

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК530.145
539.121

КВАНТОВАЯ ТЕОРИЯ И ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ *)

В. Вайскопф

Недавние открытия, в том числе установление новых свойств симметрии, вывели науку, изучающую элементарные частицы, на новый уровень.

«После рассмотрения всех этих вещей мне кажется вероятным, что Бог вначале сформировал Материю в виде цельных, массивных, твердых, непроницаемых, движущихся Частиц таких Размеров и Конфигураций, с такими Свойствами и Пропорциями в отношении к Пространству, которые более всего подходили бы к той цели, для которой он создал их. Эти первоначальные Частицы являются Твердыми Телами, гораздо более твердыми, чем то пористое Вещество, которое сформировалось из них; они настолько устойчивы, что никогда не изнашиваются и не распадаются на части; нет обыденных Сил, способных разрушить то, что сам Бог создал при Первом Творении. Оставаясь неделимыми, Частицы могут составлять Тела, во все Времена имеющие одну и ту же Природу и Структуру: если бы они разрушались или распадались на части, Природа Вещей, зависящая от них, изменилась бы. Вода и Земля, составленные из старых изношенных частиц и их осколков, не имели бы той же Природы и Структуры, что Вода и Земля, составленные, как это было вначале, из целых частиц. Из факта существования Мира следует поэтому, что изменения материальных вещей могут быть приписаны единственно Расщеплению и Установлению новых Связей и Движений этих Вечных Частиц».

Ньютон¹.

В этом хорошо известном и по праву знаменитом утверждении Ньютон признал логическую необходимость существования элементарных частиц для того, чтобы объяснить существование веществ с определенными свойствами, таких, как «Вода» или «Земля», металл или минерал, жидкость или газ и других веществ с характерными и всюду постоянными качествами. Материя должна разлагаться на некоторые сущности, которые и определяют эти качества. Эти сущности сегодня называют атомами или молекулами. Ньютон, однако, заглянул в самую суть проблемы: элементарные составляющие материи должны обладать специфическими свойствами, которые не меняются со временем; они не должны «изнашиваться от употребления», они должны быть невосприимчивы даже к очень сильному воздействию. Он решил эту проблему, предполагая, что они «несравненно тверже» и не поддаются разрушению при любом воздействии. Но сегодня мы знаем, что это не так. Атомы могут быть разрушены совсем обычной силой, например, горячей спичкой, правда, при этом они все еще обладают внутренней структурой. Когда вновь

*) V. F. Weisskopf, Science 149, 1181 (1965). Статья представляет собой доклад, прочитанный Генеральным директором ЦЕРНа В. Вайскопфом перед Американским физическим обществом в Вашингтоне 23-го апреля 1965 г. Перевод с английского В. Б. Мандельцевейга.

устанавливаются первоначальные условия, атомы возвращаются в прежнее состояние. Таким образом, то, что Ньютон подразумевал под «Первым Творением», происходит в любом месте, в любой момент времени. Мы имеем здесь пример хорошо определенной структуры, без постоянства составляющих ее единиц.

Сегодня мы знаем то, чего не знал Ньютон, а именно, что все рассмотрение следует вести на основе квантовой механики. Последняя базируется на очень простой идее, которая гласит, что энергия непосредственно связана с симметрией и структурой. Квантовая механика требует, чтобы состояния с низшей энергией имели простую структуру, которая определяется присущей системе симметрией. Это есть та симметрия, которая является формирующим структуру агентом. В атомном мире имеется два типа симметрий, которые являются определяющими. Это симметрия пространства по отношению к вращениям и трансляциям, и симметрия, связанная с перестановкой тождественных электронов.

Симметрия пространства определяет характер и структуру атомных состояний. Она допускает скалярную волновую функцию с одной компонентой, спинорную волновую функцию с двумя компонентами и т. д. Структура состояний определяется сферической симметрией кулонова поля ядра: состояния с наинизшей энергией, в частности, должны быть простыми сферическими гармониками. Перестановочная симметрия допускает две альтернативы: квантовое состояние может быть симметрично или антисимметрично по отношению к обмену частиц. Природа выбрала для электрона вторую альтернативу, что ведет к принципу Паули. Мы знаем сегодня, что спинорный характер электронной волновой функции является необходимым следствием этого. Благодаря этому имеется большое разнообразие структуры атомов, так как электроны вынуждены занимать более высокие уровни, если низшие уровни уже заполнены. Говоря несколько иначе, принцип Паули заменил собой классические представления о непроницаемости и твердости. Две тождественные частицы, подчиняющиеся принципу Паули, никогда не могут оказаться в одном и том же месте. Именно поэтому было разумно сохранить термин «частица» для тех сущностей, которые подчиняются принципу Паули.

Спектр энергетических уровней атома отражает эти основные симметрии. Видны характерные группы уровней — мультиплеты. Их состав, соответствующие им волновые функции и другие свойства определяются симметрией. Мы приходим, таким образом, к классификации атомных уровней с помощью квантовых чисел спина и углового момента.

Важно иметь в виду, что указанные симметрии определяют далеко не все свойства атомных состояний. Они определяют общую структуру атома и многие другие особенности, например, спектр уровней или некоторые детали, касающиеся вероятностей переходов между уровнями. Но они не дают никакой информации относительно размеров атома или энергии квантовых состояний. Эти свойства определяются величиной сил, которые связывают частицы внутри системы, и их природой. Одних симметрий недостаточно для полного описания системы; требуется, кроме того, знание динамических условий.

КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА И «ВЕЧНЫЕ ЧАСТИЦЫ»

Давайте вернемся вновь к замечаниям Ньютона. Устранила ли квантовая механика, описывающая атомную структуру, все те трудности, о которых говорит Ньютон?

Квантовая механика позволила глубоко проникнуть в происхождение фундаментальных закономерностей природы: оказалось, что внут-

реннюю структуру атомов и даже их свойства периодичности можно понять, не используя представления о бесконечной твердости атома. Но Ньютон не был бы полностью удовлетворен, если бы получил такой ответ. Ибо известно, что существуют другие частицы — электроны, ядра, которые сами обладают присущими им свойствами, такими, как масса, заряд, спин и магнитный момент. Следовательно, тот же самый вопрос возникает снова на более глубоком уровне. Являются ли частицы, составляющие атом, несравненно более твердыми частицами? Существуют ли обычные силы, которые могли бы их разрушить?

