

ТРИ ЭТАПА В ПОЗНАНИИ СТРОЕНИЯ ВЕЩЕСТВА *)**В. Вайскопф**

В случае атомов и ядер классификационные схемы послужили ключом к пониманию их строения. Окажется ли то же самое верным и для элементарных частиц?

Сто лет тому назад казавшееся хаотическим нагромождение элементов было приведено в полный порядок после того, как Дмитрий Иванович Менделеев расположил их в периодической таблице. Загадочные регулярности в этой таблице оставались непонятными в течение 52 лет, до тех пор пока Нильс Бор не опубликовал свой знаменитый «Aufbauprinzip», основанный на квантовой теории атома. Экспериментальное исследование строения вещества продолжалось все более интенсивно. Удалось изучить свойства атомных ядер. Если расположить эти ядра в соответствии с числами протонов и нейтронов в них, то обнаруживаются свойства периодичности, аналогичные периодическим свойствам атомов. Эти характерные черты получили объяснение в оболочечной модели ядра, предложенной в 1949 г. Й. Гансом Д. Йенсенем, Марией Гепперт-Майер, Отто Хакселом и Гансом Е. Зюссом. В последние два десятилетия уже сами протоны и нейтроны изучались интенсивно в процессах взаимодействия с высокоэнергичными пучками частиц. Было открыто много новых короткоживущих состояний. Недавно Мюррей Гелл-Манн, Казухико Нишиджима и Ювал Нейман подметили некоторый порядок в казавшемся хаотическим списке новых «частиц». Однако полного понимания такого упорядочения мы еще не достигли.

Итак, мы проследили три этапа на пути проникновения в природу веществ — первый, связанный со строением электронной оболочки атома; второй, имеющий отношение к строению ядра как системы, состоящей из нейтронов и протонов, и третий, преследующий цель познания структуры элементарных частиц. Интересные аналогии и поразительные отличия существуют между этими тремя областями исследований, каждая из которых открыла нам новый невиданный мир явлений.

АТОМЫ

В XIX веке физика и химия были совершенно разными дисциплинами. Химия имела дело с «нефизическими» понятиями, такими, как неделимые атомы с определенными не поддающимися изменениям характерными размерами и свойствами, — понятиями, не употреблявшимися в то время в классической физике. Физика того периода оперировала с непрерывно

*) V. F. Weisskopf, Three Steps in the Structure of Matter, Physics Today, No. 8, 17 (1970). Перевод И. М. Дрёмина.

Автор статьи В. Вайскопф — профессор Массачусетского технологического института, США.

изменяющимися свойствами твердых тел, жидкостей и газов, описываемыми такими постоянными, как коэффициенты упругости и вязкости, диэлектрические проницаемости, коэффициент проводимости и так далее. Физики не могли объяснить наблюдаемые значения этих постоянных. Их цель состояла в том, чтобы обнаружить те следствия в поведении вещества, которые вытекают из заданного произвольного набора значений этих постоянных.

Физика XIX века не могла работать с атомом и его свойствами. Конечно, верно, что электрон был уже открыт, и на его важную роль в атоме было указано работами Дж. Дж. Томсона, Хендрика А. Лоренца и их современников. Однако две физические величины, связанные с электроном — его заряд e и его масса m , — не определяют ни длины, ни энергии. Для этого нужен был еще квант действия h , который был впервые введен в великой работе Макса Планка, опубликованной в 1900 г.

1900 г. ознаменовал собой не только смену столетий, но и существенные перемены в физике, приведшие к «офизичиванию» химических понятий. Квантовая механика, дитя XX века, послужила основой рационального понимания химических явлений, таких, как стабильность атомов, их размеры и энергии возбуждения. Она привела к появлению атомных единиц длины и энергии, боровского радиуса и постоянной Ридберга, вытекающих из требования баланса между кулоновским притяжением электронов атомными ядрами и квантовомеханической нулевой энергией электронов в ограниченной области пространства. Она ввела в физику элемент «соответствия». Фундаментальные уравнения квантовой механики определяют характерные размеры и строение веществ, отражающие внутреннюю симметрию атомных или молекулярных полей.

Квантовая механика дала также физическое истолкование проблеме пространственного распределения химических связей. Было обнаружено, что наблюдаемые стабильность и неизменность химических свойств являются следствиями существования дискретных и хорошо определенных квантовых состояний. Оказалось, что химические идеи и понятия уже содержатся в квантовой физике, а потому химия не может рассматриваться как отдельная наука.

ИНТУИЦИЯ БОРА

Квантовая теория атома послужила Нильсу Бору основой для объяснения периодической системы элементов Менделеева. Но как Бор смог прийти к правильному объяснению еще в 1921 г., до того как была сформулирована квантовая теория и — что еще более удивительно — до того как Вольфгангом Паули в 1925 г. был высказан известный «принцип Паули»?

