но по ряду обстоятельств, о которых мы не будем здесь говорить, такое движение противоречит принципу относительности. По-видимому, спин есть первичное свойство микрочастицы, механическим аналогом которого является собственный момент количества движения. Откуда вытекает это свойство, мы пока не знаем.

Значение спина оказалось весьма важным для применения фундаментального закона квантовой механики — принципа Паули. Этот принцип показывает, как надо подсчитывать распределение частиц с полуцелым спином по различным состояниям. В этом случае надо применять статистику Ферми—Дирака. Из нее следует, что в любой квантовой системе, как бы велика она ни была, не может быть даже двух частиц с полуцелым спином в одном и том же состоянии. Это относится к молекулам, атому, атомному ядру и даже к большому куску твердого тела.

Статистика Бозе — Эйнштейна относится к частицам с целым (или нулевым) спином. Здесь в одном и том же энергетическом состоянии может быть любое число частиц. Читатель, конечно, помнит, что основными кирпичами мироздания являются лептоны и барионы, т. е. частицы с полуцелым спином: на них распространяется запрет Паули. Таким образом, понять, как устроен мир, помогает нам статистика Ферми. Силы, связывающие нуклоны между собой и электроны с ядрами, определяются действием частиц с целым спином: мезонами и фотонами. Их распределение определяется статистикой Бозе.

Признаюсь, что мои рассуждения о различных статистиках не очень понятны. Может быть, помогут примеры. Все

мы прошли через детство, учились по картинкам, рисовали их. Ничего плохого нет в том, что мы вернемся к картинкам уже в более зрелом возрасте, если они помогут нам кое-что понять в сложном микромире.

Мальчик строит из кубиков высокую башню. Если одинаковые по размеру кубики оклеены разными картинками, то ребенку не все равно, на каких этажах и где будут видны различные изображения. Кубики для него различимы, и он старается найти смысл в своей «архитектуре».

Но предположим, что все кубики оклеены одной и той же бумагой или выкрашены одинаковой краской. На первый взгляд кажется, что кубики неразличимы. Но это обманчивое суждение. Взрослый человек будет их исследовать более тщательно и найдет, что одни имеют по одной царапине, у других — две или три. У одних кубиков более правильные углы, у других — закругленные. Наконец, исследователь возьмет точные весы и увидит, что все кубики имеют различный вес. Небольшие различия ребенок может и не заметить. Поэтому при постройке башни вероятность каждого кубика быть, например, в верхнем этаже одинакова.

Но если башню строит сказочный маленький Буратино, то для него разница в весе уже играет роль. Ему легче поднять более легкий кубик на верхний этаж. Поэтому вероятность в распределении кубиков не была бы равной. Вероятней всего, внизу находились бы тяжелые, а наверху легкие кубики.

Заметьте, что мы уже здесь, в детской забаве, применяем слова «вероятность» и «распределение».

В макромире все тела имеют свою индивидуальность, свои особые признаки и, конечно, различимы. Например, нет одинаковых людей, хотя их на Земле уже 3 миллиарда. Но мы можем говорить о «среднем» росте и весе человека. Мы можем, пользуясь статистическими данными, вывести распределение людей по росту, весу и т. п. Это классическая статистика: она позволяет нам вычислить, какова вероятность найти человека ростом 1,70 м и весом 70 кг.

И статистика и вероятность здесь как будто бы вполне объективны. Они основываются на известных или еще не известных законах. Но если глубже вдуматься, то все признаки и различия больших тел определяются количеством или разными соединениями микрочастиц. Ведь мы и сейчас знаем, что рост человека заложен уже в структуре макромолекул нуклеиновой кислоты, входящей в состав всех клеток человека и любого живого существа. Когда мы дойдем до микрочастиц, входящих в состав этой огромной молекулы, то найдем, что классическая статистика в конце концов определяется квантовой статистикой, действующей в микромире.

Правда, во многих случаях для больших систем, состоя-

ших из микрочастиц, можно с достаточной точностью применять классическую статистику. Но не всегда! Вот, например, для раскрытия загадки в поведении твердого тела, в его электропроводности, пришлось применить квантовую статистику Ферми — Дирака для огромной массы электронов. Вы имеете возможность, сидя на скамейке в тенистом парке, слушать далекие радиостанции. Но вы и не подозреваете, что этим вы обязаны квантовой статистике, на основе которой разработаны полупроводниковые элементы — транзисторы. Но это уже другая тема.

Для того, чтобы понять различие между статистиками, рассмотрим случай, когда имеются две одинаковые частицы a и a' и всего два возможных состояния, условно обозначенные I и II.

В классической статистике возможны любые четыре варианта:

1. I (a, a'), II; 2. I (a), II (a');

3. I (a'), II (a); 4. I, II (a, a'),

следовательно, вероятность каждого события равна $1/4$. Квантовая механика не различает одинаковые частицы (a, a'), (они и в самом деле тождественны). В статистике Бозе — Эйнштейна в каждом состоянии может быть любое число частиц (в данном случае две). Варианты 2 и 3 надо принять за одинаковые. Поэтому может быть: 1. I (a, a), II; 2. I (a), II (a); 3. I, II (a, a). Здесь вероятность каждого события равна $1/3$.