Что касается ядер, то тут ответ известен. Ядра могут быть разрушены обычными силами; они состоят из протонов и нейтронов. Внутренняя структура и виды ядер определяются теми же самыми свойствами симметрии, что и внутренняя структура атомов. Вот почему ядерная физика во многом сходна с атомной физикой, в частности, например, это сходство проявляется в существовании оболочечной структуры ядер и в мультиплетной структуре их спектра. Но квантовые состояния ядер, в отличие от состояний атомов, обладают дополнительной симметрией: ядерные силы не зависят от природы нуклона, т. е. от того, является ли нуклон протоном или нейтроном. Итак, нуклон можно представить в виде двух состояний, аналогично тому, что существуют два направления спина. Поэтому эта добавочная симметрия имеет форму инвариантности по отношению к вращениям символического спина, так называемого изотопического спина. Следовательно, квантовые состояния ядер имеют больше характеризующих их квантовых чисел, благодаря чему становится возможным группирование ядерных уровней в супермультиплеты, что отражает существование только что упомянутой симметрии. Изотопическая симметрия вносит и другую особенность: мультиплеты содержат состояния с различными зарядами, так как изобары, обладающие разными зарядами, принадлежат к тому же самому спектру и могут рассматриваться как состояния той же самой системы. Следует упомянуть также еще одно вновь возникшее обстоятельство: если в атоме переходы между состояниями спектра всегда сопровождались эмиссией кванта или его поглощением (это имело место по крайней мере в изолированных системах), то в ядрах существует и другой путь перехода из возбужденного в более низкое состояние, а именно испускание лептонной пары, т. е. пары, состоящей из электрона и нейтрино. Такой переход, конечно, имеет место лишь между различно заряженными состояниями. Если же отвлечься от только что указанных различий и от существования в мире ядер добавочной симметрии, то структура и динамические свойства ядер сильно напоминают структуру и динамические свойства атомов.

Здесь следует снова иметь в виду, что симметрии определяют только вид квантовых состояний и способы их группирования в мультиплеты. Размеры ядер и их энергия определяются действующими в них силами. Интересно поэтому сравнить размеры и энергии, характерные для атомов и ядер. Атом формируется электрическими силами, потенциал которых можно записать в виде $\frac{e^2}{r}$, где $\frac{e^2}{\hbar c} = \frac{1}{137}$; здесь e — заряд электрона, r — расстояние от центра поля, \hbar — постоянная Планка и c — скорость света. Из этого следует, что атомные размеры должны быть порядка боровского радиуса $a = \frac{\hbar^2}{m e^2}$, а атомные энергии [порядка ридберговской энергии $R_y = \frac{m e^4}{\hbar^2}$, где m есть масса электрона. Что касается ядра, то оно формируется ядерными силами, потенциал которых описать несколько

сложнее, но в который наибольший вклад дает так называемый юкавовский член $\frac{g^2}{r} \exp\left(-\frac{r}{r_0}\right)$, где $\frac{g^2}{hc} = 0,08$ и r_0 есть радиус действия ядерных сил. Если, хотя бы на мгновение, мы положим экспоненциальный фактор равным единице, мы получим точно тот же вид потенциала, что и в атоме; в этом случае следовало бы ожидать, что размер ядра порядка «ядерного боровского радиуса» $a_n = \frac{h^2}{Mq^2} = 2,5 \cdot 10^{-13}$ см, где M есть масса нуклона; энергия ядра будет порядка «ядерной ридберговской энергии» $R_N = \frac{Mg^4}{h^2} = 6$ Мэв. Эти значения и в самом деле дают правильную информацию относительно размеров и энергий, характеризующих ядерный мир. Тот факт, что a_n предсказывает правильную величину области действия ядерных сил, служит оправданием для опускания экспоненциального фактора в юкавовском члене.

БАРИОН

Удовлетворило ли бы Ньютона то, что изложено до настоящего момента? Не полностью; все элементарные частицы, по существу, сведены к трем: протону, нейтрону и электрону (мы здесь не считаем свет частицей, ибо он есть квант электромагнитного поля и подчиняется статистике Бозе. Нейтрино не принимается во внимание, так как оно никогда не появляется в качестве составной части материи). Но то, что эти частицы действительно существуют, все же является предположением: они имеют «данные Богом» свойства и, возможно, являются «абсолютно твердыми», так что их свойства не меняются в процессе «использования» этих частиц.

Давайте теперь попытаемся разобраться в ситуации, связанной с сущностью протонов и нейтронов. До сих пор никому не удавалось разбить нейтрон на составные части. Здесь еще не появился свой Резерфорд. Кажется, тем не менее, что нуклон все же не является «абсолютно твердым». Есть явные указания на существование у него внутренней структуры; известен и спектр возбужденных состояний нуклона. Эти состояния обычно не считают возбужденными, но, по-видимому, наблюдаемые явления вряд ли можно интерпретировать другим способом. Что, в самом деле, мы наблюдаем? Если нуклон подвергается облучению какими-либо высокоэнергичными частицами, он переходит в короткоживущие состояния, обладающие большой энергией; их называют по-разному, в частности, «гиперонами» или «резонансами». Термин «барион» употребляется обычно для тех состояний, которые рождаются либо в форме нейтрона и протона, либо в форме возбужденных состояний. В спектре барионных состояний протон и нейтрон фигурируют как основные состояния — они формируют фундаментальный дублет. (Правда, если говорить более строго, нейтрон в некотором смысле можно считать возбужденным протонным состоянием.) Остальные состояния можно получить, добавляя к нуклону, находящемуся в основном состоянии, энергию, необходимую для перехода в соответствующее возбужденное состояние. Заряд некоторых возбужденных состояний при этом отличен от зарядов основного состояния; они могут иметь также другие значения странности или гиперзаряда — квантового числа, характеризующего новые свойства симметрии, впервые встречающиеся именно при изучении этих явлений. Возбужденные состояния переходят в основное состояние посредством одного или нескольких шагов, и каждый такой шаг сопровождается

излучением π -мезонов, K -мезонов, квантов света или электрон-нейтринных лептонных пар. Заряженные мезоны и лептонные пары переносят заряд, и потому испускаются лишь в тех случаях, когда заряды возбужденного и основного состояния различны; K -мезоны наряду с зарядом переносят и странность, и потому испускаются в переходах, сопровождающихся изменением странности. При этом K -мезон переносит положительную единицу странного заряда, а анти K -мезон (\bar{K}) — отрицательную.

Отметим, что при переходах между квантовыми состояниями атома в основном имели место процессы поглощения или испускания световых квантов, связанных с электромагнитным полем. В атомных ядрах мы

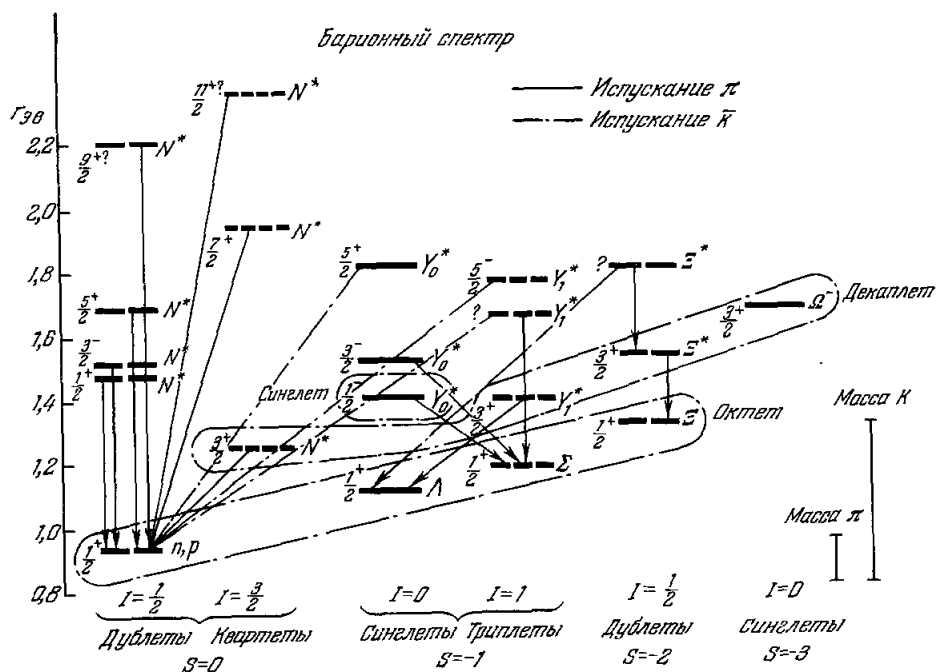


Рис. 1. Спектр энергетических состояний бариона.