Бор в одиночку конструировал атомы, добавляя к элементам электрон за электроном. Сила его интуиции была настолько велика, что он предугадал правило, согласно которому на одной и той же орбите не может находиться более двух электронов. Бор уловил этот факт из свойств атомных спектров. Он мысленно увидел это в процессе изучения периодических свойств таблицы Менделеева. В своих попытках понять наличие не более двух электронов на орбите он пришел к высказыванию о «нежелании принять большее число электронов с теми же квантовыми числами». Он говорил, что «электроны с одинаковыми m и k встречаются только тогда, когда они находятся в гармоничной взаимосвязи».

Паули, величайший критик и пуританин, не одобрял такой попытки объяснить это правило. Уже в 1921 г. он чувствовал, что в этих регулярностях кроется какой-то существенный принцип. В качестве интересной

иллюстрации отношения Паули я приведу несколько замечаний, которые я обнаружил на полях книги в библиотеке Паули в ЦЕРН. В книге опубликована знаменитая статья Бора об «Aufbauprinzip»'е. Обсуждая проблему добавления одиннадцатого электрона к замкнутой оболочке из 10 электронов, Бор замечает: «Мы должны ожидать, что одиннадцатый электрон перейдет на третью орбиту» («Wir müssen erwarten dass das 11. Elektron (Na) in die 3. Bahn geht.»). Паули, очевидно, раздраженный этим утверждением, пишет запальчиво на полях, используя два восклицательных знака: «Мы не должны этого о ж и д а т ь , а мы знаем это из спектров!!» («Wir müssen es nicht e r w a r t e n , aber wir wissen es aus den Spectren!!»).

Четырьмя годами позже, после тщательного анализа атомных спектров и эффекта Зеемана в сильных полях, Паули удалось ясно сформулировать свой «принцип Паули», поставивший на твердую основу боровское объяснение периодической системы элементов. А еще через пятнадцать лет, в 1940 г., Паули смог доказать, что принцип для частиц с полужелтыми спинами не является новым дополнительным принципом, а с необходимостью вытекает из структуры релятивистских волновых уравнений.

С развитием квантовой механики понятия химии перестали быть «нефизическими». Был сделан важный шаг на пути к единству науки. Различные взаимодействия между атомами, которые ранее объяснялись в терминах химических сил — силы Ван-дер-Ваальса, сцепление, вязкость, электричество, капиллярность,— все были сведены к одному хорошо известному в природе взаимодействию: к электростатическому притяжению между электронами и ядрами. Эффекты, вызванные этим притяжением, определяются в соответствии с конкретными условиями законами квантовой механики.

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ЧИСЛА

Квантовая механика атомов и молекул определяется двумя фундаментальными числами, малые величины которых существенны для характера наблюдаемых явлений,— постоянной тонкой структуры, $e^2/\hbar c$, и отношением масс электрона и нуклона, m/M .

Если бы $e^2/\hbar c$ была близка к единице или превышала ее, то в атомной механике основную роль играли бы релятивистские эффекты. Например, электрон-позитронные пары были бы в этом случае важными составными частями атомов.

Если бы отношение масс, m/M , ответственное за строение молекул, не было бы мало, физика коренным образом отличалась бы от химии. Среднее расстояние между ядрами в молекуле определяется размерами электронных орбиталей, длиной, которую можно рассматривать как амплитуду движения электронов. На ядра действует та же сила, что и на электроны (третий закон Ньютона), но их колебания подавлены на фактор $(m/M)^2$. Вот почему они так хорошо локализованы в молекуле. Из ядер образуется своеобразная решетка внутри молекулы. Это приводит к замечательному разнообразию молекулярной архитектуры, включая кристаллы и макромолекулы. Если бы масса протона была того же порядка, что и масса электрона, то химии бы не существовало, не было бы твердых тел и, самое важное, не было бы жизни, а, следовательно, некому было бы рассматривать всю проблему.

Причина такого различия в массах электрона и нуклона до сих пор неизвестна. Она, несомненно, связана с наличием сильных взаимодействий между нуклонами. Выявление этой причины является одной из центральных задач современной физики элементарных частиц. До тех

пор пока мы не поняли природу большой массы нуклонов и малой массы электронов, а также величины электрического заряда, измеренного в единицах $\hbar c$, мы не можем претендовать на понимание основных причин возникновения мира именно с таким строением, которое мы наблюдаем.