В статистике Ферми — Дирака в каждом состоянии может быть только одна частица и возможен всего один вариант с вероятностью, равной 1: 1. I (a), II (a).

Квантовые статистики устанавливают более жесткие условия на возможное распределение (а следовательно, и поведение) микрочастиц. Эти ограничения накладываются квантовыми свойствами элементарных частиц.

Атом как раз и представляет собой квантовую систему, состоящую из ядра и электронов. Состояние последних определяется четырьмя квантовыми числами: главным квантовым числом n , квантовыми числами, определяющими орбитальный момент количества движения l и m_l , и значением проекции спина S_z .

Симметрия химических элементов

Симметрия химических свойств элементов, их периодичность, отраженная в системе Менделеева, и обязана квантовым законам распределения частиц в электронной оболочке атома.

Чтобы показать это, мы проведем с вами мысленный опыт. Возьмем положительно заряженное ядро и будем присоединять к нему электроны. Начнем с одного электрона. Тогда мы получим водородоподобный атом (при $Z = 1$ будет водород), процессы, которые хорошо описываются теорией Бора. Энергетические состояния определяются одним квантовым числом n . А где же остальные, отвечающие квантовым числам m , l и S ? Они тоже есть, но для их обнаружения надо поместить одноэлектронные атомы в сильное магнитное поле. Можно сказать, что у водородоподобных атомов много состояний с одной и той же энергией. Эти состояния называются «вырожденными». Расчет показывает, что каждому n соответствует $2n^2$ вырожденных состояний. В сильных полях вырождения снимаются, и линии спектра показывают, что эти бывшие вырожденные состояния дают несколько различные, но близлежащие линии спектра излучения. Вырождение снимается также и тогда, когда возле ядра находятся два или больше электронов. Это объясняется довольно сильным полем соседних электронов.

Мы будем рассматривать атом в нормальном состоянии. В этом случае в водородоподобном атоме нужно учитывать только $n = 1$. Орбитальный момент количества движения у электрона в этом состоянии равен 0 ($l = 0$, $m = 0$). Но спин — это свойство самого электрона, он может быть равен $\pm 1/2$. Независимо от этого все переходы с возбужденных уровней ($n = 2, 3, \dots$) в изолированном атоме будут давать одни и те же линии излучения.

Для того, чтобы обнаружить симметрию химических свойств, следует разбить всю электронную оболочку на слои в зависимости от квантового числа n . При $n = 1$ это будет K -слой, $n = 2$ — L -слой, $n = 3$ — M -слой и т. д. Зачем это делать, спросит читатель, ведь в нормальном состоянии все электроны должны быть в самом низшем энергетическом состоянии: но в одном состоянии может быть только один электрон. Поэтому, если мы присоединим к ядру второй, то он придет в тот же K -слой ($n = 1$). Но при этом он обязательно должен иметь противоположный спин, т. е. другое квантовое число S . Его энергия будет хоть немного, но отличаться от первого электрона. Атомы с законченным слоем являются особенно устойчивыми. Это атомы благородных газов. Эти элементы с трудом вступают в химическую связь¹.

В квантовой механике доказывается, что законченные слои электронов устойчивы вследствие своей симметрии (при $n = 1$, например, будет шаровая симметрия). Полный момент количества движения симметричного электронного облака ра-

¹ До последнего времени даже считалось, что нет химических соединений с благородными газами.

вен нулю. Эта величина является, конечно, векторной суммой моментов отдельных электронов. Можно показать, что условие симметрии выполняется, если в слое с главным квантовым числом n будет $2n^2$ электронов с компенсирующими друг друга орбитальными и спиновыми моментами.

У атома водорода один электрон: он сравнительно слабо связан с ядром. Поэтому он легко входит в химические соединения, отдавая в молекуле свой электрон соседнему атому для связи. Но в то же время атом водорода стремится достроить свой K -слой, взяв у соседа «лишний» электрон. Первым благородным газом является гелий, в атоме которого два электрона полностью заполняют K -слой. Второй L -слой начинает заполняться с атома лития ($Z = 3$). У него один электрон в L -слое, который он охотно отдает, жадно вступая в различные химические соединения. Это щелочной металл. Следует указать на атом кислорода, имеющий всего 8 электронов, но 6 электронов в L -слое. Этот атом легко достраивает свой слой двумя «чужими» электронами, взятыми, например, у двух атомов водорода, образуя устойчивую молекулу воды. Заканчивается L -слой благородным газом неоном, так как при $n = 2$ в этом слое должно быть ($2n^2$) 8 электронов. После этого начинается M -слой ($n = 3$). Первый атом — атом щелочного металла натрия. Однако в третьем и всеми последующими слоями происходят небольшие «неприятности» с точки зрения нашей простой схемы. Опять природа оказалась сложнее, чем мы ожидаем. Группы из 8 электронов наружного слоя оказались особо устойчивыми. Они имеют наименьшую энергию. Химические свойства определяются только внешним слоем. Поэтому благородным оказался газ, состоящий из атомов аргона ($Z = 18$), а также такие, как криптон, ксенон и родон. 3-й и 4-й слои электронов в атоме как бы перекрываются, и после 8 электронов N -слоя начинается застройка M -слоя ($n = 4$). В атомах калия и кальция первые два электрона этого слоя. Лишь затем идут остальные 10 элементов (от $Z = 21$ до $Z = 30$), атомы которых заполняются электронами N -слоя. После добавления 6 электронов M -слоя (2 уже были раньше) приходим опять к благородному газу криптому,

