

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУКФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

АТОМНЫЕ ЯДРА *)

Р. Пайерас

Начиная уже с 1930 г., когда с открытием нейтрона стало ясно, что ядра атомов состоят из протонов и нейтронов, физики пытаются разобраться в том, как же устроено ядро. В точности та же задача, касающаяся атома, была полностью решена в первой четверти нашего века. В настоящее время мы можем во всех деталях понять, как происходит движение электронов под действием притяжения со стороны ядра и каким образом влияет на их движение взаимное отталкивание электронов.

Но такое глубокое понимание было обусловлено тремя решающими обстоятельствами: во-первых, требовалось знание сил, действующих между частицами; во-вторых, необходимо было знать механические законы, управляющие движением электронов под действием этих сил; в-третьих, для многих вопросов было важно иметь некоторую упрощенную картину атома, или, как говорят, модель атома, чтобы начать именно с нее. Если мы имеем две первые возможности, то в принципе возможно написать некоторую систему математических уравнений, решение которых позволит нам получить все сведения об атоме или об ядре. В случае самого простого атома (таким атомом является водород; в его состав входит один электрон) или в случае простейшего сложного ядра (таким ядром является дейтон; в его состав входит один протон и один нейтрон) такие уравнения действительно могут быть написаны и без особого труда решены. Однако для более сложных образований такой прямой подход к проблеме делается затруднительным и довольно быстро начинает превышать даже возможности современных электронных вычислительных машин.

Наше положение очень напоминает положение человека, который впервые сталкивается с очень сложной машиной и пытается постичь, как она работает. Если попытаться, без всякой помощи извне, разгадать взаимодействие всех частей этой машины, то мы вскоре окажемся в довольно запутанном лабиринте. Чтобы избежать этого, мы для начала пробуем уловить основные особенности работы машины. Мы придумаем некоторую простую модель, которая в своих существенных чертах сходна с действительным положением дел, но доступна для того, чтобы разобраться в ее работе. Далее, безусловно, мы должны ввести

*) В оригинале подзаголовок: «Как их представляют себе физики в настоящее время? Замечательно, что различные подходы к ядру требуют совершенно различной картины строения ядра, среди которых можно отметить модель жидкой капли, модель оболочек и оптическую модель». Scientific American 200, 75 (1959). Перевод В. А. Угарова.

определенные уточнения, учитывающие опущенные нами детали и проверить, не могут ли изменить существенно эти поправки принятую нами схему.

При изучении атома первое из трех рассматриваемых обстоятельств едва ли составляло проблему. Поскольку Эрнст Резерфорд надежно установил, что атом представляет собой тяжелое, положительно заряженное ядро, окруженное легкими, отрицательно заряженными электронами, было принято, что силы между этими частицами есть просто силы притяжения, действующие между разноименными электрическими зарядами и подчиняющиеся известному закону обратной пропорциональности квадрату расстояния (закон Кулона, известный всякому, изучавшему физику в школе). Второе обстоятельство составило основную трудность для построения картины атома. Оказалось, что основные принципы механики, открытые Ньютоном, великолепно приложимые ко всем «крупным» объектам от планет и Луны до паровых машин и часов, в области атомной физики должны быть изменены. Для понимания строения атомов необходимо использовать новые идеи квантовой теории, первоначально появившиеся в работе Нильса Бора, который воспользовался представлением о кванте действия, обнаруженном Максом Планком при рассмотрении световых явлений. Новые законы механики позже были сформулированы в виде законов «квантовой механики», или, иначе, «волновой механики», которая и предоставила нам полную возможность построить теорию атома.

Третье обстоятельство — возможность построения упрощенной модели для рассмотрения атома — также не влекло за собой особых затруднений. Рассматривая возможные орбиты единственного электрона, движущегося под действием силы притяжения протона (это имеет место в атоме водорода), Бор обнаружил, что поведение более сложного атома может быть описано аналогичным образом: допускается, что и в сложном атоме каждый электрон движется по такой орбите. Чем больше число электронов в атоме, тем больше различных допустимых орбит занято; такое положение вещей является следствием «принципа исключения», сформулированного Вольфгангом Паули. Этим принципом ограничивается число электронов, которые могут находиться на данной орбите.