ЯДРА

Наш мир химии и биологии может существовать только при наличии такого окружения, где обмен энергией между частицами не чересчур велик и где имеется достаточно энергии для того, чтобы вызвать определенные некатастрофические изменения молекулярной структуры. Такие благоприятные условия осуществляются на Земле, потому что она удалена на безопасное расстояние порядка 10^{13} см от звезд и у нее имеется атмосфера, защищающая от многих вредных воздействий. Большинство вещества во вселенной находится при весьма отличных условиях. Например, в центре звезд первейшую роль играет мир ядерных процессов. В этом случае важны совершенно другие принципы упорядочения. На поверхности Земли ядерные превращения практически не происходят, потому что доступные здесь энергии не достаточны для того, чтобы вызвать такие процессы. Мы сталкиваемся здесь лишь с очень редкими случаями этих процессов, а именно с естественными радиоактивными элементами, которые служат напоминанием о том далеком прошлом, когда вещество, из которого сейчас состоит Земля, было, возможно, выброшено в момент взрыва сверхновой.

ЯДЕРНЫЕ СИЛЫ

Чтобы изучать ядерные явления в наших лабораториях, нам приходится искусственно воспроизводить их с помощью ускорителей частиц.

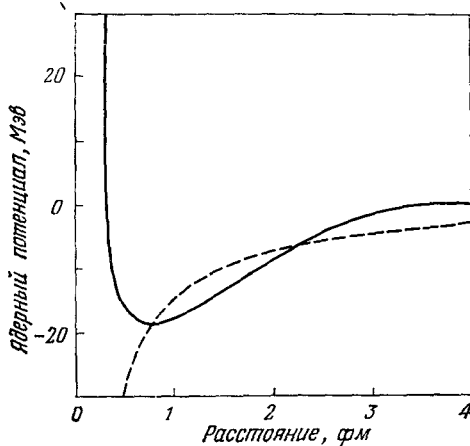


Рис. 1. Ядерная сила — отталкивательная при расстояниях меньше одного ферми и притягивательная — на больших расстояниях.

Кулоновская сила, соответствующая противоположно заряженным частицам с зарядом Ze , характеризуется штриховой кривой. Форма ядерного потенциала напоминает вид молекулярного потенциала.

Эти усилия были вознаграждены сторицей. В результате проведенных исследований нам удалось узнать о существовании мира, весьма отличного и в то же время в чем-то похожего на наше атомное и молекулярное окружение. Прежде всего была открыта новая сила, которая действует между нуклонами. Поведение этой силы в зависимости от расстояния показано на рис. 1. Сила отталкивания на расстояниях, меньших 10^{-13} см (1 ферми), становится силой притяжения в области от одного до нескольких ферми и экспоненциально приближается к нулю на больших расстояниях. Детальное поведение этой силы зависит от относительных спинов и симметрии квантовых состояний двух взаимодействующих частиц.

В отличие от электромагнитных сил, ядерная сила не реализуется в макроскопических масштабах. Макроскопическое электрическое поле получается при концентрировании многих электрических зарядов в данном объеме. Поля этих зарядов простираются далеко вне этого объема и, суммируясь, приводят к большому полю. Этого не удается сделать

с полем ядерных сил, потому что область его распространения не намного больше, чем наименьшие расстояния, на которые можно сблизить нуклоны.

Приблизительная сила ядерного взаимодействия в области притяжения сравнима с притяжением двух противоположных зарядов величины Ze .