Изотопический спин I и странность S приведены внизу; угловой спин и четность уровня приведены слева от него, обозначение уровня дано справа от него. Указаны также изотопическая краговость, переходы с испусканием мезонов, а также некоторые $SU(3)$ -мультиплеты.

находим, что, кроме эмиссии света, происходит испускание лептонных пар (электрон-нейтрино), которые порождаются слабым взаимодействием, связанным с лептонным полем. В спектре самих барионов мы, в дополнение к только что указанным двум видам эмиссии, находим переходы с испусканием мезонов, которые происходят благодаря сильному взаимодействию нуклонов с мезонным полем. На самом деле все три типа взаимодействий действуют во всех трех случаях. Однако разность энергий между атомными состояниями слишком мала, чтобы было возможным испускание лептонных пар, ибо энергия, необходимая для этого, должна быть равна по крайней мере $0,51 \text{ Мэв}$, так как одним из лептонов является электрон. Разность энергий между ядерными уровнями вполне достаточна для излучения лептонных пар (β -радиоактивность), но слишком мала, чтобы могли испускаться мезоны, ибо самый легкий из них имеет массу около 140 Мэв . В спектре барионов наиболее существенную роль

играют как раз мезоны, хотя обычные переходы (с испусканием световых квантов и лептонных пар) при этом отнюдь не исключаются.

Позвольте нам привести несколько примеров перехода между нуклонными состояниями. Простейший пример есть испускание π -мезона при переходе в основное состояние из первого возбужденного барионного состояния — мультиплета, изотопический и обычный спин которого равны $3/2$. Это состояние имеет ту же самую странность, что и основное состояние; поэтому переход между ними сопровождается испусканием π -мезона. Заряд испускаемого π -мезона зависит от разности зарядов

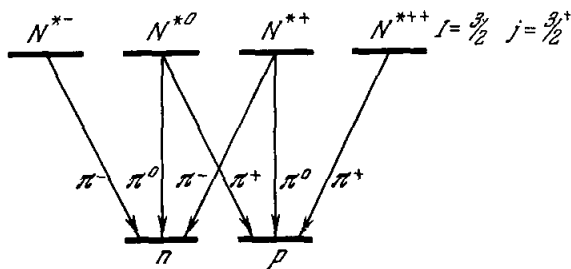


Рис. 2. Переходы между $(3/2, 3/2)$ состоянием и основным состоянием бариона.

I — изотопический спин, j — обычный спин.

между рассматриваемыми состояниями (рис. 2). В качестве другого примера можно привести переход из сильно возбужденного состояния, странность которого отличается от странности основного состояния; поэтому, чтобы перенести странность, должен быть испущен K -мезон. Несколько необычная ситуация имеет место для слабо возбужденных со-

стояний с различными странностями, которые обозначаются символами Σ , Λ и Ξ . Они не могут перейти в основное состояние посредством испускания K -мезона, так как масса K -мезона выше, чем разность энергий. Эти состояния поэтому должны были бы быть стабильными, если бы закон сохранения странности являлся точным (как, например, закон сохранения обычного заряда). На самом же деле странность сохраняется во всех взаимодействиях, за исключением слабого взаимодействия. Поэтому из этих состояний в основное состояние происходят очень медленные переходы, индуцированные слабым взаимодействием и сопровождающиеся испусканием π -мезонов или лептонных пар. Следовательно, низколежащие состояния со странностью, отличной от нуля, являются метастабильными состояниями, медленно переходящими в единственное существующее истинно стабильное состояние, которым является протон. Возбуждение метастабильных состояний происходит обычно путем двухступенчатого процесса: сначала нуклон переходит в одно из возбужденных состояний с той же странностью; этот переход происходит, например, при столкновении с протоном или путем поглощения π -мезона; затем он переходит в состояние с другим гиперзарядом, испуская K -мезон. Это — так называемое связанное рождение, так как конечный продукт состоит из двух частиц с противоположной странностью: возбужденного бариона и K -мезона.

БОЗОННЫЙ СПЕКТР

Эксперименты, проведенные на мощных ускорителях, привели к открытию не только спектра возбужденных состояний нуклонов, но также и к открытию другого спектра: спектра мезонов, или бозонного спектра (рис. 3). Тщательные исследования мезонов, рожденных при столкновениях быстрых частиц, показали, что π - и K -мезоны не являются единственными видами мезонов, возникающих в результате реакций. Оказалось, что существуют целые серии возбужденных состояний, обозначаемых различными буквами: ρ -мезон, ω -мезон, η -мезон и т. д., по отношению к которым π - и K -мезоны являются низколежащими состо-

яниями. На самом же деле даже π - и K -мезоны не являются истинно стабильными состояниями, так как посредством слабого взаимодействия они распадаются на лептоны. Следовательно, их можно рассматривать в качестве основного состояния мезонного спектра только в том случае, когда процессами, в которых участвует слабое взаимодействие, можно пренебречь.

В переходах из возбужденного состояния в низколежащее состояние энергия испускается главным образом в форме мезонов. Например, так

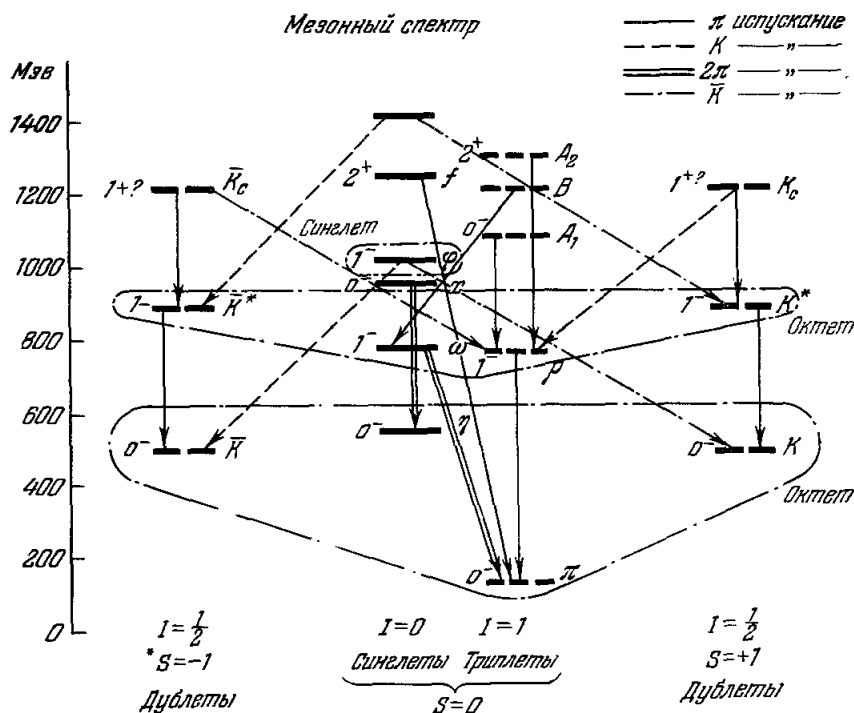


Рис. 3. Спектр энергетических состояний мезона.

