

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

539.12

ТРИ СПЕКТРОСКОПИИ *)

В. Вайскопф

Экзотические частицы, получаемые на больших ускорителях, можно рассматривать как спектр возбужденных состояний, которые переходят в небольшое число основных состояний. Аналогичные состояния существуют и в двух более старых спектроскопиях.

В текущем столетии усилия физиков понять основные «кирпичи» природы представляют собой последовательность загадок, за которыми следуют прояснения и снова загадки. В этом процессе физики научились строить машины для столкновения частиц с другими частицами все возрастающей энергии. За простыми катодными трубками, которыми пользовались для ускорения электронов на рубеже текущего столетия, пришли машины Кокрофта и Уолтона и Ван-де-Граафа, а за ними вскоре последовали циклотроны, бетатроны и протонные синхротроны все возрастающих размеров и стоимости. Последняя из этой серии — это грандиозная машина, которая должна быть построена в Вестоне, штат Иллинойс (США); она должна ускорять протоны до энергий 200 Гэв.

Каковы же итоги этих исследований? Можно ли суммировать результаты, полученные в течение двух третей столетия, при анализе структуры материи? Эта статья представляет собой попытку дать краткий обзор того, чему мы научились.

В настоящее время ясно, что атомы и молекулы — составные части материи — освобождают энергию в виде квантов, или пакетов энергии. Наиболее известные кванты — это фотоны, представляющие собой пакеты излучения, которые мы воспринимаем как видимый свет, но которые известны также и как рентгеновские или γ -лучи, когда они несут большую энергию, или как радиоволны, когда они несут очень малую энергию. Атомы и молекулы, поднятые тем или иным способом в возбужденное состояние, переходят вниз в состояния с меньшей энергией и при этом испускают один или несколько квантов. Изучение спектроскопистами подобных процессов испускания в первой четверти текущего столетия повело к полному пониманию строения атома *вне* атомного ядра. Возбужденные состояния атомов и кванты, ими испускаемые, образуют первую из названных мною трех спектроскопий.

Когда стало технически возможно возбуждать атомное ядро, пользуясь нейтронами и ускорителями частиц, было найдено, что ядро также испускает кванты, возвращаясь в более низкие энергетические состояния.

*) Victor F. Weisskopf, The Three Spectroscopies, Sci. Amer. 218 (5), 15 (1968). Перевод Э. В. Шпольского.

Эти кванты состоят не только из фотонов очень высокой энергии (γ -лучи), но также из нового вида квантов: пар лептонов, каждая из которых состоит из электрона и нейтральной частицы исчезающе малой массы — нейтрино. Возбужденные состояния и испускания квантов атомного ядра составляют вторую из трех спектроскопий (рис. 1).

Третья спектроскопия в течение долгого времени не была признана как таковая, т. е. как спектроскопия. Вместо этого физики, которые

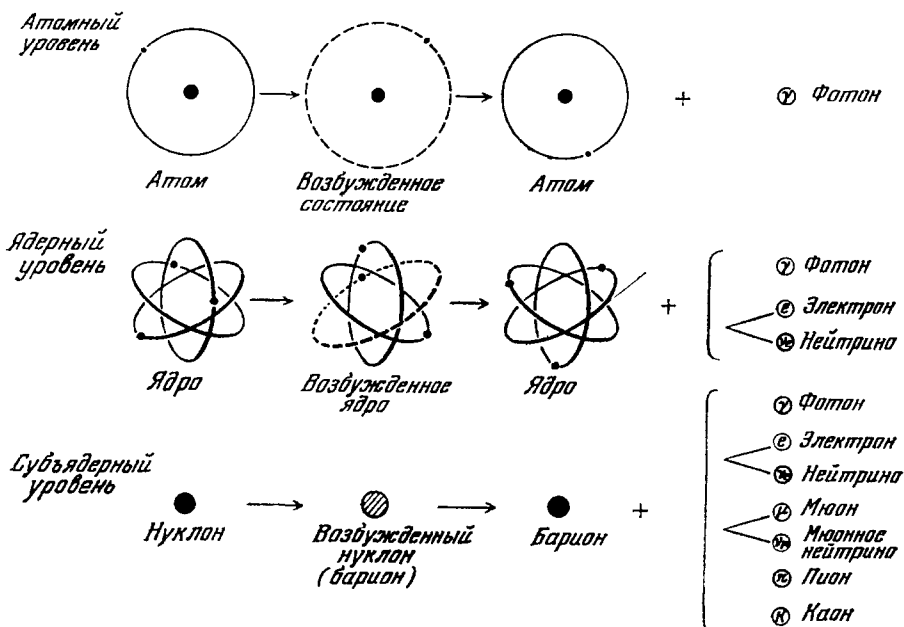


Рис. 1. Три спектроскопии, обсуждаемые в настоящей статье,— это атомная, ядерная и субъядерная спектроскопии.

В каждом случае частица материи, поднятая на возбужденный уровень, возвращается в состояние с меньшей энергией, испуская пакет энергии — квант. Возбужденные атомы испускают фотоны, которые являются квантами электромагнитной энергии. Возбужденные ядра испускают не только фотоны, но и «пары лептонов», каждая из которых состоит из электрона и нейтрино. Субъядерные частицы, такие, как протон и нейтрон (нуклоны), поднимаются в возбужденное состояние под действием пучков высокой энергии протонов или электронов в ускорителе частиц. Термин «барион» означает нуклон во всех различных стадиях возбуждения. Барионы известны под различными специальными названиями в зависимости от величины массы (энергии) (см. рис. 12). Барионы в возбужденных состояниях обладают коротким временем жизни, испускают один или несколько квантов энергии и переходят в более низкое состояние. Эти кванты представляют собой своеобразные «индивидуумы» — лептонные пары мюонов и μ -нейтрино, а также мезоны; наиболее известными из них являются пионы и каоны.

пользовались мощными ускорителями, построенными после второй мировой войны, предполагали, что, когда протон высокой энергии ударяет другие протоны или нейтроны, возникает поток новых элементарных частиц, которые почти мгновенно превращаются в более стабильные формы. Около 1958 г. говорили несколько неуверенно о 30 или примерно такого порядка числе «элементарных» частиц, а через немного лет число частиц превысило 100. Постепенно среди физиков укрепилось мнение, что разумно заключить следующее: новые ускорители просто позволили открыть еще один вид спектроскопии, и вместо того чтобы говорить о коротко живущих формах новых частиц, их следует рассматривать как новую систему возбужденных состояний. Когда эти состояния распадаются, переходя в менее энергичные состояния, они испускают не только такие кванты, как фотоны и лептоны, но также и новый вид квантов с вещест-

венной массой — мезоны. Таким образом, третья спектроскопия не только включает кванты первых двух, но и привносит свои собственные, отличные от предыдущих кванты.

Пройдем теперь вновь тот путь, который привел физиков к интерпретации поведения возбужденной материи в терминах испускания квантов. Понятие о световом кванте было введено Максом Планком в 1900 г. Он понял, что

для объяснения того, каким образом вещество испускает излучение, атомы должны испускать энергию в количествах, кратных некоторой элементарной (irreducible) величине (постоянная Планка h). Эти пакеты энергии, позднее названные фотонами, приобрели более глубокую реальность, когда в 1905 г. Альберт Эйнштейн показал, что электроны, испускаемые металлом в ответ на бомбардировку светом, имеют энергию, пропорциональную частоте падающего света. Это ведет к тому, что свет данной частоты сконцентрирован в квантах, энергия которых пропорциональна этой частоте. Более того, коэффициент пропорциональности в выражении этой энергии есть как раз постоянная Планка. Итак $E = h\nu$, где E — энергия фотона, а ν — частота света. Это не ограничивает возможные энергии световых квантов, поскольку любые частоты могут быть достигнуты в виде света от того или иного источника.

Ситуация оказывается иной, если рассматривать определенные механические системы, будь то атомы или молекулы. Оказывается, что энергия таких систем может принимать только специфические и строго определенные величины. Последовательность таких величин характерна для данного вида атомов или молекул (рис. 2—3). Исторически под спектром разумелась вся совокупность линий, которые испускает и поглощает атом. Вскоре, однако, было распознано, что частоты спектральных линий всегда равны разности между двумя членами из ряда «термов». Таким образом, именно величины термов и определяют линейный спектр. Теперь мы знаем, что каждый терм соответствует определенному энергетическому состоянию атома. Когда атом совершает переход из одного

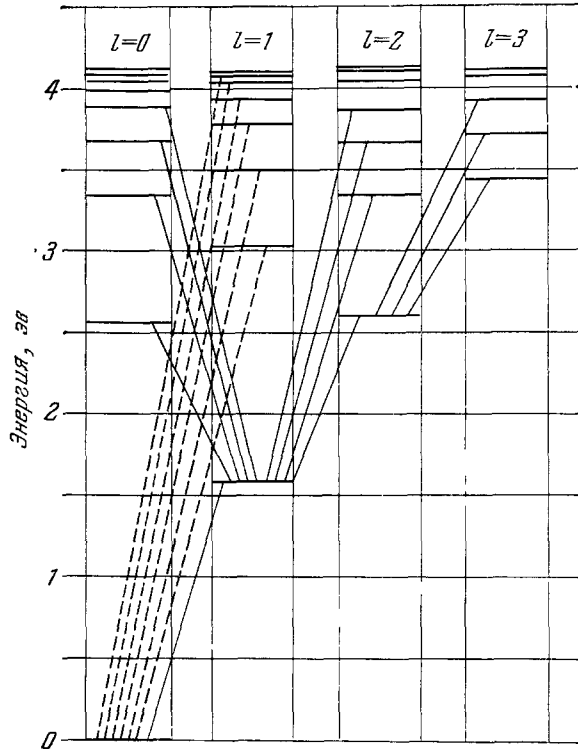


Рис. 2. Спектр калия состоит из многих квантовых состояний (горизонтальные линии), причем все они соответствуют различным энергетическим уровням над основным состоянием.