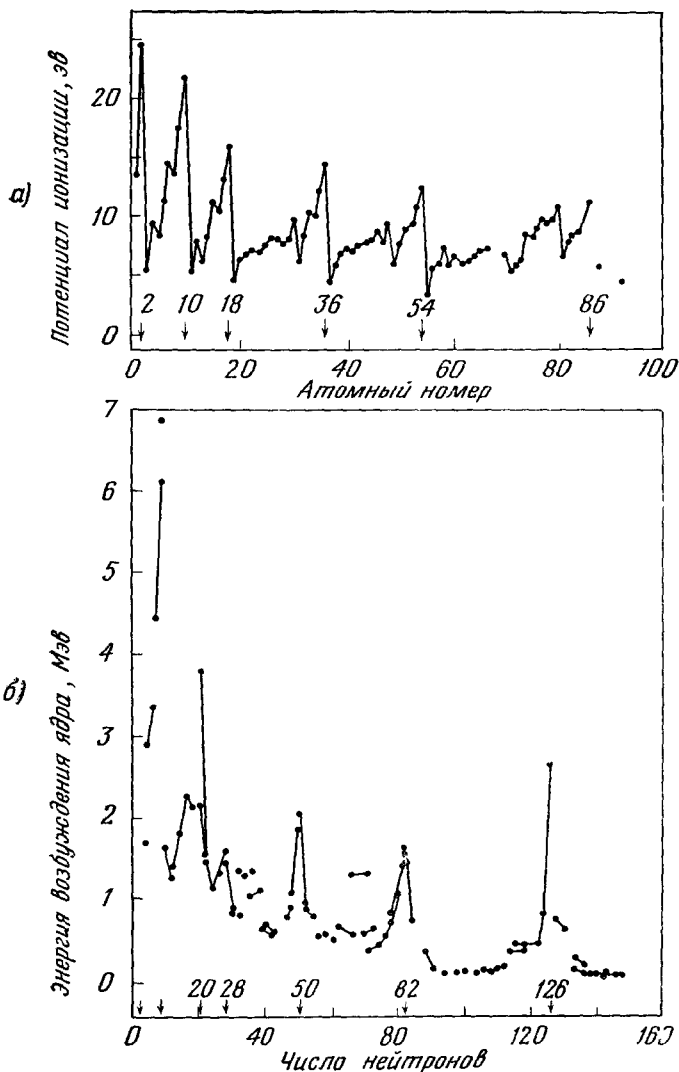


Рис. 2. Аналогичные периодические свойства атомов и ядер очевидны при сравнении энергий ионизации атомов (а) с энергиями ядерных возбуждений (б).

Наибольшие энергии появляются для инертных газов и магических ядер (указаны стрелками), которые характеризуются полностью заполненными оболочками. Возбуждения ядер показаны для первых возбужденных уровней в четно-четных ядрах. Сплошные линии связывают все ядра с одинаковым числом протонов.

Зная эту величину, мы можем оценить энергии и размеры простых ядер, задавая их хорошо известными выражениями для постоянной Ридберга и радиуса Бора, заменив в последних e на Ze , а массу электрона на массу нуклона. Тогда ядерные энергии оказываются в 200 000 раз больше, а ядерные размеры в 200 000 раз меньше, чем соответствующие атомные величины.

Во многих отношениях ядерная физика оказалась практически повторением атомной физики с подобными спектрами и квантовыми числами. Но есть и характерные отличия такие, как отсутствие доминирующего поля сил, связанного с тяжелой центральной частицей, и отличие в природе ядерной силы, приводящей к эффективному притяжению между всеми составляющими. Однако в квантовой механике симметрия ситуации является определяющим фактором для многих свойств. В среднем поле притяжения, в котором находится каждый из нуклонов ядра, обладает той же сферической симметрией, что и поле в атомах. Следовательно, мы получаем подобные наборы квантовых чисел, подобный «Aufbau» принцип, подобную периодическую систему ядерных свойств, в которой ядра упорядочены в соответствии с числом протонов или нейтронов. Мы обнаруживаем ядра с заполненными оболочками и высокими энергиями связи на концах этих периодов. Эти «магические» ядра являются ядерными аналогами инертных газов. На рис. 2 путем сравнения энергий ионизации атомов с энергиями возбуждения ядер иллюстрируется аналогия между ядерной и атомной периодичностями. Общий характер поведения кривых очевиден, но имеются и важные отличия.

ОТЛИЧИТЕЛЬНЫЕ СВОЙСТВА

Аналогия между ядерными и атомными спектрами нарушается в нескольких пунктах. Прежде всего порядок уровней в среднем потенциале ядра отличается от их порядка в кулоновском поле. Поскольку

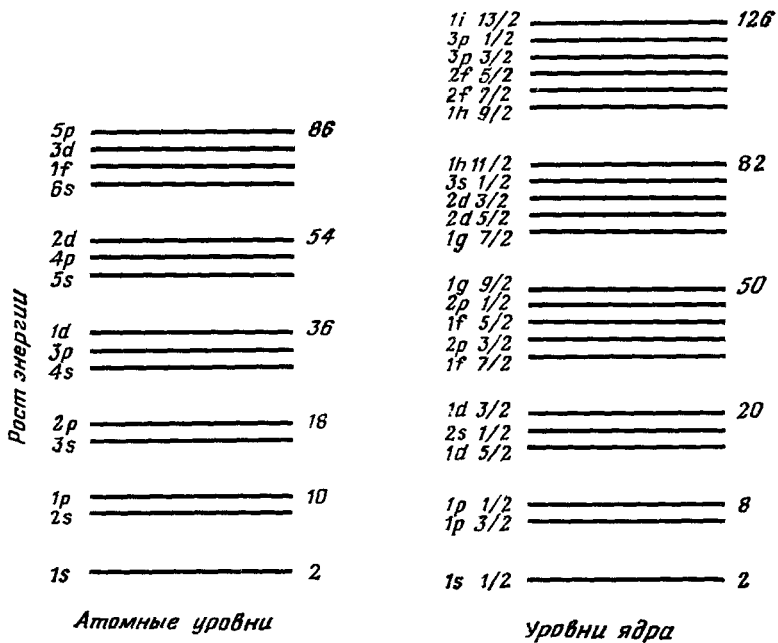


Рис. 3. Отличия в порядке энергетических уровней обусловлены отличиями атомных и ядерных сил.