Квантовые свойства атомных ядер

Если структуру электронной оболочки атома и его устройство физики достаточно хорошо знают, то, к сожалению, этого нельзя сказать о строении атомного ядра. Это объясняется трудностью решения задачи о многих частицах,

Но ведь в атоме тоже много электронов, и все же можно было решить эту проблему. Да, но взаимодействие между электронами в атоме очень мало. Физики учли это взаимодействие как некоторую поправку, как «возмущение» электрического поля, действующего между электроном и атомным ядром, полем других электронов. Это оказалось возможным, потому что само силовое поле электронов ничтожно мало по сравнению с полем ядра.

Но для атомного ядра подобная теория «возмущения» неприменима. Прежде всего потому, что сила взаимодействия между ядерными частицами очень велика. Кроме того, в ядре нет такого тяжелого центра, как в атоме, вокруг которого распределяется «облако» легких частиц. По этой причине мы не имеем достаточно полного решения задачи о структуре атомного ядра.

Физики не создали какой-то единой модели атомного ядра, которая позволила бы рассчитать и объяснить все ядерные процессы. Для каждого круга явлений существуют свои модели, не применимые в других случаях.

Первая, каплевидная модель атомного ядра была создана Нильсом Бором в содружестве с американским физиком Уиллером. Ученые обратили внимание, что ядерные силы по своему действию похожи на силы сцепления между молекулами жидкости. В обоих случаях силы действуют только между соседними частицами. Ведь именно поэтому плотность жидкости не зависит от ее количества. В ядерном веществе плотность хоть и в миллиарды раз больше, чем в жидкости, тоже приблизительно одинакова для средних и тяжелых ядер.

Атомное ядро и в самом деле похоже на жидкую каплю! Нуклоны, находящиеся на поверхности ядерной жидкости, притягиваются внутрь неуравновешенными ядерными силами. Поэтому так же, как в жидкости, в ядре имеется поверхностная энергия. Ядро, как и капля, стремится уменьшить свою поверхностную энергию, и поэтому принимает приблизительно сферическую форму. Ведь шар из всех фигур равного объема имеет наименьшую поверхность. Если «нагреть» ядро, оно будет испускать «свет» в виде гамма-фотонов, как светится капля расплавленного железа. С поверхности горячего ядра могут «испаряться» ядерные частицы — нуклоны, так же, как с поверхности нагретой жидкости испаряются молекулы. Правда, температура ядра должна быть в миллиарды раз больше температуры обычной жидкости. Но это можно считать количественным отличием.

Существенно то, что ядерная жидкость всегда имеет большой электрический заряд: там имеются протоны. Собственно говоря, обычную жидкость тоже можно зарядить, как это делается, например, при электрической окраске. Жидкая кра-

ска, заряжаясь, распыляется на мелкие капли и осаждается на противоположно заряженной окрашиваемой поверхности. Очень важно, что заряженная жидкая капля может быть неустойчива и, если ее электрическая энергия больше энергии поверхностного натяжения, она будет делиться. Интересно отметить, что теория деления заряженной жидкой капли краски была создана физиками на базе, разработанной ранее Бором и Уиллером, теории деления тяжелых ядер.

Мы коснулись чисто качественной стороны капельной модели ядра. Но теория содержит и количественные расчеты. Можно, например, зная поверхностную энергию ядер и энергию электростатического расталкивания протонов, определить устойчивость ядра относительно его деления на более легкие ядра. Было показано, что все ядра, для которых $\frac{Z^2}{A} > 47,5$, будут мгновенно распадаться на более легкие ядра. Капельная модель так же хорошо объясняет деление тяжелых ядер при облучении их нейтронами, фотонами и другими элементарными частицами.