Каждый столбец содержит состояния с одним и тем же угловым моментом l . Структура отдельных линий, обусловленная спином, опущена. Наклонные соединяющие линии указывают некоторые из наиболее частых переходов от высшего состояния к низшему. Пунктиром отмечены переходы, соответствующие спектральным линиям, приведенным на следующем рисунке.

энергетического состояния в другое, разность энергий испускается в форме светового кванта, энергия которого равна разности энергий двух состояний, деленной на постоянную Планка.

Спектр энергетических состояний есть важный источник информации о внутренней динамике атома. В простейшем из всех атомов — атоме водорода — значения энергии выражаются простой формулой (часто называемой формулой Бальмера) $E_n = -R/n^2$; здесь R — постоянная, равная 13,6 е, а n — целое число. Величины E_n отрицательны потому, что они относятся к энергии связанного электрона: это — энергия, которая необходима для освобождения электрона из данного состояния.

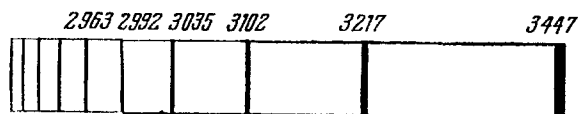


Рис. 3. Спектр поглощения паров калия обнаруживает спектральные линии в области между 2900 и 3500 Å в ультрафиолетовой части спектра.

Шесть линий с идентифицированными длинами волн соответствуют переходам, отмеченным пунктиром на предыдущем рисунке. Этот рисунок основан на спектрограмме, опубликованной Максом Борном около 30 лет назад.

Квантовая механика дает нам средство для понимания не одного только водородного атома, но и всех других атомов и молекул. Основа для нашего понимания такова: каждое квантовое состояние соответствует определенной вибрационной картине электронных волн, удерживаемых в непосредственном соседстве с ядром кулоновскими силами притяжения, или, иначе говоря, электрическими силами между ядром и электронами. Частоты колебаний этих волновых картин определяют энергии квантовых состояний соотношением Планка между энергией и частотой $E = h\nu$.

В 1926 г. Эрвин Шрёдингер вычислил прежде всего картины электронной волны, определяемой притяжением ядра, несущего заряд, равный единице. Когда он умножил эти частоты на постоянную Планка h , он получил очень простой результат: формулу Бальмера для водородных термов. В последующие за этим открытием годы физики применяли уравнение Шрёдингера с большим успехом к более сложным атомам, а также к молекулам.

Существует небольшое число фундаментальных симметрий, которые позволяют систематизировать атомные энергетические состояния. Одна из этих симметрий — это сферическая симметрия электрического поля ядра. Она приводит к некоторым определенным картинам электронных вибраций, похожих на вибрационные картины металлического диска. Каждая из этих картин соответствует определенному моменту количества движения, который всегда должен быть целым кратным $h/2\pi$. Это важное выражение имеет свой символ $\hbar$ (читается « h перечеркнутое»). Чем больше момент, тем сложнее картина. Более высокие моменты дают начало более коротким длинам волн, а в результате — большим числам гребней и впадин в волновой картине. Важнее всего то, что для каждого значения углового момента $l\hbar$ существует $2l + 1$ различных состояний, которые все имеют одинаковую энергию. Они дают начало всем видам мультиплетов: синглетам при $l = 0$, триплетам при $l = 1$ и т. д. Отдельные состояния, образующие мультиплет, имеют одинаковую энергию и соответствуют, известным образом, различным направлениям углового момента в пространстве.

Имеется вторая важная симметрия в атомах с несколькими электронами. Хотя эта симметрия носит формально математический характер, она может быть представлена в терминах принципа исключения Паули, который просто утверждает, что каждый электрон в атоме должен иметь отличную от других волновую картину. Если бы все электроны в атоме могли занимать одно и то же квантовое состояние, то они все располагались бы в наинизшем состоянии, в состоянии, которое является водородным состоянием. Поэтому все атомы были бы очень похожи на водород. Богатое разнообразие химических элементов обусловлено тем фактом, что каждый добавляемый электрон должен находиться в новом квантовом состоянии. Атомы благородных газов (гелий, неон и т. д.) — это такие атомы, в которых число электронов точно заполняет «замкнутую оболочку»: ряд картин, которые, комбинируясь, образуют сферически-симметричную картину.

Электронные картины нескольких атомов способны взаимодействовать и связывать атомы между собой, образуя молекулу. Простейшими примерами служат молекулы, в которых полное число электронов равно числу электронов в благородном газе. Возьмем, например, молекулу метана (CH_4), которая имеет то же самое число 10 электронов, что и благородный газ неон (рис. 4). Ядро углерода и четыре водородных ядра образуют симметричное расположение внутри сферической электронной оболочки; концентрации их в центре препятствует электрическое отталкивание ядер. Если имеется энергия, которая достаточна для того, чтобы сблизить их против взаимного отталкивания на столь малое расстояние, что уже вступают в действие ядерные силы, притягивающие их друг к другу, то они сольются в одно большое ядро, и таким образом из метана образуется неон. Подобная энергия имеется внутри звезд, где и происходит эта реакция.

Строение атомов и молекул основано на электронно-волновых картинах, которые соответствуют полю притяжения атомных ядер. Молекулы — это просто атомы с более чем одним ядром. Поэтому атомные и молекулярные свойства целиком определяются зарядом ядра и массой: заряд определяет число электронов, которые могут собраться (около этого ядра), и вид их волновых картин. Поскольку масса ядра во много раз больше массы электрона, ядра являются массивными центрами атомов и молекул, положения ядер определены и мало меняются под влиянием движения электронов.

Ядра настолько малы, что они действуют на электроны, по существу, как точечные заряды. Существуют, однако, слабые, но важные эффекты, обусловленные магнетизмом некоторых ядер. Но, помимо этих эффектов, внутренняя структура ядер существенно одинакова для атомного и молекулярного миров. В этом отношении ядра действуют как элементарные частицы с фиксированной массой, зарядом, спином и магнитным моментом. Таким образом, все явления, которые мы нормально встречаем на

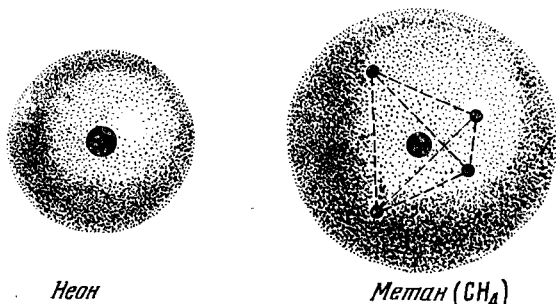


Рис. 4. Замкнутые оболочки из 10 электронов окружают ядро неона (слева) и пять ядер молекулы метана (справа).

Как неон, так и метан обязаны своей устойчивостью тому, что они имеют структуру, состоящую из замкнутых оболочек. В метане, простом газе, шесть электронов доставляются атомами углерода, а четыре — атомами водорода. Углеродный атом расположен в центре тетраэдра, образованного водородными ядрами.

Земле, — все различные силы, такие, как химические силы, упругие силы, когезионные силы связи, капиллярные силы, — все являются следствием электрического притяжения между ядрами и электронами. Разнообразие притяжений происходит от богатства волновых картин и их поведения при взаимодействии (interlacing). Когда я говорю здесь об атомной спектроскопии, я включаю сюда спектроскопию всех систем, построенных из атомов: газов, жидкостей, молекулярных твердых тел и гигантских молекул живой материи.

Нетрудно показать, как размеры и энергия атомов непосредственно следуют из связи между электрическим притяжением и квантовой механикой. Рассмотрим водородный атом. Здесь мы находим две противодействующие тенденции. Ограничивающая тенденция кулоновских сил

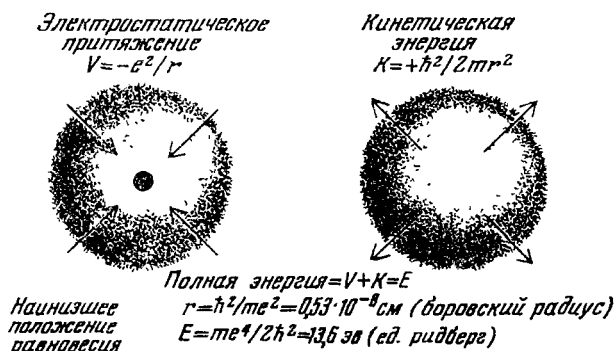


Рис. 5. Энергия и размеры атома водорода определяются равновесием между силой электростатического притяжения V отдельных электронов атома к положительно заряженному ядру, и кинетической энергией электронов K , стремящейся расширить радиус орбиты электрона.

Противодействующие друг другу силы находятся в равновесии, когда радиус становится равным $0.53 \cdot 10^{-8}$ см (так называемый радиус Бора), а энергия связи равна 13,6 эв. Эта энергия связи называется энергией Ридберга. В формулах на рисунке h — постоянная Планка, деленная на 2π ; m и e — масса и заряд электрона.