называемый ρ -мезон распадается на два π -мезона. Мы можем интерпретировать это как переход из ρ -мезонного состояния в низколежащее π -мезонное состояние с испусканием другого π -мезона. На рис. 3 показаны наиболее важные квантовые состояния бозонного спектра, известные сегодня, и указаны соответствующие им квантовые числа*). Здесь мы находим те же квантовые числа, что и в ядерном спектре — обычный и изотопический спин и четность, но, кроме того, и новое квантовое число, присущее и ранее рассмотренному барионному спектру — «странность».

Существование таких возбужденных мезонных состояний, возможно, не так удивительно, как кажется с первого взгляда. Давайте рассмотрим эту ситуацию с точки зрения аналогии между квантами света и мезонами. Оба сорта частиц являются квантами поля; кванты электромагнитного поля с его источником (зарядом) определяются малой константой

*) В последнее время имеются указания на то, что состояний, обозначаемых символами A_1 , B и K_c , не существует, так как соответствующие им пики в сечениях реакций можно объяснить другим способом, из кинематических соображений. Подробные таблицы барионного и бозонного спектров см. УФН 89 (4), 718 (1966). (Прим. перев.).

$\frac{e^2}{\hbar c} = \frac{1}{137}$. Это есть слабая связь. Связь ядерного поля с его источником (нуклонами) во много раз сильнее: соответствующая величина $\frac{G^2}{\hbar c} = 15$.

Это много больше, чем величина $\frac{g^2}{\hbar c} = 0,08$, с помощью которой можно оценить величину ядерных сил внутри ядра; дело в том, что ядерные силы обладают тем свойством, что они становятся весьма слабыми в случае взаимодействия между нуклонами, относительный импульс которых является нерелятивистским, как это имеет место при движении нуклонов в ядре. Для этого специального случая соответствующая константа связи умножается на фактор $\frac{g^2}{G^2} = \frac{m_\pi}{2M}$, где m_π — масса π -мезона и M — масса нуклона. Это, однако, имеет большое значение и в общем случае, например, при рассмотрении сил, действующих между частицами с большими относительными импульсами или между частицами и античастицами.

Благодаря этому обстоятельству мы можем иметь теорию ядерной структуры, основанную на относительно слабо взаимодействующих протон-нейтронных системах, но такая теория не будет иметь отношения к структуре высших барионных состояний. Если бы соответствующая константа взаимодействия, характерного для ядерной структуры, была бы порядка G , ядерное возбуждение было бы порядка барионных возбуждений; при этом явления, характерные для ядерной физики и для физики элементарных частиц, стали бы столь близко соотноситься друг с другом, как например, явления, характерные для физики мезонов и барионов.

Очень сильная связь между полем и источником имеет целый ряд следствий, которые всегда легче понять путем экстраполяции представлений, свойственных электродинамике. Известно, например, что два кванта света слабо взаимодействуют друг с другом. Однако если бы константа взаимодействия была больше единицы, взаимодействие бы очень усилилось и стало бы сравнимым с энергией квантов. Поэтому неудивительно в этом случае получить состояния, в которых несколько квантов поля оказались бы связанными воедино. Такие связанные состояния, по-видимому, появятся в теории, правильно описывающей природу возбужденных мезонных состояний. При этом остается открытым ответ на вопрос, почему нет мезонов с нулевой массой покоя, которые, казалось бы, должны существовать по аналогии с квантами света. Является ли это обстоятельство особенностью сильного взаимодействия, или же оно есть результат существенного различия свойств электромагнитного и мезонного полей? Это очень интересная проблема, пути разрешения которой в настоящее время совершенно непонятны.

Упомянутые выше свойства взаимодействия двух световых квантов являются следствием того факта, что эти два кванта могут переходить в электрон-позитронную пару. Так как константа связи между нуклонами и мезонами велика, виртуальные пары при формировании мезонных состояний должны играть значительно более существенную роль. Поэтому кажется вполне разумным считать мезонные состояния состояниями барион-антибарионной системы. Действительно, не может быть существенного различия между связанными состояниями квантов поля и состояниями барион-антибарионной системы, так как первые могут переходить в последние, и наоборот. Из-за того, что взаимодействие сильное, любое такое связанное состояние будет содержать значительное количество барионов и антибарионов с разными спинами и одинаковой симметрией.

ГАРАНТИЯ СТАБИЛЬНОСТИ БАРИОНОВ

В действительности следует считать, что не только мезоны, но также и барионы окружены виртуальными барион-антибарионными парами. Кроме того, сильно взаимодействующий мезон, находящийся в поле бариона, также может рождать виртуальные пары. Таким образом, физический мезон и физический барион на самом деле являются крайне сложными системами, которые могут описываться лишь как смеси огромного числа различных состояний: они содержат любое число барионных пар и связанных мезонных состояний, обладающих соответствующими квантовыми числами. Основное различие между барионными и бозонными состояниями состоит в том, какое число B барионов присутствует. Барионный спектр содержит все состояния, для которых это число равно единице (при этом антибарионам соответствует отрицательное барионное число), бозонный спектр содержит все состояния с $B = 0$.

Спектр состояний с $B > 1$ является ядерным спектром с числом нуклонов $A = B$ и содержит, кроме того, спектр изобарических гиперядер. Такой спектр будет иметь как основную, так и тонкую структуру. Тонкая структура есть структура обычного ядерного и гиперядерного спектра, который построен на основной структуре, возникающей благодаря возбуждению одного или нескольких нуклонных состояний.

Сейчас мы выясним причину, по которой в мезонном спектре даже низколежащее состояние метастабильно и распадается посредством слабого взаимодействия в лептонные пары, в то время как основное состояние барионного спектра — протон — истинно стабильно, как и основные состояния всех спектров с $B > 1$. Дело в том, что барионное число B сохраняется во всех взаимодействиях; следовательно, только мезоны могут исчезать, распадаясь в лептоны; барионы должны существовать всегда, чтобы гарантировать стабильность нашего мира.