Можно задать вопрос: почему этот раздел называется «Квантовые свойства атомных ядер», а рассматривается капельная модель ядра? А кто-нибудь из скептически настроенных читателей (их не очень много) торжествующе заявит: «Вот, наконец, физики пришли к «правильному» пониманию природы микрочастиц. Модель ядра в виде жидкой капли — это чисто классическая модель, и она правильно интерпретирует ядерные процессы». Скептикам придется разочароваться. Прежде всего сама капельная модель использует квантовые представления. Ведь в ядерной жидкости действует силовое поле, квантами которого являются мезоны. При подсчете энергии связи в ядерной капле нужно учитывать, что избыточные нейтроны имеют более высокую энергию (изотопический член), а также эффект, вызываемый спинами отдельных нуклонов. Все эти явления чисто квантового характера. Вряд ли у кого-нибудь возникает сомнение в том, что свойства твердых тел кристаллических состояний, которые так сейчас широко интересуют ученых и инженеров, определяются квантовой физикой. Теория жидкого состояния, к сожалению, не так хорошо разработана, но и там, несомненно, все определяется квантовыми эффектами.

Но главное, конечно, в том, что модель ядерной капли — это статистическая модель. Она описывает достаточно хорошо лишь процессы, идущие в ядре, содержащем много нуклонов, и указывает только на средние значения энергии каждой частицы ядра. Можно говорить даже о «температуре» ядра, подразумеваемая под этим среднюю кинетическую энергию его частиц.

Однако, как и в каждой квантовой системе, частицы, под-

чиняясь принципу Паули, должны иметь свои энергетические состояния. Такую систему описывает так называемая оболочечная модель атомных ядер.

Опыт показывает, что в ядре можно обнаружить слоистое строение наподобие электронной оболочки атома. Такая конструкция связана с какой-то внутренней симметрией ядра, детали которой нам пока не очень хорошо известны.

Мы определили, что в атоме наиболее устойчивые состояния представляют собой симметричное электронное облако с законченным слоем. В ядре два сорта частиц: протоны и нейтроны. Поэтому, например, на самом нижнем энергетическом уровне ($n = 1$) должно быть четыре частицы. Ядро, состоящее из этих четырех частиц, особо устойчиво. Эта альфа-частица — ядро гелия — и она обладает наибольшей энергией связи из всех самых легких ядер.

Можно было бы предположить и дальше, что ядра, состоящие из таких групп, самые устойчивые, и что в таких ядрах должно было бы быть одинаковое число протонов и нейтронов. Однако это представление не оправдывается. Из экспериментальных данных видно, что в ядрах существуют определенные слои, состоящие из так называемого «магического числа» протонов или нейтронов. Ядра с законченным слоем, т. е. содержащие 2, 8, 20, 50, 82 и 126 протонов или нейтронов, наиболее устойчивы. Это подтверждается тем, что ядра с такими числами тех или других частиц наиболее распространены. Атом (следовательно, и химический элемент) с ядром, состоящим из магического числа протонов, имеет большее количество изотопов. А соседние ядра (по числу протонов) стремятся превратиться в магические путем радиоактивного распада. Особо устойчивыми являются ядра с магическими числами и протонов и нейтронов.

Так же, как и капельная модель, оболочечная модель ядра является идеализированной и не отражает всех свойств атомных ядер. Ее можно применять лишь для некоторого круга ядерных процессов.

Умирают ли атомные ядра

Процесс развития природы бесконечен. И особенно это заметно в живой природе. В химических и биологических процессах, конечно, принимают участие и элементарные частицы, атомы и атомные ядра. Например, фотоны, поглощаясь атомами, передают им свою энергию: способствуют химическому соединению. Фотосинтез играет исключительную роль в жизни на Земле. В различные химические соединения входят атомы, состоящие из электронов и ядер. Но атомы при этом практически не изменяются. Химические силы (эти силы на самом деле электростатические) слабо

на них влияют. Может быть, в какой-нибудь молекуле атом будет слегка «испорчен». Так, атом кислорода или другого элемента может занять у соседей или отдать им два электрона. Но свойства атома от этого почти не изменятся.

В неживой природе развитие идет значительно медленнее. Только за десятки, сотни и даже тысячи лет мы замечаем изменения берега моря и профиля холмов и возвышенностей. Но и там идут химические и физические процессы. Море размывает берега, происходит эрозия почв, горные породы растворяются... Но атомы и атомные ядра остаются неизменными. Собственно говоря, следует говорить об ядре. Ядра могут иметь разное количество нейтронов, но число протонов определяет конструкцию электронной оболочки, химические и оптические свойства всего атома.

Может быть, так было всегда? Ведь практически новых ядер, и, следовательно, атомов на Земле не образуется. Тогда вполне возможно, что атомы, из которых когда-то состоял страшный динозавр, входят в состав безобидных белых мышей, да и людей XX века. Такое заключение не имеет смысла. Ведь электроны, атомы, ядра, все элементарные частицы неразличимы. А если какие-нибудь атомы и мечены, то одной меткой отличаются не один или два атома, а целый класс, состоящий из многих миллиардов миллиардов атомов.

Но все-таки всегда так не было! Развитие материи бесконечно и в пространстве и во времени.