притяжения благоприятствует малой величине радиуса r : чем меньше радиус, тем меньше потенциальная энергия $-e^2/r$ сил притяжения. Этой тенденции противопоставляется «размазывающая» тенденция кинетической энергии, которая благоприятствует большему r , так как более протяженная картина соответствует большим длинам волн, а поэтому и меньшей скорости. Обе тенденции должны друг друга сбалансировать. Наимизшее равновесие достигается, когда радиус r принимает значение $\hbar^2/me^2$. Это — боровский радиус, который равен $0.53 \cdot 10^{-8}$ см. Соответствующая энергия связи электрона, называемая ридберговой энергией, дается выражением $R = me^4/2\hbar^2$. Она равна 13,6 эв (рис. 5).

Ситуация в случае других атомов более сложная, но результаты не слишком сильно отличаются от водородных. Последний (внешний) электрон в каждом атоме зависит от структуры, состоящей из ядра и всех электронов, кроме одного. Эта структура имеет положительный заряд, равный единице, и действует на последний электрон сходно с тем, как действует протон. По этой причине размеры и электронные картины внешних электронов у всех атомов, грубо говоря, такие же, как размеры водородного атома, а энергии — того же самого порядка величины

Электромагнитная природа электронно-ядерной связи определяет, таким образом, размеры и энергию связи атомов. Она определяет также размеры молекулярных структур. Расстояния между атомами в молекуле приблизительно равны протяжению электронных картин внешних электронов, поскольку их переплетение дает начало молекулярной структуре. Энергия, необходимая, чтобы отщепить атом от молекулы, должна быть порядка величины разности энергий, соответствующих электронным картинам в молекулярной связи и в изолированном атоме, т. е. приблизительно один или несколько электрон-вольт. Поэтому боровский радиус (или единица ангстрем, 10^{-8} см) является естественной единицей атомных и молекулярных размеров, энергия Ридберга (или несколько меньшее число электрон-вольт) является естественной единицей атомных и молекулярных энергий.

Эти цифры объясняют, почему процессы на поверхности Земли находятся под доминирующим влиянием атомных и молекулярных процессов. При комнатной температуре тепловая энергия каждого атома равна приблизительно одной десятой электрон-вольта; эта энергия настолько мала, что электронные картины не нарушаются при соударениях между атомами или молекулами; атомы и молекулы остаются целыми. С другой стороны, радиация, которая достигает Земли от Солнца, состоит главным образом из квантов с энергией в несколько электрон-вольт — энергией, достаточной, чтобы разрушить некоторые молекулы, но слишком малой для того, чтобы разрушить всю атомную или молекулярную структуру. Поэтому под влиянием солнечного света индуцируются некоторые химические реакции (преимущественно фотосинтез), которые являются основой для сохранения жизни на Земле.

Обратимся теперь к составным частям атома — электронам и ядрам. Все электроны в точности одинаковы; они имеют малую массу (примерно $\frac{1}{1800}$ массы самого маленького ядра) и несут единицу отрицательного электрического заряда и, кроме того, спин и магнитный момент. Спин есть квантовомеханическое свойство, аналогичное вращению, которое создает магнитный момент электрона. Все попытки узнать структуру или некий механизм, заложенный в природе электрона, оказались тщетными. В настоящее время электрон рассматривается как истинно элементарная частица. Однако это лишь предварительное утверждение. Мы увидим позднее, что открытие тяжелого электрона и нейтрино можно рассматривать как первые указания на внутреннюю структуру электрона.

Существует множество различных ядер, смотря по тому, какой атом и какой изотоп рассматривается. Ядра имеют большую массу и положительный заряд, сконцентрированный в объеме, линейное протяжение которого составляет кратное 10^{-13} см — число, меньшее атомных размеров на фактор, равный примерно 10^5 (длина 10^{-13} см называется единицей *ферми*). Ядра несут различные заряды для каждого типа атомов и различную массу для каждого изотопа. Это все, что можно сказать относительно большинства атомных и молекулярных свойств. По этой причине и ядра можно было рассматривать как точки, лишенные структуры.

Однако ровно 50 лет назад Эрнест Резерфорд открыл, что атомное ядро имеет структуру. Лишь через семь лет после того, как он доказал планетарную структуру атома, он показал, что в ядре азота имеются протоны. Около 1932 г. он доказал, что все ядра более тяжелые, нежели обыкновенный водород, состоят из нейтронов и протонов. Нейтроны не имеют электрического заряда, так что внутри ядра они не могут быть

связаны с протонами электрическими силами. Их должна связывать сила новой природы — ядерная сила. Если те же самые законы квантовой механики имеют место внутри ядра, как и внутри атома, то ядерная сила должна связывать нейтроны и протоны внутри ядра совершенно так же, как электрическая сила связывает электроны и ядра внутри атома. Следует ожидать существования сдерживающих волн нейтронов и протонов, которые создают вибрационные картины, сходные с электронно-волновыми картинами атома, причем каждая картина соответствует определенно-

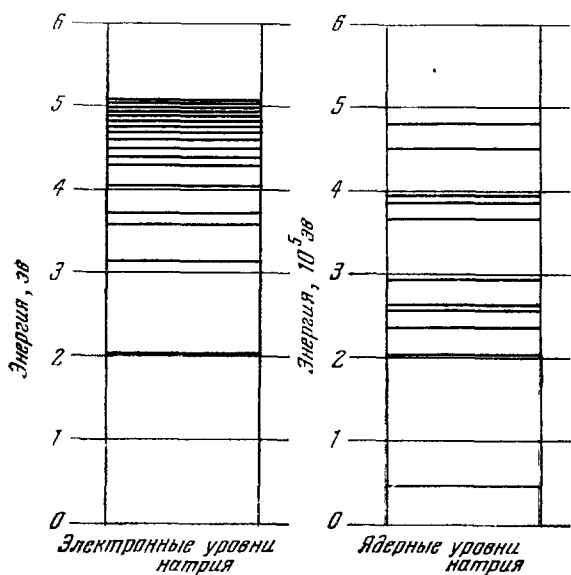


Рис. 6. Атомный и ядерный спектры натрия сходны по своему характеру.

Атомный спектр (слева) может быть представлен в шкале, где единицей является электрон-вольт, в то время как спектр ядерных состояний (справа) требует шкалу, единица которой в 100 000 раз больше.

му квантовому состоянию ядра. Следовательно, каждое ядро должно обладать характерной последовательностью энергетических состояний, дающих начало ядерному спектру. Величайшим триумфом квантовой механики было экспериментальное доказательство того, что подобный спектр действительно существует. Таким образом, был открыт второй вид спектроскопии — ядерная спектроскопия.

Разности энергии между ядерными состояниями значительно больше таковых в атомных спектрах: они имеют порядок величины сотен или даже тысяч электрон-вольт (рис. 6 и 7). Это объясняет, почему ядра инертны и действуют как неизменяемые частицы с определенными фиксиро-

ванными свойствами — как элементарные частицы, покуда энергии, сообщаемые им, значительно меньше, нежели расстояние от основного состояния до первого возбужденного состояния. А это и есть случай, имеющий место во всех обычных процессах в нашем земном окружении.

Замечательные условия, существующие на Земле, являются исключительными. Теперь мы, однако, можем искусственно создать взрывные условия при помощи ускорителей, в которых вещество подвергается действию пучков частиц высокой энергии. Ядерные спектры можно изучать детально, возбуждая атомные ядра потоками протонов или электронов с энергиями в несколько миллионов электрон-вольт.

Ядерные силы можно детально изучать, непосредственно наблюдая за тем, что происходит, когда нуклоны (протоны или нейтроны) тесно сближаются. Это осуществляется в экспериментах с рассеянием. Например, можно многое узнать о ядерных силах, изучая рассеяние пучка протонов или нейтронов известной энергии относительно покоящихся протонов (например, протонов жидкого водорода). Эти исследования показали, что сила, действующая между ядерными частицами, очень велика, но что ее радиус действия очень короток. Действие этой силы прекращается на расстоянии немногих ферми. Внутри этого расстояния ядерная сила по преимуществу — сила притяжения, но на очень

малых расстояниях (доли *ферми*) она становится отталкивательной (рис. 8). Величина силы зависит также от направления спинов взаимодействующих частиц относительно друг друга и от других специальных обстоятельств, как, например, от симметрии их волновых картин. По своему характеру ядерная сила не так проста, как электростатическая сила между двумя зарядами. Тем не менее одна особенность всегда имеет место: ядерная сила одинакова между всеми парами нуклонов: протон — протон, протон — нейтрон и нейтрон — нейтрон.

Какова же ядерная сила по сравнению с электростатической по своей напряженности и по размерам их ограничивающего эффекта? Ранее мы определяли размеры и энергию водородного атома, вычисляя баланс между притягивающей тенденцией электрической силы и размазывающей тенденцией кинетической энергии электрона. Мы можем попытаться воспользоваться таким же подходом в случае ядер. Хотя ядерная сила сложнее электрической, можно получить приблизительное представление о размерах и энергии ядра, полагая, что притяжение на расстояниях, меньших 2 ферми и больших $0,5 \text{ ферми}$, приблизительно так же велико, как и электрическое притяжение на том же расстоянии между двумя противоположными по знаку зарядами, если каждый заряд был бы в $3,3$ раза больше заряда электрона. Однако эта величина оценена очень грубо. В действительности ядерная сила существенно отлична от электрической, во-первых, вследствие своего короткодействующего характера, далее — вследствие зависимости от спина и от того факта, что она, будучи на больших расстояниях всегда притягивающей, становится отталкивательной на очень малых расстояниях.