Отсутствие сингулярности в ядерных силах меняет порядок 2s- и 1p-уровней. Спин-орбитальная связь меняет числа заполнения последовательных оболочек, указанные сбоку. Указан только порядок уровней, но не значения соответствующих энергий.

у ядерной силы отсутствует сингулярность в центре, 2s-уровень расположен выше, чем 1p-уровень, как показано на рис. 3, тогда как в кулоновском поле порядок обратный. Затем, сильная спин-орбитальная связь

в ядре меняет числа заполнения последовательных оболочек так, что периоды заканчиваются теперь на других числах частиц. Более того, поскольку в атоме между электронами действуют силы отталкивания, а в ядре между всеми его составляющими — силы притяжения, правило Хунда заменяется на обратное. Это правило гласит, что основное состояние атома является состоянием с наивысшей множественностью конфигурации *) в последней незаполненной оболочке, потому что в этом состоянии электроны наиболее удалены друг от друга. В ядрах, наоборот, основное состояние характеризуется наименьшей множественностью, обращаясь в нуль для любого четного числа заполнения. Следовательно, все ядра с четными числами протонов Z и нейтронов N обладают нулевым спином. Только нечетные числа заполнения приводят к ненулевым значениям угловых моментов.

Еще одно отличие проявляется в существовании двух типов ядерных составляющих — нейтронов и протонов — с почти равными массами. Эквивалентность этих двух типов частиц по отношению к ядерным взаимодействиям приводит к приблизительному вырождению квантовых уровней, отличающихся только тем, что нейтроны заменены на протоны. Это вырождение нарушается лишь за счет более слабых электромагнитных эффектов, обусловленных зарядом протонов. Оно приводит к новой симметрии и к новому квантовому числу, изотопическому спину, характеризующему ядерные спектры.

Другим следствием равенства масс составляющих ядра является отсутствие какой бы то ни было специальной локализации частиц или же хорошо определенного центра ядра. Вследствие этого, когда два ядра соединяются в процессе ядерной реакции, в результате образуется не «молекула», а новое ядро. Например, при слиянии двух ядер кислорода образуется ядро серы. При этом не возникает никакой решетки или новой суперструктуры. В этом смысле возможности образования новых структур за счет различных комбинаций ядер значительно беднее, нежели аналогичные возможности в случае атомов. Однако энергия, освобождаемая при слиянии ядер, примерно в 10^6 раз больше, чем в химических реакциях.

Существует верхний предел числа нуклонов, которые могут образовать ядро, из-за все возрастающего разрушительного эффекта кулоновского отталкивания. Возможно, что некоторые специальные оболочечные эффекты могут расширить этот предел далее, за известное в настоящее время время трансурановые элементы. Кроме того, в больших масштабах гравитационное притяжение помогает удерживать нуклоны вместе, как это имеет место, например, в открытых недавно нейтронных звездах.

Еще одна новая характерная черта появляется в этом ядерном мире. Переходы из квантовых состояний с более высокой энергией в состояния с более низкой энергией сопровождаются испусканием не только световых квантов, как это имеет место в атомах, но и испусканием лептонных пар — электронов и нейтрино. Эти процессы служат проявлением таинственного слабого взаимодействия. В них обнаруживаются такие удивительные свойства, как, например, нарушение симметрии относительно замены правого на левое. Они допускают переходы между состояниями с разным полным зарядом **). Следовательно, все ядра с одинаковым

*) Под наивысшей множественностью понимается наибольшее возможное при данной электронной конфигурации значение полного спина электронов и наибольшее возможное при этом значение полного орбитального момента. (Прим. перев.).

***) Имеются в виду заряды начального и конечного ядра (или адронного состояния). (Прим. перев.).

числом нуклонов можно рассматривать как одну и ту же квантовую систему независимо от их зарядов. Ядерная система путем последовательных переходов будет приближаться к своему основному состоянию, в котором число протонов таково, что полная энергия минимизируется.

НУКЛОНЫ И МЕЗОНЫ

Третий шаг в познании природы вещества был сделан в результате проникновения внутрь самого нуклона. Оказалось, что нуклон изменяет свое состояние после бомбардировки его потоком частиц с энергиями, превышающими несколько сотен *Мэв*. При этом нуклон переходит в одно из короткоживущих «возбужденных» квантовых состояний, из которых он

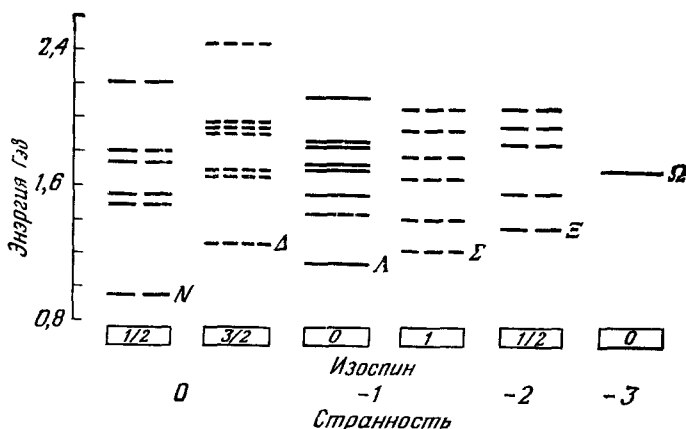


Рис. 4. Многие «элементарные» частицы оказались возбужденными состояниями нуклона с энергиями возбуждения, в 1000 раз большими энергий возбуждения ядер.