То, что окружает нас сейчас, это результат развития материи и форм ее существования. Мы еще не очень хорошо знаем, как развивалась материя даже в той части Вселенной, которая доступна нашим приборам. Но ученые твердо уверены, что никакого «первоначального толчка» и «сотворения мира» не могло быть.

Когда-то очень давно, может быть, десятки миллиардов лет назад, возможно, вместо нашей солнечной системы, да и Галактики, существовал межзвездный газ (в основном водород). В случайном скоплении массы газа возникли сильные гравитационные силы. Масса газа сжалась и стала расти, притягивая соседние частицы. Конечно, не так быстро, как растет снежный ком, скатываясь с горки: масштабы времени здесь — космические. Гравитационные силы совершали свою работу: газ нагревался до температуры в несколько миллионов градусов. Это был не простой газ, а скопление быстрых электронов и протонов. Здесь уже шли ядерные реакции, в которых образовывались более тяжелые ядра, например ядро гелия. Читатель, конечно, догадывается, что эта горячая звезда может являться фабрикой различных ядер. Как это происходит и как из газовой звезды или холодного газа образуются отвердевшие планеты, это тема для другой книги. Перед нами пример, показывающий, что не «всегда

так было», и когда-то тяжелые ядра образовались из более легких элементарных частиц: электронов, протонов и нейтронов.

Ну, а теперь на Земле неужели ядра «вечны»? Да, на нашей планете новые ядра образуются только лишь в космических лучах, в лабораториях физиков, в атомных электростанциях или при ядерных взрывах. Но это совсем не значит, что все ядра одинаково устойчивы.

В тяжелых ядрах нейтронов больше, чем протонов. В этих ядрах отталкивающие электростатические силы, действующие только между протонами, компенсируются чисто ядерными — между нейтронами. В основном состоянии ядра все частицы должны быть на нижних энергетических уровнях. Но, как мы уже знаем, на одном уровне, подчиняясь принципу Паули, может быть только равное число протонов и нейтронов. Поэтому избыточные нейтроны должны находиться на более высоких уровнях: нижние уже заняты. Это обстоятельство и приводит к тому, что наиболее тяжелые из существующих ядер перегружены нейтронами с большой энергией. Они менее устойчивы и стремятся путем радиоактивного распада перейти в более устойчивые ядра.

Конечно, не все ядра сразу превратятся в другие. Среднее время жизни радиоактивных ядер может быть очень различным — от нескольких миллионов и даже миллиардов лет до долей секунды. Обычно этот процесс характеризуется другой величиной: периодом полураспада. Это время, за которое распадается половина всех радиоактивных ядер.

Очень важно понять, что радиоактивность совершенно случайный процесс. Было бы неправильно сравнивать среднее время жизни радиоактивного ядра со средним временем жизни, например, человека. Вполне закономерно, что человек умирает не в юношеском, а в престарелом возрасте, так как изношенный организм старого человека сильнее подвержен различным заболеваниям.

Но нельзя говорить об «износе» радиоактивных ядер. Эти ядра «умирают» независимо от внешних обстоятельств. Законы радиоактивных превращений таковы, что с одинаковой вероятностью распадаются как «старые» давно образовавшиеся, так и «молодые» ядра, только что полученные в ядерном процессе.

Таким образом, «вечных» ядер нет не только в космическом пространстве. Даже на нашей планете происходят самопроизвольные превращения ядер. Сейчас ученым известно около 1300 различных сортов ядер (изотопов). Из них устойчивых примерно 300, остальные являются естественными или искусственными радиоактивными изотопами.

Переход радиоактивных ядер в более устойчивые обычно происходит не в одном, а в целой серии распадов. При этом

ядра излучают бета-частицы (электроны или позитроны), альфа-частицы, реже нейтроны и даже протоны.

Откуда же в ядре электроны или позитроны? Ведь оно состоит лишь из протонов и нейтронов, связанных между собой сильным взаимодействием, т. е. мезонами.

Для того чтобы ответить на этот вопрос, вспомним, что нейтрон имеет большую массу покоя, чем протон, и в свободном состоянии (т. е. в вакууме) является неустойчивой частицей.

Среднее время жизни свободного нейтрона около 17 мин., и он превращается в протон, электрон и антинейтрино. Но внутри ядра нейтрон устойчив, и различие в массах покоя с протоном не играет особой роли. Если ядро слишком перегружено нейтронами, то оно неустойчиво и освобождается от «лишних» нейтронов именно по описанной выше схеме. Протон остается в ядре, а две легкие частицы: электрон и антинейтрино — вылетают за его пределы.

Основную энергию при бета-распаде забирают легкие частицы, и эта энергия распределяется между электроном и антинейтрино. Выполняются также законы сохранения барионного и лептонного зарядов. В начале и в конце процесса барионный заряд был равен 1, а лептонный (электронный) — нулю. Именно поэтому здесь образуется антинейтрино с лептонным зарядом равным -1 . Легко понять, почему при такого рода распадах новое ядро имеет то же массовое число, а заряд на одну единицу больше.