Тем не менее мы можем себе составить представление о размерах ядерной системы, используя те же правила, которые дают атомные величины, но заменяя электрический заряд зарядом g и массу электрона массой M нуклона (N). (Протон и нейтрон имеют почти точно одинаковую массу.) Таким путем мы получаем радиус Бора

$$a_N = \frac{\hbar^2}{Mg^2}$$

и ядерную энергию Ридберга

$$R_N = \frac{Mg^4}{2\hbar^2}.$$

По этим формулам мы находим $a_N = 2,5 \cdot 10^{-13}$ см и R_N — около 3 Мэв.

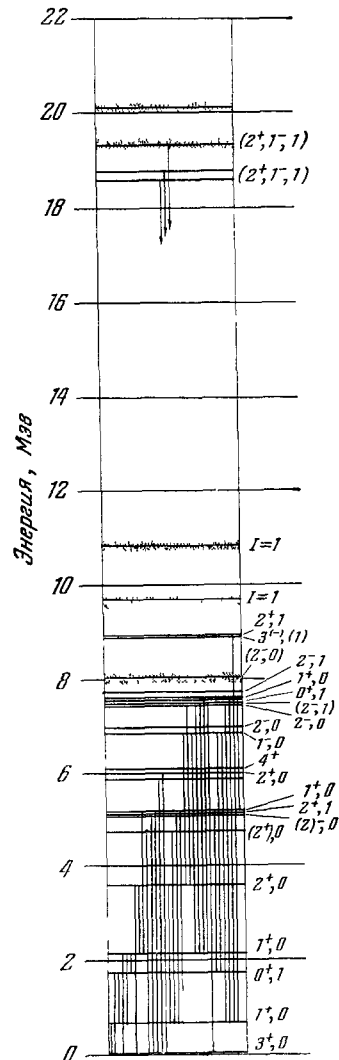


Рис. 7. Ядерный спектр бора-10 обнаруживает главные переходы (вертикальные линии), при которых испускаются фотоны высокой энергии. Первые цифры справа у каждого квантового состояния указывают спиновый угловой момент, следующие символы (+ или -) обозначают четность, вторые цифры — изотопический спин I . Числа в скобках недостоверны. Полосы из точек указывают уровни, которые особенно широки. Рисунок основан на схеме, опубликованной Томасом Лорингеном из Калифорнского технологического института и Фэем Айзенберг-Селовом из Хайверфордского колледжа.

Эти два числа дают указание на размеры и энергию, связывающие частицы внутри ядер. И в самом деле, простейшее ядро (содержащее нейтрон и протон) — дейтрон — имеет диаметр $2,3 \cdot 10^{-13}$ см и энергию связи $2,1$ Мэв. Вообще радиусы ядер расположены между 2 и 10 ферми, а энергия связи на один нуклон обычно лежит между 5 и 10 Мэв.

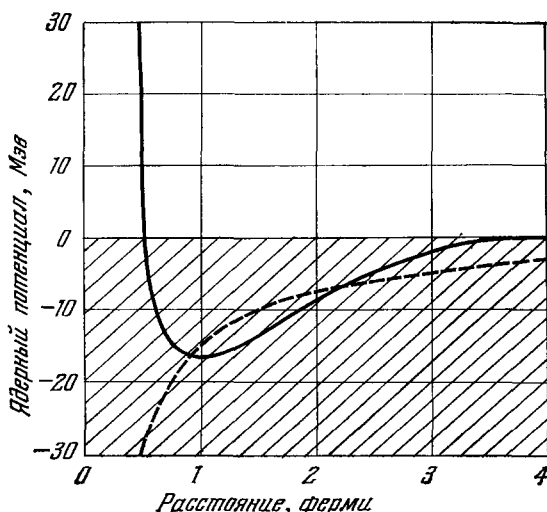


Рис. 8. Величина ядерной силы (сплошная кривая) изменяется с расстоянием между двумя ядрами.

Ферми — единица длины, равная 10^{-13} см. Ядерная сила является силой притяжения там, где кривая идет ниже нулевой линии, и отталкивательной — там, где кривая расположена выше нулевой линии. Таким образом, сила становится отталкивательной на расстояниях, меньших 5 ферми. Приведенная кривая является приближенной. Точное значение зависит от относительных направлений спинов нуклонов и других факторов, как, например, симметрии их волновой картины. Пунктирная линия указывает, каков бы был потенциал между двумя частицами, несущими заряды в 3,3 раза большими заряда электрона.

Имеется очевидное различие между ядерной и атомной динамикой. В атоме ядро образует массивный центр с электрическим зарядом от одной до 100 единиц в наиболее тяжелых искусственно созданных элементах. Далее, электрическая сила не ограничена расстоянием. Поэтому главная сила действует на каждый электрон. Динамика внутри ядра более «демократична»: в ядре не имеется центральной частицы с преобладающим притяжением. Все компоненты ядра имеют почти одинаковую массу и один и тот же ядерный заряд. Каждая частица движется и создает свою «вибрационную картину» в комбинированном поле сил всех остальных частиц (рис. 9).

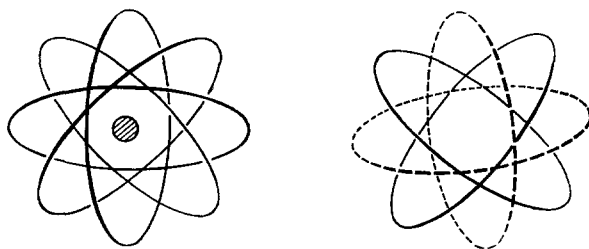


Рис. 9. «Авторитарный и демократический режимы» символизируются соответственно отношением электронов к ядру атома (слева) и соотношением между протонами и нейтронами в атомном ядре (справа).

В атоме ядро — массивный фиксированный центр, около которого обращаются электроны. Но в ядре протоны (пунктирные орбиты) и нейтроны (сплошные орбиты) сдерживаются на аналогичных орбитах их комбинированным полем притяжения.

Тем не менее существуют многие черты сходства между атомными и ядерными спектрами. Также и здесь типичны вибрационные картины, дающие начало угловым моментам величины $l\hbar$ с $2l + 1$ мультиплетными

состояниями равной энергии. Поскольку принцип Паули имеет место также и внутри ядра, две одинаковые частицы не могут находиться в одном и том же состоянии.

Другое поразительное сходство мы находим в оболочечной структуре как атомов, так и ядер. Как только число составляющих частиц — электронов в первом случае, протонов и нейтронов во втором — достигает определенных значений, образуются замкнутые оболочки повышенной устойчивости. Соответственно имеется периодическая система не только элементов, но и ядер.

Однако в ядерных спектрах проявляется новая симметрия, отсутствующая в спектрах атомных. Так как ядерные силы не различают протоны и нейтроны, ядерные состояния, отличающиеся только заменой

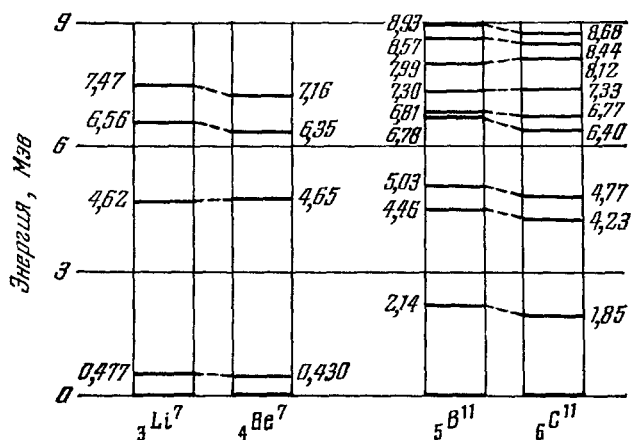


Рис. 10. Спектры «зеркальных» ядер очень сходны, так как ядерные силы не отличают протонов от нейтронов.

Два ядра образуют «зеркальную» пару, если они содержат одинаковое число протонов и нейтронов и если число протонов одного ядра равно числу нейтронов другого. Так, ${}^3\text{Li}^7$ и ${}^4\text{Be}^7$ образуют одну «зеркальную» пару, а ${}^5\text{B}^{11}$ и ${}^6\text{C}^{11}$ — другую. Нижний индекс указывает число протонов, сверху — полное число протонов и нейтронов.

нейтрона протоном, должны иметь одну и ту же структуру, а следовательно, и одинаковую энергию (рис. 10). Эта симметрия не вполне точна ввиду того, что (в соответствии с изменением заряда ядра) меняется число единиц электрической энергии: электрическая энергия, однако, меньше ядерной, и в конце концов она легко может быть вычислена и вычтена из общей энергии. Эта симметрия называется симметрией изоспина, по причинам, на которых мы здесь не будем останавливаться. Она дает начало группам состояний, называемых изоспиновыми мультиплетами.

Когда ядро «поднимается» в возбужденное состояние и затем «опускается» в состояние более низкой энергии, оно освобождается от избытка своей энергии не только путем испускания светового кванта, как это делает возбужденный атом, но также, — если только возбуждение достаточно велико, — путем испускания пары лептонов — одновременного испускания электрона (отрицательного электрона или позитрона) и нейтрино. Обе частицы возникают в момент перехода от более высокого к более низкому состоянию, точь-в-точь как рождается световой квант в электронной оболочке, когда в этой оболочке происходит аналогичный

переход. Поскольку в природе частицы всегда рождаются парами с анти-частицами, рождение электрона сопровождается частицей, которая называется антинейтрино, а частица, сопровождающая позитрон, есть нейтрино.