Далее мы можем принять во внимание не только притяжение электронов ядром, но также и взаимное отталкивание электронов. Однако мы можем значительно упростить характер этого взаимодействия, отвлекаясь от того, что сила отталкивания непрерывно изменяется при перемещении электрона по своей орбите. Можно принять, что эти силы отталкивания создают некоторое постоянное поле сил. Другими словами, мы заменяем отталкивание, обусловленное каждым движущимся электроном, отталкиванием, которое мы получили бы, если бы электрон был равномерно размазан по длине своей орбиты. Такое упрощение имеет своим оправданием тот факт, что силы отталкивания действуют на достаточно больших расстояниях, так что каждый электрон в одно и то же время испытывает влияние со стороны нескольких других. Если мы при этом недооцениваем действие одного из электронов, который оказывается несколько ближе к рассматриваемому, то мы, наверное, переоцениваем действие другого, который в это же самое время оказывается на значительном удалении.

Такую модель атома обычно принято называть «моделью атомных оболочек», так как очень удобно группировать электроны атома по группам; эти группы содержат электроны, движущиеся по орбитам одинакового размера, но различной формы и направления в пространстве. Группа орбит, о которой идет речь, называется оболочкой.

Когда впервые приступили к серьезному изучению атомного ядра, то характер возникших при этом трудностей оказался совсем иным. Общие законы динамики, по-видимому, не требовали дальнейшего пересмотра; законы квантовой механики, сформулированные при изучении атомных явлений, оказались вполне подходящими для изучения явлений, происходящих в области ядра. И действительно, до сих пор у нас нет никаких данных, свидетельствующих о том, что в поведении ядер есть отклонения от законов, предписываемых квантовой механикой. Таким образом, второе обстоятельство из числа трех, которые мы считаем существенными, затруднения не представляло.

ЯДЕРНЫЕ СИЛЫ

С другой стороны, первое обстоятельство—определение сил, действующих между частицами—оказалось очень сложной задачей. Даже сегодня, после интенсивного двадцатипятилетнего изучения ядра у нас нет исчерпывающего ответа на вопрос о том, что такое ядерные силы; однако сейчас мы располагаем, по крайней мере, ясным представлением о том, на что эти силы похожи, и на что—нет.

Эти силы не могут иметь электрическую природу. Единственными электрическими зарядами, обнаруженными в ядрах, являются положительные заряды протонов, которые, как всякие одноименные заряды, отталкивают друг друга; следовательно, силы электрического взаимодействия не могут обеспечить прочную связь частиц в ядре. Кроме того, силы электрического взаимодействия слишком слабы. Известно, что энергия притяжения двух разноименных зарядов (другими словами, та работа, которую нужно произвести, чтобы развести их на данное расстояние) обратно пропорциональна расстоянию между этими зарядами. Энергия притяжения электрона и протона в атоме водорода составляет лишь несколько электрон-вольт (эв), а так как диаметр атома водорода в 20 000 раз больше диаметра наименьшего из ядер, можно ожидать, что величина электрической энергии в ядре может оставлять лишь несколько десятков тысяч электрон-вольт. Фактически же силы, действующие в ядре, соответствуют энергиям, равным многим миллионам электрон-вольт (Мэв). Отсюда вытекает, что ядерные силы несоизмеримо сильнее электрических сил.

Ясно также, что эти чрезвычайно большие силы действуют на весьма малых расстояниях. Самые первые работы Резерфорда, исследовавшего прохождение заряженных частиц через вещество, обнаружили, что даже в тех случаях, когда заряженная частица приближается к ядру на расстояние, составляющее лишь несколько ядерных диаметров, единственными заметными силами являются электрические силы. Сегодня мы хорошо знаем, что ядерными силами, действующими между двумя частицами, вполне можно пренебречь, если расстояние между этими частицами, скажем, больше, чем четыре *ферми* (*ферми*—это удобная единица для измерения ядерных расстояний. Свое название она получила в память Энрико *Ферми*. Диаметр тяжелого ядра равен примерно пятнадцати *ферми*; диаметр атома водорода составляет около 100 000 *ферми*). Совершенно неудивительно поэтому, что физики не обнаружили ядерных сил в лабораторных опытах, осуществленных вплоть до последнего времени. Единственно возможный путь для изучения этих сил состоит в том, чтобы наблюдать поведение самих ядер или подвергать бомбардировке водород и другие ядра быстрыми протонами и нейтронами в таких условиях, когда может проявиться влияние весьма близких столкновений.