Искусственная радиоактивность ядер может вызываться также и тем, что образованное в какой-либо ядерной реакции ядро перегружено протонами. Здесь уже протон превращается внутри ядра в нейтрон: его энергия может оказаться больше, чем энергия нейтронов этого ядра. В этом случае излучается позитрон и нейтрино. Новое ядро при позитронном бета-распаде уменьшает свой заряд на единицу.

Мы уже говорили, что ядро гелия (альфа-частица) представляет собой особо прочное образование. Поэтому при радиоактивном распаде может произойти своеобразное деление ядра на два, одним из которых является альфа-частица. Обычно при этом не получается сразу устойчивое ядро, и вновь образованное ядро испытывает еще несколько бета- и альфа-распадов, пока не станет устойчивым. Так, торий, излучая электрон, превращается в протактиний, а протактиний в уран.

Почти всегда при радиоактивном распаде новое ядро получается в возбужденном состоянии и переходит в нормальное, «высвечиваясь» гамма-квантом; электромагнитным излучением с короткой длиной волны.

Нейтронная радиоактивность обычно получается при делении тяжелых ядер. Осколки деления — это ядра, весьма

сильно перегруженные нейтронами. Они их и излучают. При этом изменяется только масса ядер, а их заряд остается прежним. Если «приготовленное» в результате ядерной реакции ядро сильно перегружено протонами, то оно может обладать протонной радиоактивностью. При нейтронной или протонной активности ядра обладают обычно очень малым временем жизни. Поэтому среди естественных радиоактивных ядер таких излучений не бывает.

Как можно «видеть» микромир?

Сейчас физики обладают настолько совершенной техникой, что не представляет особого труда заставить какую-либо частицу проникнуть в атомное ядро и произвести там огромные разрушения. Эту работу они производят на гигантских ускорителях, где заряженные частицы получают энергию в несколько десятков миллиардов электрон-вольт.

Единственная защита ядра от бомбардирующих заряженных частиц — это электростатические силы отталкивания: потенциальный барьер, окружающий ядро. Долгое время этот барьер был непроницаем. Когда Резерфорд около полувека назад произвел первую ядерную реакцию, в его распоряжении были только альфа-частицы, излучаемые естественными радиоактивными препаратами. Ядра гелия, прямо надо сказать, не очень подходящие бомбардирующие частицы. Их заряд равен двум единицам, и для них электростатическая броня ядер еще более внушительна, чем, например, для протонов. Все же в 1919 году Резерфорду удалось произвести первую искусственную ядерную реакцию. При бомбардировке ядер азота он получил ядра кислорода и быстрый протон.

Сейчас, когда сидишь в измерительной комнате ядерной лаборатории, то слышишь «музыку» щелчков механического счетчика, видишь мелькание неоновых лампочек и «лес» зеленых пик на экране осциллографа.

Неискушенному посетителю не сразу придет на ум, что каждый зеленый пик или мигание лампочки — это ядерная катастрофа. Ну, а щелчки механического счетчика слышатся значительно реже: пересчетное устройство облегчает его работу. Обычно произойдут только 64 ядерные реакции, а он щелкнет один раз. Но разве все ядерные превращения регистрируют эти приборы? Конечно, нет! «Глаз» физика (газовый счетчик, камера или другой прибор) занимает обычно небольшую часть пространства, окружающее вещество, откуда во все стороны летят продукты реакций — частицы. Но физик все учитывает: и распределение ядерных частиц в

пространстве, и неспособность прибора регистрировать все реакции, и воссоздает полную картину. Он «видит», как происходит ядерная реакция.

Еще немного, и кажется, что перед глазами ученого возникнет такая наглядная картина. На ядро летит бомбардирующая частица, ядро начинает «кипеть», и из него вылетают ядерные частицы, их группы и даже целое ядро меньшего размера.

Но разум подсказывает, что этого изображения мы никогда не увидим. Наглядную модель можно, конечно, построить, но нам она не только не поможет, а даже запутает. Только ум, не глаз и никакой другой орган чувств, способен понять и воссоздать полную картину ядерной катастрофы. А ведь глава озаглавлена: «Как можно «видеть»...» Но кавычки поставлены не зря. Надо понять, что такое видеть.

Вот перед нами глобус — модель земного шара, в темноте мы его не видим, не замечаем красок и линий, отмечающих моря, континенты и горы. Надо направить на него луч света, миллиарды миллиардов элементарных частиц — фотонов — бомбардируют глобус. Их поглощение, отражение и рассеяние делают глобус видимым. Но мы хорошо знаем, что это тот же глобус, который был невидим в темноте. Поглощенные фотоны слегка нагреют его поверхность, но никаких разрушений не произведут. Даже в полной темноте можно ощутить различать большие предметы. Так, слепой не может судить о красках глобуса, но ощупать его руками или даже палкой и сказать, что он круглый, может. Правда, при этом он произведет больше «разрушения», чем пучок света, оставив на глобусе отпечатки своих пальцев или вмятины от палки. Но все же он почти «видит» большой предмет.