Эти процессы испускания характеризуются некоторыми необычными чертами. Одна из них состоит в том, что испускается электрический заряд; поэтому при таком испускании ядро должно изменять свой суммарный

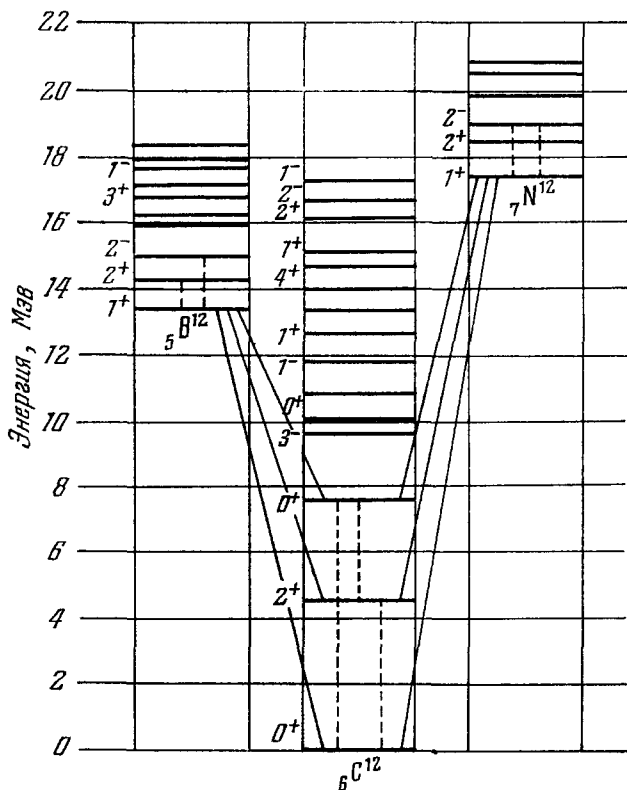


Рис. 11. Члены единой квантовой системы могут иметь различное число протонов в своих ядрах при одном и том же числе нуклонов (протонов и нейтронов).

Так, бор-12, углерод-12 и азот-12 образуют единую квантовую систему, между членами которой возможны переходы. Пунктирные линии указывают некоторые переходы, сопровождаемые испусканием световых квантов. Наклонные линии изображают переходы, сопровождаемые эмиссией лептонных пар. Линии, идущие слева направо, указывают испускание пар, состоящих из электрона и антинейтрино; линии, идущие справа налево, соответствуют испусканию позитрона и нейтрино.

заряд в противоположном направлении с тем, чтобы удовлетворить закону сохранения заряда. Это изменение происходит таким образом, что один из ядерных протонов превращается в нейтрон, если испускается пара позитрон — нейтрино, а когда испускается пара электрон — антинейтрино, один из нейтронов превращается в протон. Соответственно заряд ядра более не является абсолютно фиксированной величиной; он может меняться при β -распаде (рис. 11).

Что не может изменяться ни при каких переходах — это полное число протонов и нейтронов, которое называется нуклонным числом. Ядра, имеющие одно и то же число нуклонов, на самом деле не могут рас-

смастиваться как различные системы даже тогда, когда число их протонов различно. Они представляют собой не что иное, как различные квантовые состояния одного и того же ядра. Разность энергий между подобными двумя состояниями тем не менее может быть достаточна для рождения электрона и нейтрино. Так как масса нейтрино равна нулю, необходимая для β -распада минимальная разность энергий между двумя состояниями есть просто энергия массы электрона, т. е. $0,51 \text{ Мэв}$. Избыток энергии над этой величиной превращается в кинетическую энергию обеих испускаемых частиц. Величина минимальной энергии, необходимой для указанного превращения, такова, что становится очевидным, почему переходы с рождением лептонных пар не могут происходить в атомах, не разрушая их.

В 1957 г. было сделано неожиданное открытие, обнаружившее, что испускание лептонных пар нарушает один из основных законов природы. До этого думали, что природа не делает различия между правым и левым. Остроумный эксперимент обнаружил, однако, что нейтрино испускается всегда в состоянии вращения левого винта относительно линии полета, в то время как антинейтрино находится всегда в состоянии вращения по правому винту.

Наиболее привлекательной частью атомной динамики является химическая связь, которая позволяет атомам объединяться в молекулы почти бесконечно большим числом способов. Существует ли нечто подобное в ядерной динамике? Ответ таков: ядерная химия существует, но только в ограниченном масштабе. Два ядра могут реагировать друг с другом и образовывать ассоциат, но этот ассоциат идентичен с более тяжелым ядром. Это — следствие «демократического режима» в ядре. Все составляющие ядра подобны друг другу и взаимно притягиваются, в то время как в атоме находятся две существенно различные составляющие: ядро и электроны. Ядра разделены некоторым расстоянием, когда атомы образуют молекулу.

Однако процессы горения обнаруживаются в обоих мирах. Когда две единицы сливаются и образуют большую единицу, происходит освобождение энергии, так как связанная система обладает меньшей энергией, нежели разделенные единицы (это становится очевидным, если вспомнить, что энергия должна быть затрачена для расщепления связанной системы на ее части). Когда атомы углерода и кислорода комбинируются, образуя угольную кислоту, то освобождается в виде теплоты $0,7 \text{ эв}$ на каждую возникшую молекулу. Но когда ядро гелия и ядро углерода соединяются, давая ядро кислорода, освобождается 20 Мэв . Здесь мы опять видим разницу в масштабе энергий в обоих мирах.

Очевидно, что ядерное горение инициировать значительно труднее, нежели атомное и молекулярное горение. Требуется значительная энергия для столь сильного сближения ядер, чтобы ядерные силы начали доминировать над силами электрического отталкивания. Это можно осуществить в ускорителях частиц, используя поток частиц высокой энергии в качестве мишени. Природа делает это внутри звезд, где температура настолько высока, что может быть доставлено количество энергии, нужное для зажигания. В центре Солнца водород сгорает, образуя гелий. В более старых звездах (красные гиганты) гелий сгорает в углерод и кислород, могут происходить различные другие ядерные реакции с образованием в результате их других элементов. Путем такого рода процессов возникли ядра всех известных элементов. Для некоторых из них температура зажигания настолько высока, что они могут возникать только при взрывах сверхновых.

Хотя нуклоны сохраняют свою стабильность даже при самых высоких звездных температурах, их стабильность не безгранична. Это было продемонстрировано около 25 лет назад в экспериментах с космическими лучами. В течение немногих лет был открыт целый мир новых явлений при помощи ускорителей, которые в настоящее время дают пучки протонов с энергией до 70 Гэв .

Когда подобные пучки обстреливают мишени из вещества, наблюдаются странные и неожиданные факты. Должно было пройти некоторое время, прежде чем оказалось возможным описать более или менее систематическим образом, что собственно происходит, и еще сейчас мы далеки от разумного понимания субъядерных явлений.

То, что было открыто, лучше всего можно объяснить следующими словами. Когда нуклон подвергается удару со стороны частицы очень высокой энергии, он ведет себя, по-видимому, сходно с тем, как ведут себя атом или ядро при значительно меньшей энергии: нуклон может быть возбужден до некоторого числа более высоких квантовых состояний. После возбуждения нуклон иногда возвращается в нормальное состояние с испусканием световых квантов и лептонных пар. Однако в большинстве случаев при условии, что возбуждение достаточно высоко, эмиссия состоит из квантов необычного типа, а именно из мезонов — название, которое означает частицы средней массы.

Физики, занимающиеся высокими энергиями, часто говорят об этих возбужденных состояниях как о «новых элементарных частицах». Несколько времени назад я пришел к заключению, что логичнее рассматривать их как высшие квантовые состояния нуклона, так как они обладают очень коротким временем жизни и возвращаются в обычные нуклоны — протон или нейтрон. Разность энергий между возбужденным состоянием и основным состоянием испускается в форме различных квантов в полной аналогии с возбужденными состояниями атома или ядра. Эту совокупность квантовых состояний нуклона можно рассматривать как новый тип спектра — спектр нуклона. Это и есть третья из спектроскопий, открытых физическими исследованиями. Я введу здесь термин «барион», который должен означать нуклон во всех его различных стадиях возбуждения. Термин же «нуклон» я сохраняю для проявлений бариона в основном состоянии в форме нейтрона или протона.

Обратимся теперь к рассмотрению спектра бариона, т. е. его возбужденных состояний, поскольку они известны в данное время. На рис. 12 показаны в виде горизонтальных линий открытые наиболее важные состояния. Высота, на которой расположена линия по вертикальной шкале, указывает энергию каждого состояния.

Можно видеть, что разности энергий порядка нескольких сотен $Mэв$, т. е. примерно в 1000 раз больше разности энергий в ядерных спектрах. Основное состояние — на самом деле дублет. Оно представляет протон и нейтрон, разность энергий которых, равная $1,2 Mэв$, не может быть обнаружена в принятой шкале рисунка, где единицей служит $Гэв$.

Наиболее удивительной чертой спектра барионов является способ перехода между состояниями. Большинство переходов происходит путем испускания или поглощения мезонов. Мезоны являются наиболее ходовой «разменной монетой» субъядерного мира. Они играют такую же роль в отношении ядерной силы, какую световые кванты играют в отношении электрической силы. Например, если источник электрической силы — электрон — соударяется с чем-нибудь иным (например, электрон, ударяющийся в металлическую мишень в рентгеновской трубке), он испускает световые кванты. Если источник ядерной силы — нуклон — интенсивно соударяется с чем-нибудь иным (как, например, энергичный

протон, соударяющийся с мишенью в ускорителе), он испускает мезоны (рис. 13).