Значительно усложняет задачу то, что природа ядерных сил такова, что, в отличие от электрических сил и сил тяготения, действующих согласно простому закону обратной пропорциональности квадрату расстояния—их действие подчиняется некоторому сложному закону. Если бы закон действия ядерных сил был прост, то было бы достаточно незначительного числа наблюдений, чтобы разгадать его общее математическое выражение. Но все простые догадки, основывавшиеся на некотором числе экспериментальных данных, были опровергнуты последующими экспериментами. Мы вынуждены постепенно конструировать закон ядерных сил, терпеливо собирая отдельные кусочки сведений, которые можно извлечь из экспериментов.

В конечном счете, мы возлагаем надежды на то, что станет возможным установить закон действия ядерных сил из каких-то более общих принципов, точно так же как можно вывести закон обратной пропорциональности квадрату расстояния для сил электрического взаимодействия из основных законов электромагнетизма. Начало этому было положено японским физиком Хидеки Юкава, который воспользовался аналогией с электромагнитным излучением для того, чтобы установить, что ядерные силы могут быть связаны с новой формой излучения, которое переносит с собой заряженные частицы, весящие в несколько сотен раз больше, чем весит электрон. Его предсказание было подтверждено, когда был открыт так называемый π -мезон (пион). Механизм, указанный Юкавой, лежащий в основе образования ядерных сил, с качественной стороны был подтвержден многочисленными наблюдениями. Он оказался полезной руководящей идеей для развития наших представлений о ядерных силах. Однако использовать его идею для надежного и точного вывода закона действия ядерных сил не представляется возможным из-за чрезвычайных математических трудностей, стоящих на этом пути. Мы даже не знаем до сих пор, содержат ли строгие решения уравнений, воплощающих идею Юкавы, правильное выражение для ядерных сил или в его подходе с самого начала содержится какая-то ошибка. Математические трудности возникают главным образом из-за большой величины ядерных сил по сравнению с силами электрического взаимодействия; это обстоятельство делает анализ ядерных сил значительно более сложным, чем анализ сил электрических.

Таким образом, лучшим источником информации относительно ядерных сил продолжает оставаться прямой эксперимент. Такой эксперимент требует наблюдения столкновений при высоких энергиях, значительно более высоких, чем энергии частиц внутри нормального ядра. Причина этого кроется в том, что частицы обладают волновыми свойствами; это составляет одну из существенных черт квантовой механики. Медленные частицы связаны с волнами, имеющими значительную длину волны и поэтому столкновения с участием таких медленных частиц не дают достаточной информации, касающейся деталей ядерных сил, играющих роль при взаимодействии между частицами. Вполне аналогично этому, когда мы рассматриваем в микроскоп пылинку диаметром, меньшим чем длина волны падающего света, то мы видим только расплывшееся пятно, не позволяющее судить о форме или природе рассматриваемой частицы. Чтобы получить частицы с достаточно малой длиной волны, нужно поднять энергию этих частиц до нескольких сотен *Мэв*. Поэтому наиболее надежная информация об ядерных силах стала доступной, как это понятно из предыдущего, лишь в последние годы, в связи с развитием ускорителей, на которых можно получать пучки чистых протонов, нейтронов и электронов с такими энергиями. Такая необходимость в пучках частиц высокой энергии совершенно аналогична возникшему в свое время положению

в атомной физике, когда для выявления детальной картины строения атома понадобилось использование рентгеновских лучей или электронных пучков с энергией несколько тысяч электрон-вольт, т. е. с энергией значительно большей, чем энергия электронов внутри атомов; длина волны электронов в атомах сравнима с атомным диаметром. Значительная сложность получаемых результатов делает необходимым для получения выводов из проведенных экспериментов также использование быстродействующих электронных счетных машин.