Они распадаются на группы, характеризуемые значениями таких квантовых чисел, как изоспин и странность. Число пунктиров на каждом уровне указывает число зарядовых состояний.

вновь возвращается в свое основное состояние (нейтрон или протон), испуская разными способами полученную им порцию энергии. В спектре этих «возбужденных» состояний, показанном на рис. 4, разности энергий оказываются порядка 10^8 эв, т. е. примерно в 1000 раз больше энергий возбуждения ядер. Когда эти явления были открыты, возбужденные состояния еще не были выстроены в указанном на рисунке строгом порядке. Одно за другим обнаруживались все новые состояния, и каждое из них рассматривалось как новая элементарная частица.

После тщательного изучения энергий возбуждения, квантовых чисел и продуктов распада Мюррей Гелл-Манн, Казухико Нишиджима, Ювал Нейман и многие другие разобрались в невероятном хаосе из большого числа элементарных частиц и навели здесь порядок, введя новое квантовое число, «странность», или гиперзаряд, и использовав теоретико-групповую классификацию $SU_4(3)$. Новые частицы — обозначаемые греческими буквами Δ , Σ , Ξ , Λ и Ω — были признаны возбужденными состояниями нуклона, относящимися к различным группам в соответствии со значениями определенных квантовых чисел. Некоторые из этих квантовых чисел, такие, как угловой момент и изотопический спин, были известны из атомной и ядерной физики, а квант гиперзаряда появился здесь впервые.

Эта новая область явлений открыла не только новое квантовое число, но также и новые формы энергии, испускаемые или поглощаемые в про-

цессах переходов между квантовыми состояниями. Помимо световых квантов и электрон-нейтринных пар, испускаемых в атомных и ядерных системах, новая лептонная пара, а именно мюон-нейтринная пара, появляется при таких переходах. Мюон — это тяжелый электрон, который примерно в 200 раз тяжелее обычного электрона. Но действительно новыми

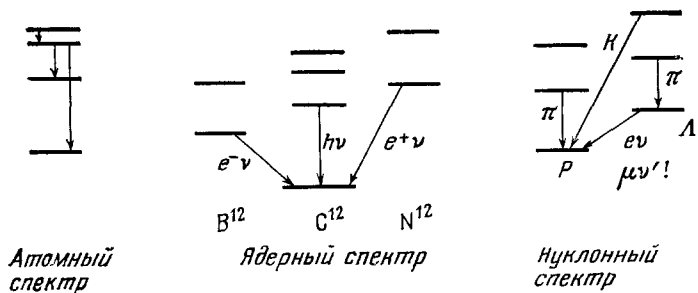


Рис. 5. Полевые кванты, испускаемые в спектрах трех типов. Световые кванты (электромагнитное взаимодействие), лептонные пары (слабое взаимодействие) и мезоны (сильное взаимодействие) характеризуют атомные, ядерные и нуклонные переходы соответственно.