Так можно видеть макромир: мир соизмеримых с нами тел. Но в микромире все будет иначе!

Дело совсем не в том, что наши глаза не способны видеть очень малые частицы. Для этого мы научились делать различные приборы, например микроскопы. Правда, обычный микроскоп не может различать тела размером меньше длины волны света (порядка 1 микрона). Но это не такая большая беда: нужно применять очень короткие волны, мы их не видим, но можем фотографировать увеличенное изображение. Электроны так же, как и фотоны, — это и частицы и волны. Поэтому ученые изготовили электронные микроскопы, где различают детали размером уже 0,01 микрона (10^{-6} см). Можно видеть мельчайшие живые существа — вирусы и большие молекулы органических веществ. Здесь как будто бы нет особых границ. Электроны можно ускорять до больших скоростей, тогда и длина волны $\lambda = \frac{h}{mv}$ будет очень короткой, и мы сможем фотографировать и атом (10^{-8} см), а затем и

ядра и электроны (10^{-12} — 10^{-13} см), и таинственный микромир будет зафиксирован на фотографии и даже в кинофильме. Может быть, мы получим фотографию, похожую на картинку атомов на различных выставках и обложках книг, кружочек, вокруг которого по эллипсам в разных направлениях движутся электроны?

Нет! Конечно, читатель понимает, что такой картины не будет: ведь у электронов нет орбит. Но что-нибудь фотограф получит? Да, конечно! Но это не будет тот первоначальный объект, предназначенный для съемки. Он будет значительно изменен тем «светом», которым мы осветим нашу микрочастицу.

Даже при съемке таких объектов, как вирусы, на электронном микроскопе мы получаем искаженное изображение. Обычно вирус умирает при «освещении» потоком быстрых электронов, а ведь он состоит из миллионов молекул. Что же говорить об изображении атома или ядра? Физики умеют создавать потоки заряженных частиц с подходящей длиной волны. Но эти частицы несут огромную энергию и производят большие разрушения в «освещаемой» картине, она получится искаженной.

Примерно так неумелый фотограф, ослепляя сильным светом человека, которого снимает, потом удивляется, что на фотоснимке получается искаженное лицо. Впрочем, наблюдательный художник, знающий, как искажается лицо при освещении, может воспроизвести нормальный портрет.

Физику это сделать даже легче, так как он может по приборам узнать, какого рода и насколько велико было искажение в «фотографии» микрочастицы. «Фотография» — понятие здесь условное. Никаких фотографий ядер Резерфорд не получал, когда обстреливал их альфа-частицами. Но замечая, куда попадают рассеянные бомбардирующие частицы, он довольно точно нарисовал «портрет» ядра, указав не только его размеры, но и массу и заряд, т. е. то, что на фотографии не видно.

Собственно говоря, никаких особых ультрасовременных электронных микроскопов для «рассмотрения» ядер и элементарных частиц строить не надо. Приборы такого типа у физиков уже есть: это ускорители заряженных частиц. Чем больше скорость или кинетическая энергия бомбардирующих частиц, тем короче длина волны де Бройля, и более мелкие частицы можно «увидеть».

Нейтроны с энергией 0,025 мэв (тепловые) получают в ядерном реакторе, где идет цепной процесс деления тяжелых ядер. Поток тепловых нейтронов из реактора направляют на изучаемый кристалл. Длина волн, сопутствующая этим нейтронам, $\lambda = 10^{-8}$ см, и они «осветят» атомы кристалла. Полученная дифракционная картина даст сведения о строе-

нии кристаллической решетки, т. е. расскажет о расположении атомов внутри кристалла.

Нейтроны ускорять нельзя: они не имеют электрического заряда. Поэтому когда надо «рассмотреть» ядро атома, то удобнее пользоваться ускорителями. Ведь размер ядра около 10^{-12} см, и, если мы хотим получить волну с подобной длиной, то придется ускорять протон до энергии порядка 1 мэв (10^6 эв). Изучая рассеяние этих протонов на атомных ядрах, мы сможем много сказать о самих ядрах (их заряде, массе, спине и энергетических уровнях). При бомбардировке легких ядер такими протонами можно произвести ядерные реакции. Для того, чтобы произвести разрушения более тяжелых ядер, приходится использовать более мощные ускорители.

Чем больше энергия бомбардирующих частиц, тем в более сокровенные участки микромира мы вступаем. При больших энергиях частиц мы внедряемся уже в структуру элементарных частиц. Одни частицы превращаются в другие. Открываем мир новых, странных частиц: гиперонов и различных мезонов. Облако мезонов, окружающее нуклон, разрушается, и оттуда вылетают уже не виртуальные, а сравнительно долго живущие мезоны. При столкновениях нуклонов с большой энергией рождаются новые пары: нуклон и антинуклон.