Ядерная сила значительно сложнее электрической; потому и мезоны значительно сложнее фотонов. Прежде всего, мезоны не могут двигаться со скоростью света, поскольку они имеют отличную от нуля массу покоя. Далее имеется большое разнообразие мезонов с различными массами, и некоторые из них заряжены, а другие не заряжены. Наиболее важной

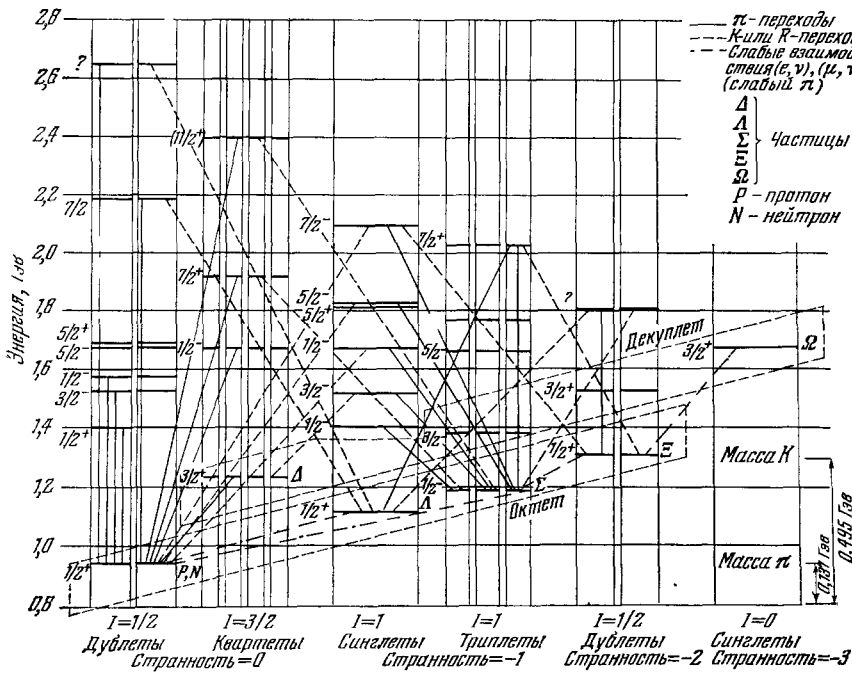


Рис. 12. Барийонный спектр построен из нуклона (P, N) и его различных возбужденных состояний.

Состояния расположены в столбцы соответственно их мультиплетности и странности. Буква I означает изотопический спин; мультиплетность равна $2I + 1$. Странность есть внутреннее квантовое свойство. В субъядерном спектре бариона за основное состояние принята масса энергии протона $0,938 \text{ ГэВ}$. Числа слева от каждого столбца означают угловой момент спина и четность (+ или -); символ справа — название состояния. Кванты, испускаемые в некоторых переходах, показаны внизу. Эмиссия фотонов не показаны; они вообще возникают при комбинациях тех же состояний, которые дают пионы, если не происходит изменения заряда. Штрих-пунктирными линиями указаны переходы, которые соответствуют слабым взаимодействиям, а именно испусканию лептонных пар, или слабым испусканиям пионов. Переходы идут от каждого члена мультиплетности к каждому члену другого мультиплетности, но показано для простоты только по одному из таких переходов для каждой пары состояний. Состояния в октаетах и деккуплетах обнаруживают некоторые внутренние симметрии. Каждое барионное состояние, показанное здесь, обнаруживается также в состояниях антиматерии, так что существует аналогичный спектр антибарионов.

группой мезонов являются π -мезоны, или пионы, которые имеют наименьшую массу. Существуют три вида π -мезонов: положительно заряженные, отрицательно заряженные и нейтральные. Следующей важной группой являются K -мезоны, или каоны, причем имеются четыре вида каонов. Их масса больше, нежели масса пионов, и они существуют в виде заряженных и незаряженных форм.

Спектр барионов имеет некоторые заслуживающие внимания закономерности. Одна из них — это существование мультиплетов почти одинаковой энергии, различающихся только своим зарядом. У них идентичны все другие свойства, например время жизни, угловой момент, испускание

и поглощение мезонов. Простейшим и наиболее известным примером является само нормальное состояние: дублет, состоящий из изотопа и нейтрона. Среди возбужденных состояний имеется небольшое число синглетов, остальные являются мультиплетами: дублетами, триплетами и квартетами. Они называются изоспиновыми мультиплетами, и формально им приписывается изоспиновое квантовое число I , так что мультиплетность равна $2I + 1$.

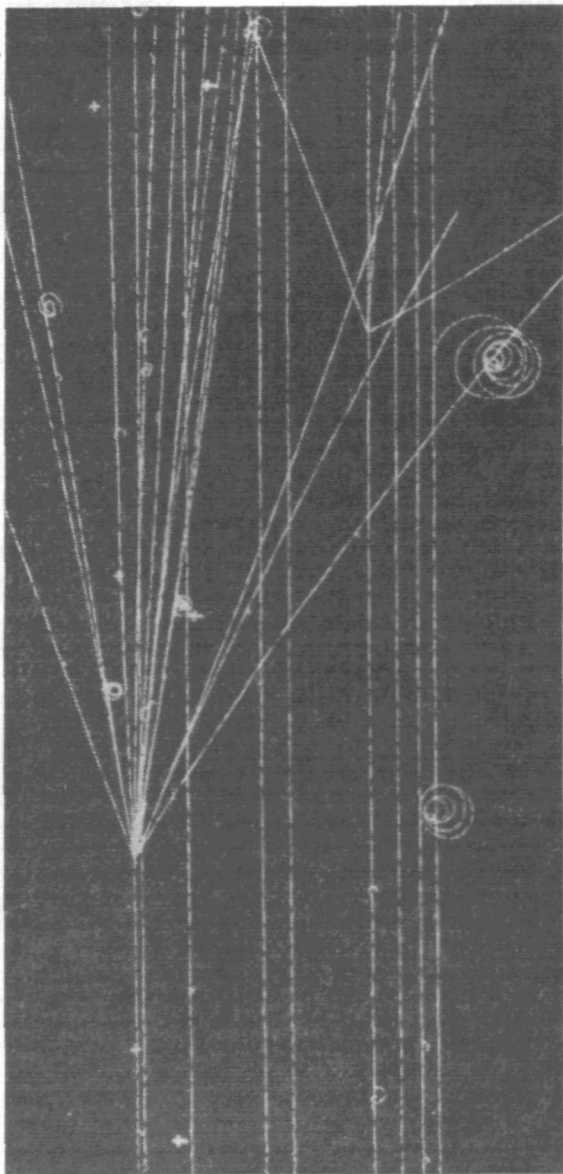


Рис. 13. Пучок мезонов, возникающий, когда поток протонов с энергией 20 Гэв от ускорителя ЦЕРН входит в пузырьковую водородную камеру. Мезоны возникают тогда, когда протоны высокой энергии соударяются с покоящимися протонами. Эти покоящиеся мишени являются ядрами атомов водорода в камере.

Таким образом, протонно-нейтронная пара имеет квантовое число I , равное $1/2$. (Причина выражения I в числах, кратных $1/2$, основана на аналогии между этими мультиплетами и мультиплетами, имеющими место для состояний с определенными значениями J углового момента, также выражаемыми числами кратными, $1/2$).

Следующая закономерность в барионных спектрах связана с эмиссией и абсорбцией K -мезонов. Некоторые переходы происходят с испусканием или поглощением пионов, но не каонов, другие же переходы сопровождаются поглощением только каонов, но не пионов. Можно разделить переходы на группы, внутри которых происходят только пионные переходы, и приписать каждой из этих групп новое квантовое число S со значениями $0, -1, -2$ и -3 (отрицательные величины имеют историческое происхождение). В таком случае правило состоит в том, что пионные переходы происходят только между состояниями с одинаковым квантовым числом S . Переходы

с каонами меняют S на единицу. Чтобы это было возможно, каоны должны иметь S равное единице (положительной или отрицательной). Символ S обозначает квантовое число «странность» — не вполне точное название,

сохранившееся от того времени, когда это экзотическое название представлялось подходящим.

Парадоксальная ситуация, по-видимому, возникла в случае барионов низшей энергии, у которых S отлично от нуля. Рассмотрим низшее состояние группы $S = 1$, лямбда-частицы (Λ). Оно может переходить в основное состояние нуклона ($S = 0$) только с испусканием каона. Разность энергий между указанными состояниями составляет, однако, 176 Мэв , что равно только одной трети энергии, необходимой для создания каона. Поэтому каон не может испускаться. Но так как природа требует найти путь к основному состоянию, должна существовать несколько иная форма эмиссии. Опыт показал, что испускание световых квантов никогда не происходит между состояниями с различными S . Все, что остается, — это слабое взаимодействие, которое дает начало испусканию лептонной пары, а также слабым пионным эмиссиям. Эти переходы, однако, очень медленны, вследствие чего Λ -состояние имеет относительно долгое время жизни $-2,5 \cdot 10^{-10} \text{ сек}$, тогда как нормальные состояния, ведущие к испусканию мезонов, существуют всего лишь 10^{-22} сек .

Лямбда-состояние рассматривалось поэтому как отдельная частица. Эта ситуация напоминает дни, когда атомные спектры были еще плохо поняты. Спектроскописты нашли в то время два спектра гелия: парагелий и ортогелий. Оба представляли состояния, между которыми, по-видимому, переходы не происходили. Они были убеждены, что имеют дело с двумя различными атомами до тех пор, пока Вернер Гейзенберг не показал, что оба спектра принадлежат одному и тому же атому гелия: в одном случае оба электрона атома имеют параллельные спины, в другом — антипараллельные. Лишь очень редко один из электронов «перебрасывается» с испусканием фотона, открывая тем возможность перехода между обоими состояниями.