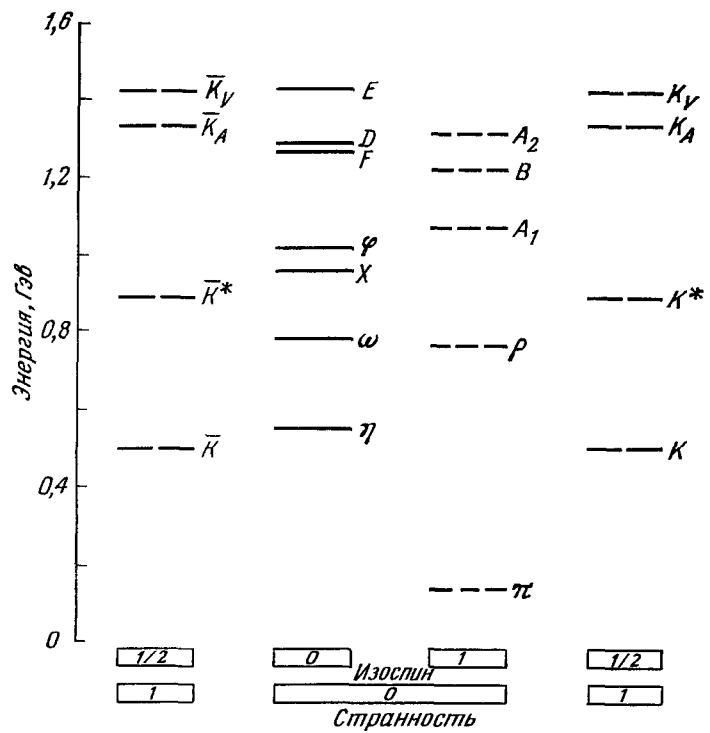


Рис. 6. Мезоны классифицируются подобно нуклонам. Оба спектра обладают сложной структурой, вытекающей из модели кварков.

формами испускаемой и поглощаемой энергии являются мезоны. Рис. 5 демонстрирует эти три типа полевых квантов и те взаимодействия, в которых они появляются.

Имеется много типов мезонов. Некоторые из них обладают спином, зарядом или гиперзарядом. Огромный набор различных по своим

свойствам мезонов можно расклассифицировать и сгруппировать по тем же квантовым числам, которые используются для нуклонного спектра. В результате получается спектр мезонов, изображенный на рис. 6. Действительно, при изменении нуклонного состояния разница в квантовых числах возмещается за счет процессов поглощения или испускания мезонов. Таким образом, классификация по квантовым числам привнесла порядок и в хаос мезонных состояний.

ПОХОЖИ ЛИ ЯДРА НА МОЛЕКУЛЫ?

Можно ли рассматривать три спектроскопии — атомную, ядерную и нуклонную — как три одинаковых шага на пути познания все меньших и меньших частиц материи? Такое утверждение вызвало бы законные сомнения. Может быть, более удобно рассмотреть только две системы, атом и нуклон, а затем уже рассмотреть уровни более сложных систем, таких,

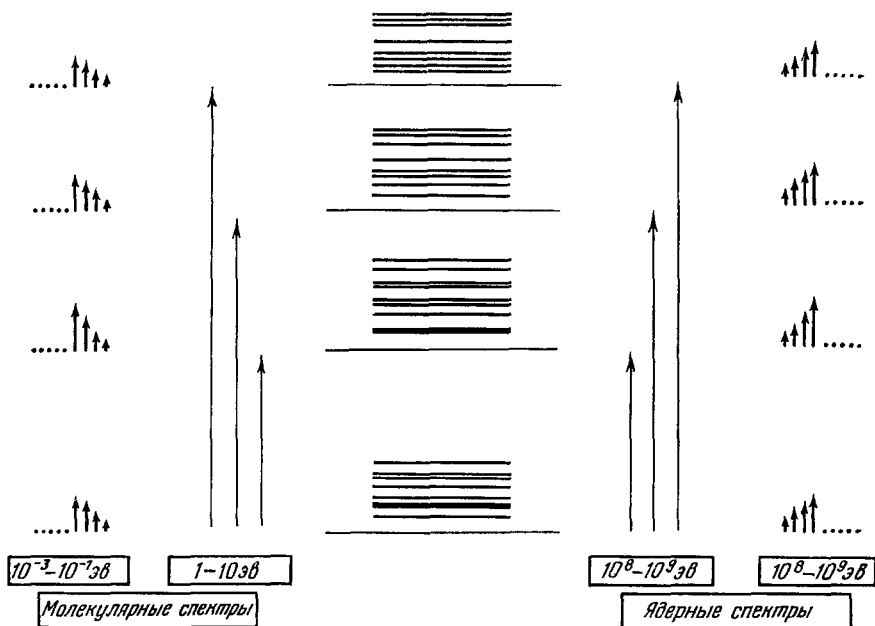


Рис. 7. Суперпозиция ядерных возбуждений (маленькие стрелки) с внутренними возбуждениями нуклонов (большие стрелки) приводит к спектру, подобному молекулярному, где вращательные и колебательные возбуждения (маленькие стрелки) добавляются к электронным возбуждениям (большие стрелки).

Возможно, что ядерные силы, аналогично молекулярным, не являются основными, а вытекают из более простых и фундаментальных сил.

как молекулы, в первом случае, и ядра — во втором. Тогда мы встретимся, с одной стороны, с атомными и молекулярными спектрами и, с другой стороны, с нуклонными и ядерными спектрами. При этом ядерные спектры можно рассматривать как следствие нуклонного спектра точно так же, как молекулярные спектры вытекают из атомных спектров. Нуклоны в ядре играют роль атомов в молекуле, а ядерные силы — роль химических сил. Эта аналогия еще более усиливается подобием ядерных и химических сил. Обе они на больших расстояниях являются силами притяжения, а на малых расстояниях приводят к сильному отталкиванию. Обе они зависят от относительных спинов и симметрии партнеров.