В предлагаемой статье я не пытаюсь дать исчерпывающее описание всех свойств ядерных сил, но останавливаюсь только на тех особенностях, которые будут нужны для дальнейшего. Мы уже указали на то, что ядерные силы должны быть очень большими и короткодействующими. Поскольку они сдерживают различные частицы, то их результирующим действием должно быть притяжение. В то же самое время они не могут быть силами абсолютного притяжения, поскольку в этом случае тяжелые ядра оказались бы в состоянии «шока». Под состоянием «шока» ядра мы понимаем такое состояние, когда все частицы, входящие в ядро, расположены столь близко друг к другу, что каждая из частиц расположена в сфере действия сил притяжения всех остальных. В этом случае энергия притяжения, отнесенная к одной частице, должна возрастать с возрастанием полного числа частиц, находящихся в ядре, а объем, занимаемый ядром в целом, оставался бы одним и тем же, независимо от того, сколько частиц входит в ядро. В действительности ничего подобного нет. Энергия, приходящаяся на одну частицу, примерно одинакова для всех ядер, легких или тяжелых, а объем, занимаемый ядром, возрастает с увеличением числа частиц в нем.

ОБМЕННЫЕ СИЛЫ

Такое поведение ядерных сил, указывающее на ограниченность возможности притяжения, обычно называют «насыщением» ядерных сил.

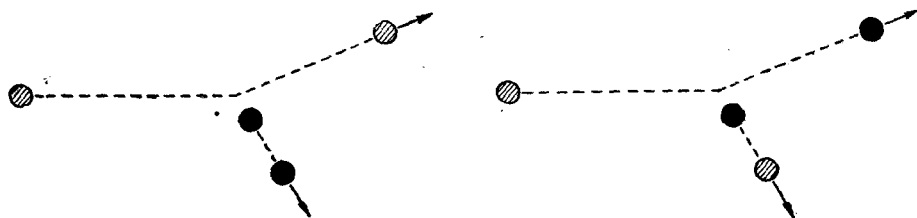


Рис. 1. Схематическое изображение зарядового обмена в ядре. Когда протон (черный кружок) испытывает удар со стороны быстрого нейтрона (заштрихованный кружок), в половине случаев (левый рисунок) нейтрон продолжает свое движение вперед. В другой половине случаев (правый рисунок) протон обменивается зарядом с нейтроном.

Существуют два наиболее разумных способа объяснения насыщения. Один из них был предложен немецким физиком Вернером Гейзенбергом, одним из основоположников квантовой механики. Он допустил, что ядерные силы, действующие между протоном и нейтроном, по крайней мере частично обусловлены обменом местами между этими частицами, так что после столкновения между ними нейтрон продолжает путь, по которому двигался протон, и наоборот. Особенно легко происходит обмен в том случае, если две частицы движутся по сходным орбитам, а так как

согласно принципу исключения Паули на одной и той же орбите может находиться только ограниченное количество частиц, такого рода обменные силы будут возникать у данной частицы лишь с некоторыми другими. Бомбардировка протонов быстрыми нейтронами подтверждает эту мысль, потому что в большинстве случаев оказывалось, что либо нейтрон, либо протон имели тенденцию двигаться вперед с почти той же скоростью и по тому же самому направлению, какие были у первоначально падающих нейтронов. Поскольку довольно трудно заставить такую быструю частицу отклониться от своего пути, то это наблюдение показывает, что падающий нейтрон продолжает свое движение почти по прямой линии, но что в половине соударений он меняет свою природу и превращается в протон, оставляя позади себя нейтрон (рис. 1).

Вместе с тем опыт показывает, что только половина сил носит обменный характер; вторая половина (соответствующая нейтронам, продолжающим движение вперед и после соударения) представляет собой «обычные»



Рис. 2. Зависимость ядерных сил от расстояния между частицами. Если частицы сближаются вплотную, то они отталкиваются (левый рисунок). Если они расходятся на не очень большое расстояние, они притягивают друг друга (средний рисунок). На значительном расстоянии друг от друга взаимное влияние частиц друг на друга незначительно (правый рисунок).