До сих пор я упоминал только два типа мезонов, пионы и каоны, но существует еще много других. На самом деле существует целый спектр мезонов (рис. 14). Как и в случае спектров барионов, состояния мезонов можно группировать в соответствии с мультиплетностью и странностью. Существуют также переходы между мезонными состояниями. Когда один из мезонов превращается в другой, разность энергий испускается в форме пионов, каонов, пар лептонов и световых квантов, точь-в-точь как в спектре барионов. Мезон поэтому не является частицей в том же смысле, как нуклон; он является квантом энергии, подобно свету или лептонной паре. Нейтральный пион распадается через 10^{-10} сек , превращаясь в свет; заряженный пион превращается через 10^{-8} сек в лептонную пару.

Как можно объяснить эти барионные или мезонные состояния? Атомные и ядерные квантовые состояния могут быть интерпретированы как различные динамические формы системы составных частей, сдерживаемых связующими силами. Таковыми являются ядра и электроны в первом случае, протоны и нейтроны — во втором. Спектры барионов и мезонов еще не поняты. Еще нет Резерфорда, которому бы удалось расщепить нуклон на его составные части. Мы даже не знаем, существуют ли эти части вообще. Все, что мы знаем, это то, что нуклон может существовать в различных квантовых состояниях, если ему сообщается достаточная энергия. Мы знаем также различные способы, которыми эти состояния обмениваются своей энергией.

Хотя еще ничего определенного не было найдено, что указывало бы на существование определенной структуры барионов и мезонов, имеются известные основания для предположения о том, что барион состоит из трех составных единиц, а мезон — из двух.

Гипотеза, коротко говоря, состоит в следующем. Предполагается, что барион состоит из трех гипотетических субчастиц, называемых кварками. Предполагается существование трех типов кварков: p , n и λ . Первые два типа кварков обозначаются через p и n потому, что они образуют дублет точно так же, как протон и нейтрон. Все три типа кварков имеют спин $1/2$ и очень сходны между собой, за исключением их электрического

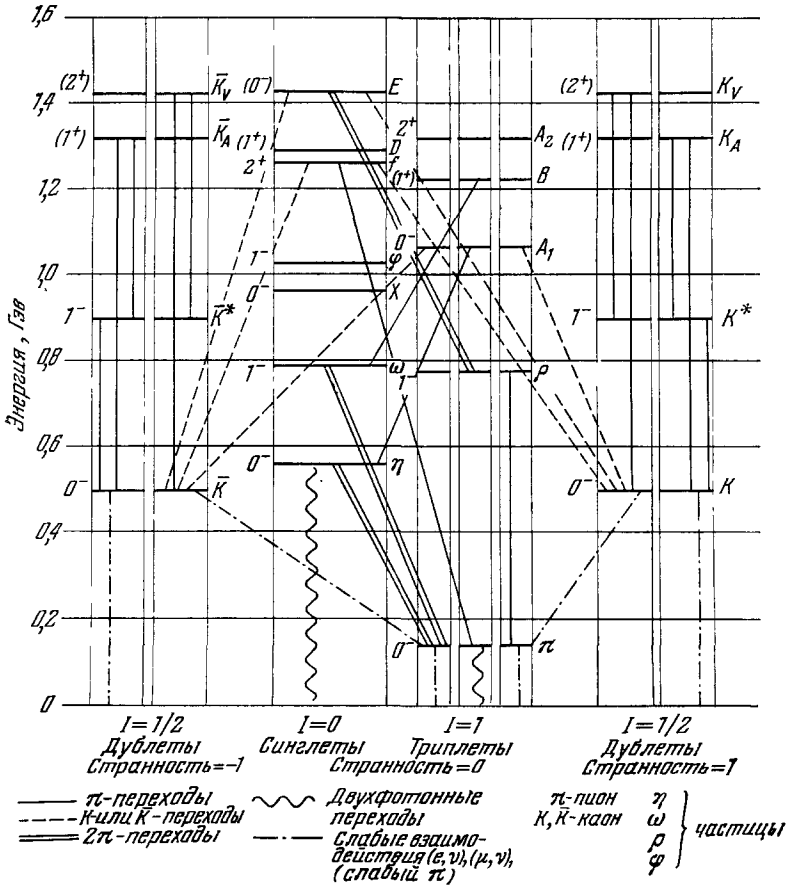


Рис. 14. Спектр мезонов, подобный спектру барионов, может быть расположен так, что различные состояния располагаются в столбцы соответственно своей мультиплетности и странности.

В противоречии со спектром барионов, основное состояние (пион) спектра мезонов нестабильно. Оно распадается путем слабого взаимодействия либо на пару лептонов, или на фотоны. Каоны и η -мезоны могут исчезать аналогично, не генерируя пионы.

заряда. Далее вводится курьезное допущение: p -кварку приписывается заряд, равный $+2/3$ элементарного заряда, а n -кварку — заряд $-1/3$. Подобные дробные единицы заряда никогда не наблюдались в природе. λ -кварк иной: ему приписывается значение квантового числа странности S' , равное -1 , в то время как n - и p -кварки имеют $S = 0$. Заряд λ -кварка равен $-1/3$. Этот набор квантовых чисел сочетается с кварками анти-частиц: $\bar{n}$, $\bar{p}$ и $\bar{\lambda}$ (рис. 15).

Согласно модели кварков барионные состояния при S , равном нулю, состоят из трех кварков p - и n -типа. Три кварка p -типа дают заряд трижды

Наименование	p	n	λ	$\bar{\lambda}$	$\bar{n}$	$\bar{p}$
Символ						
Заряд	$+2/3$	$-1/3$	$-1/3$	$+1/3$	$+1/3$	$-2/3$
Странность	0	0	-1	$+1$	0	0

Рис. 15. Три кварка и их античастицы гипотетически предложены в качестве основных «кирпичей» барионов и мезонов.

В отличие от частиц, открытых до сих пор, кварки несут заряд, меньший единицы, т. е. заряда электрона. Лямбда (λ)-кварк обладает отрицательной единицей странности. Каждый кварк и антикварк несут половину единицы спина, направление которого показано стрелками. Как и в мире известных частиц, гипотетические антикварки являются зеркальным отражением свойств кварков.

		Странность = 0			
		N	P		
					
Полный заряд		0	+1		
Полный спин		1/2	1/2		
Странность = -1					
		Δ^-	Δ^0	Δ^+	Δ^{++}
					
Полный заряд		-1	0	+1	+2
Полный спин		3/2	3/2	3/2	3/2
Странность = -1					
		Λ	Σ^-	Σ^0	Σ^+
					
Полный заряд		0	-1	0	+1
Полный спин		1/2	1/2	1/2	1/2
Странность = -2					
		Ξ^-	Ξ^0	Ω^-	
					
Полный заряд		-1	0	-1	
Полный спин		1/2	1/2	3/2	

Рис. 16. Группа из трех кварков в различных комбинациях обуславливает все известные свойства барионов.

Когда стрелки двух спинов направлены противоположно, они компенсируют друг друга, так что спин большинства барионов равен $1/2$; когда все три стрелки — в одном направлении, они дают спин $3/2$.

$+2/3$, т. е. $+2$; три кварка n -типа дают заряд -1 . С такими комбинациями мы можем получать заряды $-1, 0, +1, +2$, которые соответствуют всем зарядам барионов при $S = 0$. Протон, например, должен состоять из одного n -кварка и двух p -кварков, нейтрон — из двух n -кварков и одного p -кварка. Состояния с $S = -1$ состоят из одного λ -кварка и двух p -кварков p - или n -типа. Это может дать заряды $-1, 0, +1$.

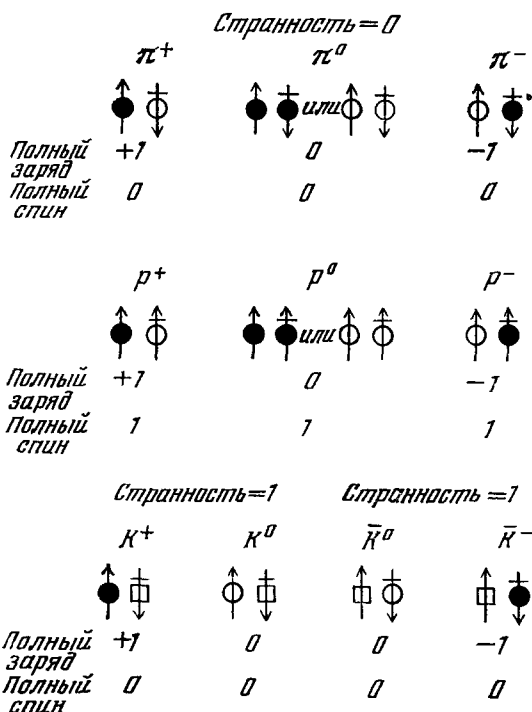


Рис. 17. Кварк и антикварк объясняют наблюдаемые свойства главных мезонов.

Пи(π)- и ро(ρ)-мезоны имеют странность, равную 0. Следовательно, они не заключают в себе λ -кварка. В группах каонов нормальные λ -кварки дают странность -1 для $\bar{K}^0$ - и K^- -пары, и антиламбда ($\bar{\lambda}$)-кварки дают странность ± 1 для K^0 и K^+ .