Таким образом, если рассматривать барионы и мезоны под указанным углом зрения, можно считать, что мезон есть не что иное, как некоторое состояние барион-антибарионной системы и что любое состояние бариона есть не что иное, как комбинация другого барионного состояния и нескольких мезонов. Другими словами, любое из этих состояний разумно считать комбинацией ряда других состояний. Отсюда возникла попытка получить самосогласованное описание всей совокупности частиц; это направление получило название «метода зашнуровки». Суть «метода зашнуровки» заключается в требовании, чтобы все массы и константы взаимодействия были бы такие, что любые возможные комбинации давали бы самосогласованные результаты.

Благодаря сложной природе физических барионов и мезонов процессы их взаимодействия сегодня можно объяснить путем выделения из окружающих физические барионы и мезоны частиц, именно тех, которые кажутся особенно существенными для данного типа взаимодействия. Например, столкновение, в котором от одной частицы к другой передается единица заряда или странности, представляется в виде обмена мезоном, несущим эти квантовые числа. Такое полуквантовое описание время от времени приводит к успешному объяснению некоторых характерных экспериментальных особенностей. По существу, это описание сводится к попытке выбора некоторой типичной диаграммы Фейнмана, которая отвечает одному из многих возможных механизмов взаимодействия, причем выбранный механизм считается гораздо более существенным, чем все остальные. Такой метод описания годится для так называемых «периферических процессов».

Природа двух новых спектров, спектра барионов и спектра бозонов, все еще не исследована. Их вид, возможно, указывает на существование некоторой внутренней структуры этих существей, точно так же как вид атомных и ядерных спектров указывает на существование внутренней структуры атомов и ядер. Однако в последних двух случаях мы знаем динамику: именно, мы знаем, что атомный спектр представляет собой спектр квантовых состояний электрона, движущегося в кулоновом поле, и что ядерный спектр есть спектр квантовых состояний нуклонов, движущихся под воздействием сил взаимного притяжения. Знание динамики позволяет нам установить свойства симметрии, которые определяют соответствующие квантовые числа и соответствующие мультиплеты. Это также позволяет нам, по крайней мере в принципе, вычислить энергии, размеры и другие характеристики квантовых состояний.

Что касается барионного и бозонного спектров, то здесь ситуация совершенно другая. Мы до сих пор не имеем определенного представления о динамической природе этих частиц. Мы не можем поэтому и установить какие-либо их свойства симметрии. Однако эмпирический вид спектра определенно обнаруживает мультиплетную структуру его, что указывает на существование некоторых симметрий, хотя бы и приближенных; динамика, соответствующая этим симметриям, пока неизвестна.

Обратимся теперь к бозонному спектру. Здесь сразу видны следующие характерные особенности: 1) симметрия по отношению к положительной и отрицательной странности, так как каждой частице, принадлежащей к некоторой группе, отвечает ее античастица в другой группе, 2) бозоны, для которых $S=0$, являются по отношению к самим себе античастицами, 3) частицы со странностью, по модулю равной единице ($|S|=1$), обладают изотопическим спином $I=1/2$. Отсюда следует, что бозоны ведут себя так, как если бы они являлись комбинацией одного кварка и одного антикварка. Если берутся два кварка с $I=1/2$, $S=0$, то соответствующая комбинация дает $I=0$ или 1 и $S=0$. Эти бозоны

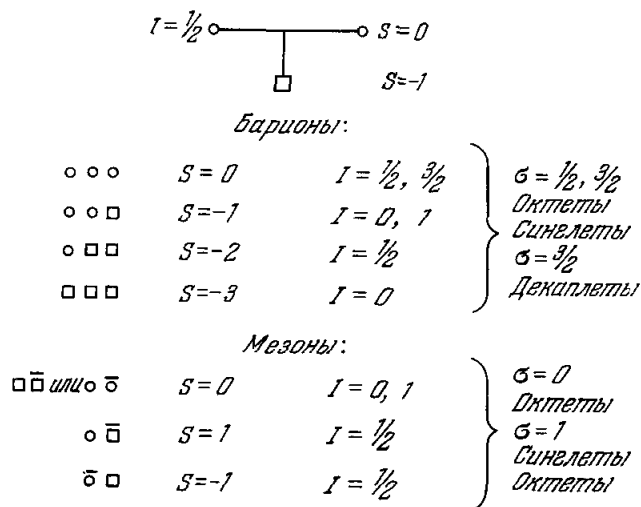


Рис. 5. Комбинации трех основных «кварковых» состояний и комбинации пар «кварк — антикварк».

Указаны результирующие странность S , изотопический спин I и угловой момент σ .

«специальная унитарная группа», базисом которой являются два фундаментальных состояния; эта группа хорошо известна как группа, лежащая в основе формализма обычного и изотопического спина. Она базируется на «выделении» двух фундаментальных состояний, например, протон-нейтронной пары, и служит для анализа свойств ядерных структур, возникающих из-за инвариантности при замене этих базисных частиц друг на друга. Хорошо известно, что этот формализм ведет к мультиплетной структуре спектра. Мы имеем, прежде всего, основной протон-нейтронный дублет (изотопический спин $1/2$), затем систему двух нуклонов, состоящую из синглета и триплета, которым отвечают изотопические спины нуль и единица, кроме того, систему трех нуклонов, состоящую из дублета и квартета с изотопическими спинами $1/2$ и $3/2$ соответственно.

Группа $SU(3)$ базируется на «выделении» трех состояний; два из них представляют собой основной изотопический дублет с нулевой странностью; третье же состояние обладает равным нулю изотопическим спином, но несет равный единице странный заряд, который обычно считается отрицательным (рис. 4). Очевидно, что в первом приближении разумно в качестве основного состояния этого фундаментального триплета выбрать протон, нейтрон и гиперон. Однако вскоре оказалось, что действительная ситуация является гораздо более сложной и интересной.

Давайте внимательно посмотрим на спектр барионов. Здесь имеются изотопические спины $I = \frac{1}{2}$ и $3/2$ со странностью $S = 0$, $I = 0$ и 1 с $S = -1$, $I = \frac{1}{2}$ с $S = -2$ и $I = 0$ с $S = -3$ (рис. 5). Что же это означает? Это указывает на тот факт, что барионы ведут себя так, как будто они являются комбинацией членов базисного триплета. Последние получили уродливое прозвище «кварки». Не следует смущаться от того, что число три вошло двумя различными способами: во-первых, кварк существует в трех состояниях; во-вторых, барион считается комбинацией трех кварков. Давайте теперь посмотрим, как работает вся эта схема. Имеется три сорта кварков: пара с изотопическим спином $I = \frac{1}{2}$ с $S = 0$ и третий с $I = 0$, но $S = -1$. Какие барионы мы можем построить, если каждый барион должен быть комбинацией трех кварков? Если употребить три кварка с $I = \frac{1}{2}$ и $S = 0$, мы получим систему с $I = \frac{1}{2}$ или $3/2$ и $S = 0$; если взять два кварка с $I = \frac{1}{2}$ и $S = 0$ и один с $I = 0$, $S = -1$, мы получим системы с $I = 0$ или 1 и $S = -1$; если взять два кварка с $I = 0$, $S = -1$ и один с $I = \frac{1}{2}$ и $S = 0$, получим $I = \frac{1}{2}$ и $S = -2$ и, наконец, если употребить все три кварка с $I = 0$, $S = -1$, мы получим $I = 0$ и $S = -3$. Это как раз точно те состояния, которые действительно присутствуют в барионном спектре.