силы. Но всего этого еще недостаточно, чтобы обеспечить требуемое насыщение, поэтому необходимо привлечение некоторых дополнительных соображений. Вторым обстоятельством, ведущим к насыщению, является почти абсолютно достоверно известное обращение направления действия ядерных сил на малых расстояниях, так что при приближении частиц друг к другу притяжение сменяется отталкиванием. Такое представление об «отталкивающей сердцевине» сил известно уже из изучения свойств атомов. Когда атомы образуют химическое соединение, жидкость или твердое тело, они удерживаются вблизи друг друга силами притяжения; каждый атом имеет вполне определенный размер, и когда два атома приходят в непосредственное соприкосновение, их взаимное притяжение сменяется отталкиванием. Можно уподобить такое поведение атомов поведению двух резиновых мячей, связанных вместе резиновой лентой. Два таких мяча прижимаются (притягиваются) друг к другу, однако в месте соприкосновения мячей существует сила, противодействующая сближению центров мячей на величину, меньшую диаметра этих мячей (рис. 2). Вскоре после того, как необходимость наличия отталкивательной сердцевины у ядерных сил была осознана теоретически, опыты по столкновениям быстрых частиц дали прямые указания на существование таких сил отталкивания.

Среди других особенностей ядер мне хочется упомянуть «спин-орбитальные» силы, т. е. зависимость взаимодействия двух частиц от направления их спинов относительно их орбиты. Когда две частицы вращаются вокруг своих осей в том же самом направлении, в каком они совершают вращение относительно друг друга, притяжение между ними сильнее, чем в том случае, когда направление собственного вращения частиц противоположно направлению вращения частиц относительно друг друга и когда притяжение более слабо (рис. 3). Имеются некоторые экспериментальные данные, указывающие на наличие таких «спин-орбитальных» сил, полученные при изучении ядерных столкновений, однако в интерпретации

этих экспериментов имеются возможности и для обратного вывода.

Наших современных сведений об ядерных силах, как бы неполны они ни были, достаточно для того, чтобы рассматривать поведение ядер и различные столкновения между ними. На этой стадии изучения ядер нам нужно обеспечить третье существенное обстоятельство, упомянутое

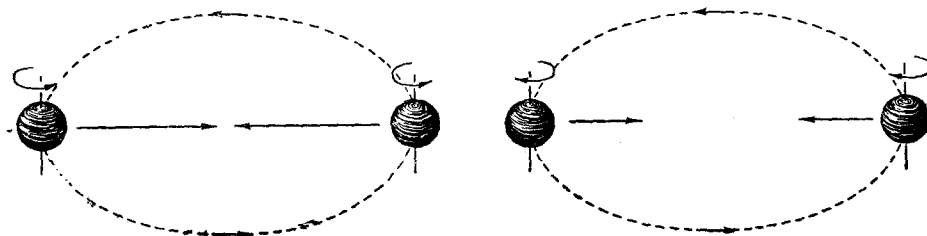


Рис. 3. Спин-орбитальные силы возникают из-за связи между направлением спина и направлением орбиты. Когда две частицы (левый рисунок) вращаются в одном и том же направлении, в каком они вращаются и по орбите, взаимодействие между ними сильнее, чем в том случае, когда эти направления противоположны (правый рисунок).

в нашей общей программе, именно, нам нужно придумать какую-то простую модель, с помощью которой мы можем решать динамическую проблему движения шестнадцати частиц в ядре кислорода или двухсот восьми частиц в наиболее устойчивом ядре—ядре свинца.

МОДЕЛИ ЯДРА

Выбор подходящей модели ядра является отнюдь не простым делом. И не потому, что не из чего выбирать. Напротив, беспокойство внушает тот факт, что в недалеком прошлом были предложены в чрезвычайном изобилии различные модели, причем каждая из них оказывалась пригодной для объяснения поведения ядер в определенных условиях, но вместе с тем каждая находилась в очевидном противоречии с другими моделями, тоже имевшими определенные успехи; случалось, что эти модели даже противоречили нашим общим представлениям об ядерных силах. В последние годы был достигнут значительный успех в прояснении всей ситуации в целом и обоснованию применения каждой модели в той области, где ее использование разумно. Я попытаюсь коротко изложить основные идеи, использованные для построения различных моделей ядра.

Наиболее очевидной мыслью было использовать модель оболочек, применение которой было столь успешным в теории атома. Фактически первые попытки использовать такую модель были сделаны даже до того, как был открыт нейтрон, когда еще думали, что ядро состоит из протонов и электронов. Модель оболочек, составленная не из тех частиц, которые есть на самом деле, вряд ли могла рассчитывать на заметный успех в объяснении экспериментальных данных, но в те времена соответствующих экспериментальных фактов было не так уж много и такие модели могли просуществовать некоторое время.