Но физики идут дальше. Нужно проникнуть еще глубже: узнать, как устроены элементарные частицы. Для этого нужны более сильные «микроскопы»: мощные ускорители заряженных частиц. Уже через год будет работать в Серпухове под Москвой ускоритель на 70 миллиардов электрон-вольт. Исследуются новые методы ускорения. Готовятся проекты для сверхгигантских ускорителей на 1000 миллиардов электрон-вольт.

Что мы узнаем? Может быть, мы найдем неуловимые кварки, а возможно, их вообще нет. Во всяком случае мы «увидим» много нового и прекрасного в этом сложном микромире. Но никогда этот мир не станет похожим на знакомый нам мир больших тел — макромир.

* * *

Перед нами прошел калейдоскоп чудесных явлений. Но в этих «чудесах» нет ничего сверхъестественного. Мы объясняем эти явления и узнаем о законах, которые ими управляют. И это вселяет нам веру, но не в мифическое высшее существо, а в величие человеческого разума, познающего очень сложный мир. Нигде мы не нашли ничего такого, чтобы говорило о существовании бога. Ничего — кроме бесконечной материи и различных форм ее существования.

СОДЕРЖАНИЕ

	<i>Стр.</i>
Введение	3
Классическая механика и классическая статистика	5
Волны или частицы	11
Новое миропонимание	13
Что такое элементарные частицы?	15
Силы, действующие в природе	16
Обменные силы	17
Античастицы	21
Странные частицы	24
Законы сохранения	31
Слишком много элементарных частиц	38
Ансамбль из элементарных частиц	41
Энергия атомного ядра	43
Атом — квантовая система	45
Симметрия химических элементов	50
Квантовые свойства атомных ядер	52
Умирают ли атомные ядра	55
Как можно «видеть» микромир	59

Ефим Михайлович Балабанов

В ГЛУБЬ АТОМА

Редактор *К. К. Габова*

Худож. редактор *Т. И. Добровольнова*

Техн. редактор *Е. М. Лопухова*

Корректор *З. С. Патеревская*

Обложка *Л. П. Ромасенко*

А 12463. Сдано в набор 9/VI 1967 г. Подписано к печати 19/VIII 1967 г. Формат бумаги 60×90/16. Бумага типографская № 3. Бум. л. 2,0. Печ. л. 4,0. Уч.-изд. л. 3,78. Тираж 94 000 экз. Издательство «Знание». Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4. Заказ 2081. Типография изд-ва «Знание». Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4.
Цена 12 коп.

ДОРОГИЕ ДРУЗЬЯ!

Открыта подписка на 1968 год на журнал «Наука и религия» — научно-популярный атеистический ежемесячный иллюстрированный журнал Всесоюзного общества «Знание».

1968 год будет десятым годом существования журнала. За это время он стал другом и советчиком многих десятков тысяч читателей.

В будущем году журнал расскажет о новейших научных открытиях, утверждающих материалистическое мировоззрение, о научном объяснении тайн человеческой психики, о том, как люди, исследуя мир, преодолевают заблуждения и суеверия, доставшиеся нам в наследство от далекго прошлого. Будут печататься статьи, корреспонденции, очерки о быте, нравах, обычаях и верованиях народов земного шара, о загадочных явлениях природы и о многом другом.

Журнал продолжит разговор по вопросам нравственности, о том, чем жив человек, о его духовном мире, о добре и зле, о вере и неверии, о прекрасном в искусстве и в жизни, о традициях, обрядах, обычаях.

Психологи, социологи, публицисты расскажут о социологических исследованиях религиозности, ее причинах, путях отхода людей от религии.

Намечается продолжить публикации статей под рубриками «Что человек может?», «Легенды и факты», «Наедине с собой», «Новое в мире древностей», «Споры и размышления», «Церковь и мир», «По векам и странам», «Быт и нравы народов», «Со всего света», «Рассказываю, что...», «Разные разности»...

Уже два года в журнале ведется раздел для школьников — «Странички юных». В нем будут публиковаться материалы по атеистическому воспитанию детей и молодежи.

Постоянный раздел журнала — «Школа атеиста». Здесь рассказывается об опыте лучших пропагандистов, даются методические советы, публикуются ответы на вопросы читателей.

В каждом номере вы найдете новый рассказ или повесть, статьи по искусству, рецензии на новые театральные спектакли, кинофильмы, книги.

Журнал «Наука и религия», пропагандирующий научное мировоззрение, интересен самым широким кругам читателей и пропагандистам атеизма, он необходим каждой городской, сельской, профсоюзной, школьной библиотеке, читальне, красному уголку.

Подписку на журнал принимают без всяких ограничений общественные распространители печати, отделы и агентства «Союзпечати», отделения связи во всех городах, районах, селах страны. Стоимость подписки на год — 3 руб. 60 коп., на полгода — 1 руб. 80 коп.

12 коп.

Индекс
70075

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЗНАНИЕ»
Москва 1967