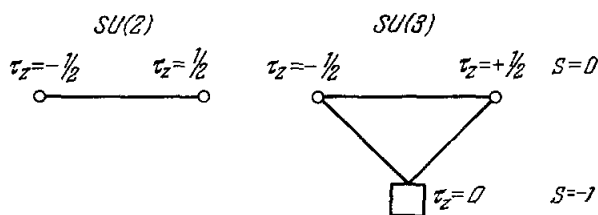


Рис. 4. Слева: два основных состояния группы $SU(2)$, z — компонента изотопического спина которых равна $\tau_z = \frac{1}{2}$ и $-\frac{1}{2}$.

Справа: три основных состояния группы $SU(3)$, содержащих основную пару, отвечающую группе $SU(3)$, и третье состояние с $S = -1$ и $\tau_z = 0$.

Обратимся теперь к бозонному спектру. Здесь сразу видны следующие характерные особенности: 1) симметрия по отношению к положительной и отрицательной странности, так как каждой частице, принадлежащей к некоторой группе, отвечает ее античастица в другой группе, 2) бозоны, для которых $S=0$, являются по отношению к самим себе античастицами, 3) частицы со странностью, по модулю равной единице ($|S|=1$), обладают изотопическим спином $I=1/2$. Отсюда следует, что бозоны ведут себя так, как если бы они являлись комбинацией одного кварка и одного антикварка. Если берутся два кварка с $I=\frac{1}{2}$, $S=0$, то соответствующая комбинация дает $I=0$ или 1 и $S=0$. Эти бозоны

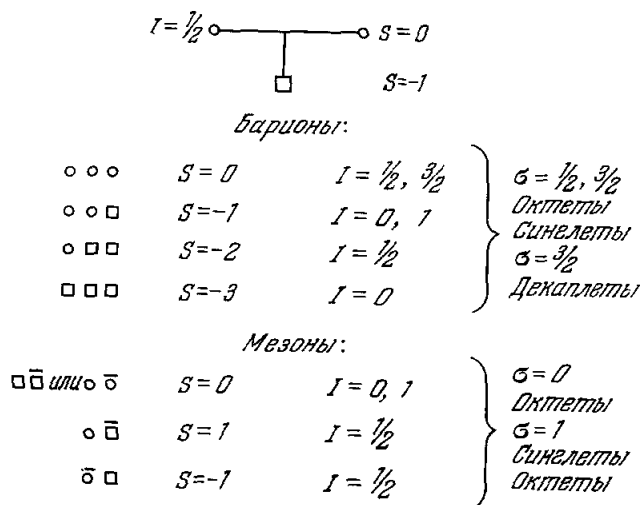


Рис. 5. Комбинации трех основных «кварковых» состояний и комбинации пар «кварк — антикварк».

Указаны результирующие странность S , изотопический спин I и угловой момент σ .

являются античастицами по отношению к самим себе. Если же взять в качестве одного из кварков кварк второго типа ($I=0$, $S=-1$), получается мезон с изотопическим спином $\frac{1}{2}$ и $S=+1$ или -1 в зависимости от того, вошел ли в его состав кварк второго типа или антикварк. Комбинации с $S=+1$ и $S=-1$ по отношению друг к другу являются античастицами.

Детальная количественная разработка этих идей приводит к еще более удивительному согласию с наблюдаемыми фактами. Если, например, предположить, что силы, которые связывают воедино эти гипотетические кварки, инвариантны по отношению к замене типов кварков друг на друга, можно получить супермультиплетную структуру уровней для трех кварковых и кварк-антикварковых систем. Математический формализм показывает, что трехкварковые системы дают начало синглетам, октетам и декаплетам, в то время как кварк-антикварковые системы приводят к возникновению синглетов и октетов. Например, барионный октет будет состоять из протона, нейтрона, трех Σ , Λ и двух Ξ . Декаплет состоит из 10 наблюдаемых барионных состояний, угловой момент которых равен $3/2$. Один из бозонных октетов содержит три пиона, два каона, два антикаона и η -мезон (см. рис. 1 и 2).

Предположение о полной эквивалентности трех типов кварков приводит к тому, что члены мультиплетов должны иметь одинаковые массы. На самом деле это не так: они отличаются по энергии намного сильнее, чем члены изотопических мультиплетов, которые являются подгруппами $SU(3)$ -мультиплетов. Однако расщепление по энергии внутри $SU(3)$ -мультиплетов подчиняется определенному правилу, и это есть как раз то правило, которое предсказывается $SU(3)$ -формализмом в случае существования слабых сил, нарушающих симметрию.

Грубо говоря, это расщепление можно объяснить с помощью простого нарушающего симметрию предположения, а именно, если предположить, что кварк, обладающий странностью, тяжелее двух других. При этом становится понятной общая тенденция увеличения масс с увеличением абсолютного значения странности. Более тонкие рассуждения дают возможность ввести расщепление по массе между членами мультиплета с одинаковой странностью. Поразительна точность, с которой подтвердились эти предсказания. Таким образом было предсказано и барионное состояние со странностью -3 , знаменитая Ω -частица, которая затем была найдена. Следствия приближенной симметрии не ограничиваются энергетическими расщеплениями; оказывается возможным найти определенные количественные соотношения между другими характеристиками членов данного мультиплета, такими как магнитные моменты или вероятности перехода. Все эти предсказания в общем выполняются довольно хорошо.

$SU(6)$ -СИММЕТРИЯ

Недавно физики-теоретики попытались не только объединить в один триплет частицы, несущие изотопический спин и странность, но привлечь также дополнительные свойства симметрии, которые могут быть связаны с обычным спином. Кварки являются частицами спина $1/2$; таким образом, на самом деле имеются не три основных состояния кварков, а шесть основных состояний, так как каждое из трех состояний кварков может иметь спин, направленный вверх или вниз. Если предположить, что наряду с вышеизложенными инвариантностями имеет место также инвариантность по отношению к изменениям направлений обычного спина, мы получим так называемую $SU(6)$ -симметрию. Следствия этой более высокой симметрии выполняются удивительно хорошо. Из нее вытекает, например, что мультиплеты, состоящие из кварка и антикварка, должны иметь спины, равные 0 и 1, а системы из трех кварков должны иметь полный угловой момент либо $1/2$, либо $3/2$, причем декаплет может появиться только в качестве второй альтернативы. Это как раз то, что выполняется в природе. Кроме того, получаются очень интересные предсказания, касающиеся магнитных моментов: впервые удалось теоретически объяснить, почему отношение магнитного момента протона к магнитному моменту нейтрона равно $3/2$. Очень важным аспектом $SU(6)$ -симметрии является объединение воедино углового и изотопического спина. Это помогает глубже понять фундаментальную роль концепции спиноров для описания частиц. Пока что, однако, идея такого объединения приводит к целому ряду трудностей. Они возникают из-за того, что угловой спин неразрывно связан с орбитальным угловым моментом. Вспомним, что угловой момент релятивистской частицы состоит из спиновой и орбитальной частей, которые скомбинированы различными путями в так называемые «большие» и «малые» компоненты. Только в нерелятивистском пределе можно говорить отдельно о формализме углового спина. В изотопическом же пространстве такого понятия, как орбитальный момент, разумеется, нет. Аналогия изотопического и углового спинов, основанная

на «выделении» в каждом случае двух основных состояний, в релятивистском случае разрушается.