После открытия нейтрона попытки построить оболочечную модель ядра возобновились. Эта модель подразумевает наличие орбит (или определенных квантовых состояний) для протонов и нейтронов, причем в этих состояниях движение каждого из них представляется независимым от движения остальных, происходящим под действием некоторой силы, описывающей усредненное действие со стороны всех других частиц, подобно

тому как это делается для электронов в атоме (рис. 4). Однако, по-видимому, невозможно подобрать правильно группы орбит так, чтобы число сходных орбит, составляющих определенную оболочку, можно было бы точно подогнать под соответствующее число нейтронов и протонов для объяснения особой устойчивости ядер с некоторыми числами (так называемыми «магическими числами») нейтронов и протонов.

Эта же идея была использована для рассмотрения соударений нейтронов с ядрами. Согласно модели оболочки налетающий нейтрон начинает двигаться в ядре по своей собственной орбите, как в поле некоторой

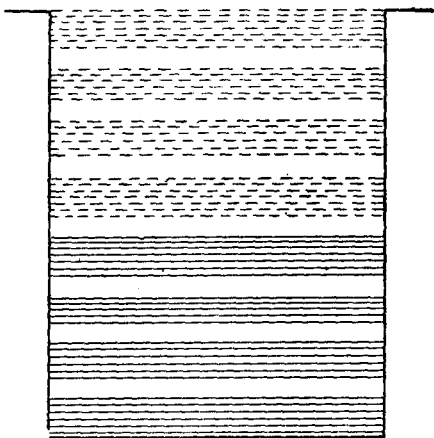


Рис. 4. Модель оболочек ядра изображается с помощью потенциальной «ямы», группы горизонтальных линий внутри которой указывают орбиты, которые могут занимать частицы, находящиеся в ядре. Та часть орбит, которая изображена сплошными линиями, соответствует орбитам с наименьшей энергией; группа орбит, изображенных пунктирными линиями, соответствует орбитам с большей энергией.

силы; что же касается отдельных столкновений с частицами, входящими в состав ядра-мишени, то они происходят редко и не имеют существенного значения. Следовательно, нейтрон чаще всего должен выходить из ядра с той же самой скоростью, с какой он вошел в ядро, и лишь изредка захватываться ядром. Детали этого процесса не должны критически зависеть от скорости нейтрона.

Однако наблюдения над такими столкновениями, начатые Ферми в Риме, обнаружили совсем иную картину. Большинство нейтронов, взаимодействовавших с ядрами, было захвачено, а их избыточная энергия была отдана в виде гамма-излучения. Более того, вероятность, что нейтрон вступит во взаимодействие с ядром, весьма критически зависит от энергии нейтрона. Было обнаружено большое количество резонансов, т. е. отчетливо избранных значений энергии, при которых нейтроны безусловно захватываются ядрами. Для каждого вида ядер-мишеней существует большое число таких резонансов, причем разность между энер-

гиями, составляющими эти резонансы, зачастую ниже, чем 100 эв , что в ядерной шкале энергий является очень малой величиной.

Эти резонансы оказываются чрезвычайно острыми, а, согласно принципу неопределенности квантовой механики, точно определенные значения энергии связаны с продолжительным временем существования состояния с такой энергией. Таким образом, отсюда вытекает, что если нейтрон попадает в ядро в условиях резонанса, то он может там оставаться продолжительное время, значительно большее, чем время, необходимое, чтобы пройти пространственную область, имеющую размер порядка размера ядра.

МОДЕЛЬ ЖИДКОЙ КАПЛИ

Путь разрешения этих очевидных противоречий был указан Бором. Бор выяснил, что неправильно представлять себе дело так, что нейтрон попадает в некоторое усредненное поле сил, поскольку ядро представляет собой систему плотно упакованных частиц, где каждая частица оказывает сильное действие на пришедший извне нейтрон, равно как и на осталь-

ные частицы, входящие в ядро. Вместо того, чтобы сравнивать процесс проникновения нейтрона в ядро с явлением прохождения кометы через солнечную систему, как это можно было делать, рассматривая прохождение электрона через атом, мы должны сравнивать его с попаданием резинового мяча в пространство, уже плотно заполненное точно такими же мячами. Результатом попадания такого мяча будет сложное движение всех мячей, а энергия движения мяча, пришедшего извне, быстро перераспределится между всеми остальными мячами (рис. 5).