Аналогия оказывается еще более разительной, если мы рассмотрим расширенный спектр возбуждения ядра, который включает не только возбуждение протон-нейтронной системы, но также и внутренние возбуждения нуклонов, известные нам из третьей спектроскопии. В результате учета ядерных возбуждений совместно с внутренними возбуждениями нуклонов получается спектр, очень сильно напоминающий нам молекулярные спектры. Это наглядно видно на рис. 7.

В некотором смысле ядерные силы менее эффективны, чем химические силы. Например, энергия связи дейтона настолько мала, что он бы развалился даже, если его привести во вращение с моментом, равным всего лишь одному кванту углового момента. В то же время связи двухатомных молекул способны противостоять центробежным силам в 20 или 40 единиц углового момента. В качестве аналогичного примера можно указать на то, что энергия связи нуклона внутри ядра намного меньше, чем его внутренние энергии возбуждения, тогда как в молекулах эти две энергии сравнимы по величине. Возможно, более подошло бы сравнение ядерных сил с силами Ван-дер-Ваальса между атомами с заполненными оболочками. Ядерное вещество соответствовало бы тогда сверхтекучему гелию. Эта аналогия простирается удивительно далеко при попытках объяснить относительную независимость нуклонов при их движении внутри ядра (оболочечная модель) и некоторые типичные свойства спектров.

Как следствие довольно сложной формы ядерных сил, нам приходится признать, что они не являются фундаментальными силами, такими же, как, скажем, электростатическое притяжение. Они служат проявлением эффекта, вытекающего из более основополагающего явления, имеющего место внутри нуклонов. Это — следствие чего-то намного более мощного и простого так же, как химические силы являются следствием простого электростатического взаимодействия.

МОДЕЛЬ КВАРКОВ

Вернемся теперь к возбужденным состояниям нуклонов и мезонов. В отличие от области атомных и ядерных явлений, порядок, обнаруженный в рамках третьей спектроскопии, до сих пор является еще чисто эмпирическим фактом. Его не удается получить или объяснить с помощью внутренней динамики системы, потому что эта динамика практически неизвестна. Одной из наиболее интригующих характеристик этого упорядочения является то обстоятельство, что спектры нуклонов и мезонов обнаруживают определенные черты, указывающие на сложную структуру. Нуклонный спектр обладает некоторыми характерными свойствами системы из трех частиц, где каждая из частиц является членом типичного триплета некоторых субчастиц с полуделым спином. Мезонный спектр выглядит подобно спектру пар таких частиц или, точнее, пары из такой частицы и ее античастицы.

Хотя эта, так называемая «кварковая модель» может объяснить большое количество явлений, связанных с возбужденными нуклонами и мезонами, она сталкивается со многими логическими затруднениями. В отличие от мира атомов и ядер, здесь энергии возбуждения мезонов и нуклонов того же порядка (а иногда и больше), что и масса системы в основном состоянии. Если относительные энергии этих систем оказываются того же порядка, то пары частиц и античастиц будут появляться (или хотя бы виртуально возникать) в любом процессе взаимодействия. До сих пор у нас нет никакого систематического способа учета этого нового явления.

НЕРЕШЕННАЯ ЗАГАДКА

Строение мезонов и нуклонов все еще практически неизвестно. Мы не знаем, что определяет силы между ними и почему энергия основного состояния нуклона находится в заданном конкретном отношении к массе электрона, отношении, которое является решающим для свойств окружающего нас вещества. Мы не можем утверждать, что мы понимаем химию до тех пор, пока мы не поймем, почему протоны и нейтроны являются такими тяжелыми.

Мы только еще приступаем к изучению того, как следует говорить об этих объектах и их взаимодействиях. Дисперсионные соотношения, алгебра токов и полюсы Редже служат теми способами и путями, в рамках которых мы укладываем наблюдаемые факты в логические построения, совместимые с правилами теории относительности и квантованными полями. Наиболее вероятно, что нам понадобятся намного большие энергии частиц, прежде чем мы сможем найти, что происходит «внутри» этих структур. В настоящее время все, что мы делаем, это — сталкиваем частицы и смотрим, как они взаимодействуют и в каких квантовых состояниях разлетаются после процесса взаимодействия. Такие исследования напоминают попытки познать структуру атомов, изучая «низкоэнергетические» атомные соударения, а именно те соударения, которые возбуждают атомы, но не разваливают их. Развал нуклона будет очень трудной, если не вообще безнадежной операцией.

Спектр возбужденных нуклонных и мезонных состояний был открыт менее десяти лет тому назад. Если учесть, что понадобилось 52 года для того, чтобы объяснить периодическую таблицу атомов, нам не следует падать духом в связи с нашей неспособностью в данный момент объяснить спектры элементарных частиц.