Успешное применение новых симметрий для описания состояний элементарных частиц кажется весьма впечатляющим. По-видимому, барионы и мезоны действительно классифицируются согласно некоторым принципам, которые мы только начинаем постигать. Они сгруппированы в мультиплеты, которые характерны для трехчастичной системы или системы частица—античастица и сконструированы из особенно простых гипотетических частиц. Но это совсем не означает, что физические барионы и мезоны построены из кварков точно так же, как атомы построены из ядер и электронов. Триплет кварков употребляется лишь для того, чтобы сконструировать некоторые довольно сложные мультиплеты, наблюдаемые в спектре. Лучше понять ситуацию позволит следующая аналогия: квант света переносит спин 1; простейший возможный спин, однако, равен $1/2$, и в принципе можно считать, что спин-единица появляется в результате сложения двух спиноров. Но из этого совсем не обязательно следует, что квант света должен быть системой двух частиц, спин которых равен $1/2$.

Имеются некоторые заключения, которые можно вывести из факта существования $SU(3)$ - или $SU(6)$ -мультиплетов. Мы не знаем сегодня внутреннюю динамику барионов и мезонов, но кажется очевидным, что механизмы, управляющие этой динамикой, должны быть приближенно инвариантны по отношению к преобразованиям, соответствующим замене одного типа кварков на другой. Таково логическое содержание наблюдающейся на опыте $SU(3)$ - или $SU(6)$ -инвариантности. Важно, что эта инвариантность является приближенной; наблюдаемые закономерности в распределении масс членов мультиплетов являются характерным, но малым нарушением инвариантности. Хотя на самом деле разность энергий значительна — она достигает нескольких сотен миллионов электронвольт, — связь между распределениями может быть такой, которая наблюдается только в том случае, если эта разность энергии создается относительно слабым взаимодействием. Это означает, что существуют две силы: одна из них $SU(6)$ -инвариантна и очень велика, так что соответствующая ей энергия много выше, чем миллиард (10^9) электронвольт; другая не $SU(6)$ -инвариантна, но значительно слабее, и именно она ответственна за расщепление мультиплетов.

Итак, открытие новых инвариантностей никоим образом не решает проблему выяснения структуры нуклонов и мезонов. Наоборот, теперь очевидно, что проблема является гораздо более сложной, чем это казалось с самого начала. Динамические силы, ответственные за внутреннюю структуру, по-видимому, соответствуют энергиям, гораздо более высоким, чем те, с которыми мы привыкли иметь дело в настоящее время. И хотя нам начинает становиться понятным вид спектра, оказывается, что этот спектр является всего лишь тонкой структурой. Большая часть открытых до сих пор возбужденных состояний близко связана друг с другом; они являются членами одного мультиплета, или, говоря иначе, они являются на самом деле одним и тем же состоянием, рассматриваемым в различных направлениях абстрактного пространства. Именно поэтому мы и можем найти простые соотношения, существующие между наблюдаемыми квантами этих частиц. Когда был обнаружен известный в настоящее время спектр нуклона, мы прежде всего надеялись получить инградиенты, существенные для понимания структуры нуклона; точно такую же роль сыграла в свое время формула Бальмера для водородного спектра, дав Бору ключ для разгадки динамики атома водорода. Теперь же создается такое впечатление, что мы сегодня знаем лишь эффекты

более слабой и, вероятно, менее важной части динамического взаимодействия. Эффект главной части его, по-видимому, спрятан где-то в области много больших энергий. Мы как бы увидели пик, и решили, что это вершина горы; когда же мы забрались на него, заметили, что существует другая вершина, закрытая от нас темными облаками.

ПРОБЛЕМА ЭЛЕКТРОНА

На этот вопрос Ньютона ответ пока не известен.

Ранее мы не понимали причину стабильности свойств нуклона. Но были найдены определяющие симметрии, и мы в принципе находимся на пути к более глубокому пониманию причин, обуславливающих существование нуклона. Однако мы еще в долгу перед Ньютоном по поводу электрона. Электрон кажется проще по многим причинам, прежде всего потому, что он не участвует непосредственно в сильном взаимодействии с частицами, принадлежащими к недавно открытому миру барионов и мезонов. Он взаимодействует с этими частицами только через электрическое поле и слабое взаимодействие. Но мы почти ничего не можем сказать, чтобы ответить на вопрос Ньютона и удовлетворить наше собственное любопытство относительно причин, по которым электрон имеет наблюдаемые нами свойства. Правда, мы поняли гораздо лучше, чем раньше, связь электрона с электромагнитным полем. Квантовая электродинамика позволяет нам вычислить все эффекты с точностью, которая кажется сколь угодно большой. Но стройность этой теории нарушается отсутствием каких-либо объяснений заряда и массы электрона. В теории они «перенормируются» и берутся равными своим экспериментальным значениям. Будучи неспособны объяснить их, мы до сих пор вынуждены из-за своего невежества предполагать, что эти характерные величины даны нам свыше. Чтобы еще ухудшить наше положение, природа снабдила нас вторым сортом электрона — мюоном, который, как в настоящее время считают, отличается от обычного электрона только массой. Причины этой двойственности пока еще совершенно не ясны.

СЛАБЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Еще более таинственную роль играют эти два электрона в слабом взаимодействии. Установлено, что все известные частицы взаимодействуют посредством универсального слабого взаимодействия. Характерной особенностью такого процесса взаимодействий является тот факт, что обязательно происходит обмен зарядом. Когда электрон взаимодействует с нуклоном, он передает свой заряд нуклону и переходит в незаряженное состояние: получается нейтрино. Наиболее привычной формой такого процесса является бета-распад, в котором, например, протон переходит в нейтрон и при этом испускается позитрон-нейтринная пара. Эмиссия позитрона здесь эквивалентна поглощению электрона; следовательно, указанный процесс соответствует столкновению «входящего» электрона с протоном, причем в результате столкновения их заряды изменяются. Тяжелый электрон по отношению к слабому взаимодействию ведет себя точно так же, как и его более легкий двойник. Он также переходит в незаряженную форму, называемую нейтретто или мюонным нейтрино, которая, как это сейчас твердо установлено, отличается от электронного нейтрино. До сих пор не было обнаружено ни малейших намеков на существование у лептонов внутренней структуры. При исследовании электромагнитного взаимодействия обоих сортов электронов не было обнаружено никакого отклонения от точечного заряда и ничего,

что можно было бы считать спектром лептонов, не существует, если только исключить разделение их на две формы, заряженную и незаряженную.