гнии, которые могут испускаться или поглощаться свободно. Это означает, что кварки могут входить (?) в структуру мезонов только как пары частица — античастица. Эти пары могут рассматриваться как формы, способные к обмену энергией, так как члены пары могут аннигилировать друг с другом и таким образом превращаться в другие формы энергии или же они могут создаваться из других форм энергии путем процесса создания частицы и античастицы. По этой причине в модели кварков допускается, что мезоны состоят из кварков и антикварков, связанных между собой; эмиссия мезонов в таком случае должна быть эквивалентна созданию пары кварк — антикварк. В некотором отношении такой процесс аналогичен испусканию лептонной пары, которое также состоит в одновременном рождении частицы и античастицы. Различные комбинации трех типов кварков и антикварков дают начало большинству наблюдаемых типов мезонов (рис. 17).

Модель кварков позволяет нам классифицировать квантовые состояния в спектрах барионов в группы состояний, которые отличаются друг от друга заменой одного типа кварков другим. Можно также показать, что

Состояния с $S = -2$ и $S = -3$ соответственно имеют два или три λ -кварка, что дает заряды -1 и 0 для $S = -2$ и заряд -1 для $S = -3$. Это как раз те заряды, которые обнаруживаются у барионных состояний при странностях $-1, -2$ и -3 (рис. 16).

Можно показать также, что некоторое число и других свойств хорошо воспроизводится моделью кварков, например появление изотопических дублетов и квартетов при $S = 0$, изотопических синглетов и триплетов при $S = -1$, дублетов при $S = -2$ и отсутствие мультиплетов при $S = -3$. В этой предварительной картине квантовые состояния барионов являются различными динамическими формами трехкварковой системы — комбинациями, которые делают протон имеющим наименьшую энергию.

Модель кварков дает также схему образования мезонов. Однако имеется существенная разница: мезоны являются квантами энергии.

эти группы состоят из восьми или десяти состояний, образуя таким образом октеты или декуплеты. Наиболее низко расположенный октет состоит из нуклонного дублета, λ -синглета, сигма(Σ)-триплетта и кси(Ξ)-дублета. Состояния внутри этих групп отличаются несколько по энергии, но в других отношениях их свойства между собой очень сходны.

Очевидно, здесь действует новая симметрия; она носит абстрактное название SU_3 -симметрии. Если бы кварковая картина была верна, то это означало бы, что внутренние силы не слишком зависят от типа кварков. Поэтому состояния, различающиеся типом кварков, должны быть сходными. Как только отыскивается спектроскопия высшего порядка, обнаруживается новый вид симметрии. Атомные спектры обнаруживают симметрию вращения: ядерные спектры вводят симметрию изотопии, а субъядерные спектры добавляют SU_3 -симметрию.

Таким образом, кварковая модель барионов и мезонов оказалась неожиданно успешной в описании свойств квантовых состояний и переходов между ними. Например, рассмотрим переходы между первым возбужденным состоянием бариона, дельта(Δ)-состоянием и основным состоянием (рис. 18). В кварковой модели два средних состояния Δ -квартета (Δ^0 и Δ^+) отличаются от основных состояний протона и нейтрона только потому, что в Δ -состояниях три кварка имеют параллельные спины, что дает в сумме спин $3/2$ ($1/2$ на каждый кварк), тогда как в протоне один кварк имеет спин, противоположный двум другим, так что суммарный спин оказывается равным половине. Следовательно, переход от Δ^0 и Δ^+ к основному состоянию соответствует переворачиванию спина одного из кварков. Сравнительно легко вычислить излучение, испускаемое в результате такого переворачивания, если известен магнитный момент переворачивающегося кварка, который может играть роль, если допустить, что моменты трех кварков должны складываться, давая известный магнитный момент протона. Подобные вычисления дают наблюдаемое электромагнитное излучение для перехода между Δ -состоянием и протоном.

Подчеркну, однако, что кварки еще никогда не наблюдались даже при соударениях нуклонов высшей доступной нам энергии. Возможно, что сила связи, которая сдерживает кварки, настолько велика, что нужны гораздо большие энергии, чтобы оторвать их друг от друга. Возможно также, что мы еще очень далеки от понимания структуры барионов и мезонов и что мы нашли только некоторые черты сходства между барионами и поведением гипотетической трехкварковой системы, с одной стороны, и между свойствами мезонов и поведением систем кварк — антикварк, с другой.

Если кварковая модель верна, то мы должны допустить существование новых в высшей степени жестких сил между кварками. Нуклоны

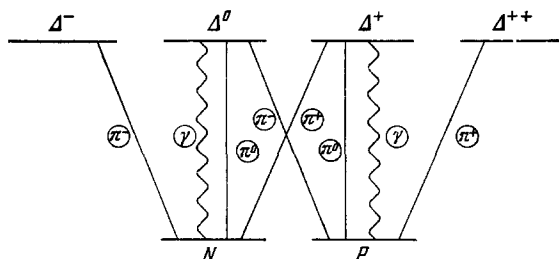


Рис. 18. Распад дельта (Δ)-состояния бариона сопровождается испусканием фотонов или пионов. Испускаемые кванты несут энергию приблизительно в 300 Мэв, которая позволяет Δ -бариону переходить в нуклонное основное состояние. Δ -состояние есть изотопический квартет с четырьмя составляющими: одним отрицательным, одним нейтральным, одним положительным с единичным зарядом и одним дважды положительным. При переходе в нормальное состояние первое и четвертое подсостояния должны изменять заряд на единицу, что сопровождается испусканием заряженного пиона. Второе и третье подсостояния не изменяют заряда.

в таком случае были бы «молекулами», построенными из кварков, а силы между нуклонами были бы аналогичны химическим силам между молекулами. Какова бы ни была истинная структура нуклона, вероятно, что силы между нуклонами определяются известным образом структурой нуклона. Сложные аспекты ядерных сил подсказывают, однако, многим физикам, что эти силы на самом деле являются сложными проявлениями чего-то глубокого, что на самом деле по своему характеру проще и фундаментальнее. Можно надеяться, что ядерные силы в один прекрасный день будут объяснены некоторым фундаментальным явлением внутренней динамики нуклона, подобно тому как сложные химические силы в настоящее время сводятся к простым электрическим притяжениям между ядрами и электронами.

Испускание лептонов представляет другой ряд загадок в мире субъядерных явлений. Количества энергии, освобождаемой при излучении, здесь много больше, чем при ядерных переходах. Иной раз, если имеется достаточно энергии для лептонной эмиссии, «электрон» испущенной пары лептонов обладает массой, в 200 раз большей массы обыкновенного электрона. Этот тяжелый электрон, называемый мюоном, отличается от обыкновенного электрона только своей большей величиной массы. Нейтрино, сопровождающий мюон, также обнаружил необычные свойства: это не тот нейтрино, который сопровождает легкий электрон. Хотя он также имеет исчезающе малую массу, он явно отличается от обычного нейтрино.

Тяжелый электрон — не стабильная частица. В миллионную долю секунды он превращается в нейтрино нового типа с испусканием обычной лептонной пары. Он распадается, таким образом, на электрон и два нейтрино, один из которых — особого рода нейтрино, связанный с мюоном, а другой — обычное нейтрино лептонной пары.

Можно предположить, что два электрона — мюон и обыкновенный электрон и два нейтрино — все являются квантовыми состояниями одной частицы, поскольку между ними возможны переходы. Мы находим здесь зародыш *четвертой* спектроскопии — лептонного спектра, который может служить указанием на то, что электроны и нейтрино имеют внутреннюю структуру. Во всяком случае достоверно, что проблема структуры электрона является фундаментальной, так как она связана с вопросом о природе электрического заряда и со значением единицы заряда, которая играет такую фундаментальную роль в природе.

В этой статье мы видели, что каждая из трех спектроскопий представляет соответствующие квантовые состояния различных областей явлений. Первая отвечает миру атомов и молекул, которые образуют наше непосредственное окружение на поверхности Земли. Это — деликатное и хрупкое окружение, в котором происходит обмен малыми количествами энергии.

Вторая — это мир ядерных явлений. Его составляющими служат ядра, а его элементарными частицами являются нейтроны, протоны, электроны и нейтрино. Ядра взаимодействуют в ядерных процессах, где происходит обмен энергией во многие сотни тысяч электрон-вольт. В природе такие взаимодействия происходят в большом масштабе внутри звезд.

В третьей области — субъядерных явлений — составляющими служат нуклоны и мезоны. Мы ее не знаем, существуют ли элементарные частицы, образующие эти составляющие. Масштаб обмена энергий в субъядерных процессах составляет сотни миллионов и миллиардов электрон-вольт. Это — те энергии, которые отталкивают ядра, подобно тому как ядерные энергии отталкивают друг от друга атомы. Субъядерный мир не известен нам достаточно хорошо, чтобы мы могли приписать ему место во Вселенной. Процессы с ультравысокими энергиями разыгрываются в ничтожно

малых областях ее, когда космические лучи бомбардируют материю. Быть может, место для этих процессов следует искать во вновь открытых катаклизмах, связанных с квазарами и взрывающимися галактиками. Гигантские количества энергии, освобождаемые в этих явлениях, могут служить указанием на то, что именно субъядерные процессы в них играют роль. С уверенностью можно сказать, что процессы, наблюдаемые, когда материя подвергается «мультимиллиардным электрон-вольт»-процессам, принадлежат новому и частично еще не открытому миру естественных процессов, таящихся глубоко внутри материи, где природа ведет себя дотоле не известным нам образом.

Массачусетский технологический институт.
США

ЛИТЕРАТУРА

1. Ch e n N i n g Y a n g, Elementary Particles: A Short History of Some Discoveries in Atomic Physics, Princeton Univ. Press, 1962.
 2. V. F. W e i s s k o p f, Phys. Today **14** (7), 18 (1961).
 3. V. F. W e i s s k o p f, Science **149** (No. 3689), 1181 (1965).
-