Второй очень важной особенностью слабого взаимодействия является нарушение в нем закона эквивалентности четностей. Процессы, протекающие в левой и правой системе координат, уже не являются эквивалентными. В самом деле, оба сорта нейтрино всегда появляются со спином, противоположным их движению (левая спиральность). Как выяснилось совсем недавно, эта асимметрия слегка смягчается тем фактом, что античастицы показывают точно противоположные свойства при слабом взаимодействии; антинейтрино, например, обладает правой спиральностью. Следовательно, процессы слабого взаимодействия инвариантны по отношению к инверсии и преобразованию частица-античастица (*CP*-инвариантность). Впоследствии, однако, экспериментами по распадам K^0 -мезонов была поставлена под сомнение и эта инвариантность.

Барионы обладают слабыми взаимодействиями во всех квантовых состояниях. В таких процессах, однако, изотопический спин и странность не сохраняются. Интересно заметить, что слабое взаимодействие высоковозбужденных состояний барионов кажется тесно связанным со слабым взаимодействием протонов и нейтронов. Такая ситуация еще раз подчеркивает эквивалентность различных барионных состояний в смысле $SU(6)$ -симметрии. Слабое взаимодействие сталкивает нас с другой фундаментальной проблемой: наше теперешнее предсказание о процессах взаимодействия требует существования поля, служащего для передачи взаимодействия, такого, как электромагнитное или мезонное поле. Есть ли в природе такие поля для слабого взаимодействия? Недавние поиски квантов, соответствующих такому полю, дали отрицательный результат. Означает ли это, что масса такого кванта больше, чем тот предел, который может быть найден для нее на сегодняшних ускорителях (около двух масс протона), или же наши обычные полевые представления неприменимы к слабому взаимодействию?

РЕЗЮМЕ

Давайте теперь подведем итоги тому, что мы можем ответить сегодня на вопросы Ньютона о причинах, обуславливающих стабильность свойств природы. Характерные и хорошо определенные структуры атомов и ядер основаны на симметриях квантовых состояний этих сложных объектов. Но причины стабильности составляющих этих объектов еще изучены очень плохо. Мы сталкивались в этой статье с двумя типами основополагающих сущностей: они фигурировали под именами лептонов и адронов. Лептоны представляют собой два электрона, каждый из которых может находиться в заряженном и незаряженном состоянии; под адронами понимаются все мезоны и барионы. Как мы знаем, эти сущности взаимодействуют друг с другом четырьмя различными способами, которые мы перечисляем в порядке возрастания их силы: посредством гравитационного, слабого, электромагнитного и сильного взаимодействий. Мы сейчас исключим гравитацию из дальнейшего рассмотрения, так как ее роль в мире элементарных частиц в настоящее время совершенно не известна.

Слабыми взаимодействиями обладают как лептоны, так и адроны; электромагнитно взаимодействуют все частицы, несущие заряды или магнитные моменты; сильные взаимодействия существуют только между адронами. Сегодня мы не знаем, имеют ли адроны внутреннюю структуру; следовательно, пока не ясно, должно ли сильное взаимодействие рассматриваться как взаимодействие между их составляющими.

Симметрии взаимодействия устанавливают большинство свойств этих сущностей и являются поэтому существенными определяющими факторами. Интересно, что число симметрии увеличивается с ростом силы взаимодействия. Все взаимодействия подчиняются трансляционной и ротационной симметрии пространства, в котором они действуют. Эти симметрии кажутся нам совершенно естественными. Все взаимодействия подчиняются также двум другим законам сохранения, которые в настоящее время уже не так хорошо понятны: сохранению заряда и сохранению барионного и лептонного числа. Четность и странность, однако, слабым взаимодействием не сохраняются. Они сохраняются только электромагнитными и сильными взаимодействиями; закон сохранения изотопического спина справедлив лишь для сильных взаимодействий. $SU(6)$ -симметрия действительна для сильных взаимодействий, но у этих взаимодействий существует сравнительно слабая часть, которая ее нарушает (см. табл.)

Таблица

Четыре взаимодействия и их симметрии

Взаимодействие	Трансляция и вращение	Сохранение заряда и барионного числа	Сохранение четности	Сохранение странности	Сохранение изотопического спина	$SU(6)$
Слабое	×	×				
Электромагнитное	×	×	×	×		
Сильное	×	×	×	×	×	
Очень сильное	×	×	×	×	×	×

Итак, чем сильнее взаимодействие, тем большей симметрией оно обладает. Имеет ли этот замечательный факт какое-либо значение для объяснения существования элементарных частиц? Может быть, что некоторое число принципов симметрии определяют динамические принципы, которые затем формируют свойства фундаментальных единиц. Может также оказаться, что адроны и лептоны вообще не являются основными структурами; адроны, в частности, могут быть сложными системами, состоящими из частиц типа кварков. Если бы такая ситуация имела место, протон и нейтрон были бы чем-то вроде молекулы, сделанной из фундаментальных частиц; ядерные силы между нуклонами были бы подобны силам Ван-дер-Ваальса и являлись бы результатом много более мощных взаимодействий, действующих внутри «молекулы». При этом проблема элементарных частиц все равно бы возникла, но на более высоком уровне, когда потребовалось бы ответить на вопрос, почему существуют кварки? Более вероятно, однако, что действительное решение проблемы будет иметь новые и совершенно непредвиденные формы.

В заключение высказанных нами замечаний мы приведем еще одно пророческое утверждение Ньютона, которое звучит так, как будто было сделано только сегодня:

«Итак, мельчайшие Частицы Материи могут соединяться воедино благодаря очень сильному Притяжению, и составлять большие частицы, но обладающие меньшим Совершенством, а эти последние могут снова объединяться и образовывать еще большие Частицы, но еще менее совершенные и эта непрерывная последовательность будет продолжаться до тех пор, пока дело не дойдет до конца последовательности, до огромных

Частиц, от которых зависят Процессы в Химии, Цвет природных Тел и которые, объединяясь, дают сложные Тела ощутимых Размеров. Имеются поэтому в Природе Агенты, способные заставлять Частицы Тел слипаться вместе при очень сильном притяжении. И цель экспериментальной философии — найти их»².

ПРИМЕЧАНИЕ АВТОРА

Эта статья не содержит ссылок на литературные источники, за исключением ссылок на Ньютона. Работа по установлению полного списка всех источников, откуда было взято столько великолепных идей, кажется совершенно непосильной. Единственным смягчающим обстоятельством, которое автор может принести в оправдание столь серьезного проступка, является тот факт, что ни одна из приведенных здесь идей не принадлежит ему самому.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Newton, Optics. Dover, New York, 1952, стр. 400; имеется русский перевод: И. Ньютона, Оптика, М., Гостехиздат, 1954, стр. 303.
 2. Там же, стр. 394.
-