Динамическая задача поэтому состоит в том, чтобы правильно описать систему, в которую входит много частиц; тем самым мы получаем широкие возможности варьировать детали движения всех частиц. Согласно правилам квантовой механики, это означает, что мы получим значительно большее число состояний движения, которые и ответственны за резкое возращение числа резонансов. Вместе с тем, мы сразу обнаруживаем причину, по которой нейтрон может долго задерживаться в ядре; дело заключается в том, что когда энергия движения нейтрона распределяется среди большого числа частиц, ни одна из них не может приобрести скорости, достаточной для того, чтобы преодолеть общее притяжение. Пройдет немало времени, прежде чем благодаря случайному стечению обстоятельств одна из ядерных частиц получит энергию, достаточную для того, чтобы покинуть ядро. В нашем примере с мячами этого вообще никогда не случится, потому что через незначительный промежуток времени большая часть полученной энергии рассеется из-за трения. В случае ядра аналогом трения является потеря энергии на гамма-излучение и именно это излучение обуславливает те случаи, когда нейтрон захватывается ядром. Но этот захват менее прочен, чем в примере с мячами, и некоторые нейтроны все же имеют возможность вырваться из ядра.

Физик отнюдь не склонен отождествлять картину поведения частиц в ядре с поведением системы, состоящей из мячей, которая имеет весьма отдаленное сходство с ядром, но картина, происходящая в ядре, очень сильно напоминает ему картину попадания молекулы воды в водяную каплю; по этой причине модель Бора очень часто называют «моделью жидкой капли».

Модель жидкой капли имела значительный успех; с ее помощью удалось объяснить многие характерные черты ядерных реакций. Теперь стало вполне очевидным, что все первоначальные идеи, касающиеся модели оболочек, представлявшие движение частиц как независимых, обречены на неудачу, потому что плотность ядра очень велика, а многочисленные столкновения с другими частицами оказывают сильное воздействие на частицу, когда она движется в ядре. Многие физики стали поэтому рассматривать самую идею модели оболочек как ошибочную, однако некоторые физики, то ли упрямо отказываясь принять аргументы против этой модели, то ли благодаря глубокому интуитивному чувству, которое подсказывало им, что как-то можно обойти выдвигаемые возражения, продолжали рассматривать поведение ядер в их нормальном состоянии на основе модели оболочек.

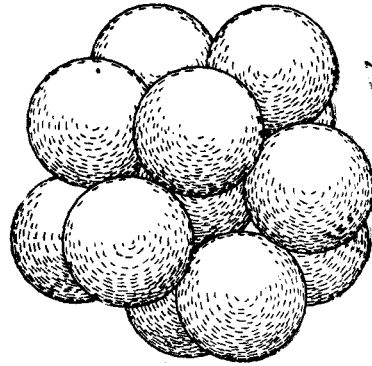


Рис. 5. Модель жидкой капли может быть изображена как собрание мячей. Когда другая частица или другой мяч входит в ядро, движение всех мячей становится иным.

СНОВА МОДЕЛЬ ОБОЛОЧЕК

Вскоре, однако, стало очевидным, что существуют неопровержимые данные в пользу представления об оболочках, а окончательный успех ядерных оболочек выяснился, когда Мария Майер (Чикаго) и Йенсен (Гейдельберг) независимо друг от друга обнаружили, что экспериментально наблюдаемые факты удивительно хорошо объясняются слегка видоизмененной моделью оболочек. То небольшое видоизменение, которое нужно было сделать, состояло в том, что если частица вращается в том же направлении, в котором она движется относительно центра ядра, то ее орбита отличается от орбиты частицы, вращающейся в противоположном направлении. Когда была выдвинута эта идея, еще не было известно, что сила взаимодействия между двумя частицами зависит от относительной ориентации спина и орбиты. Теперь эта идея представляется нам совершенно естественной. С этим видоизменением модель оболочек объясняет такое количество опытных фактов относительно поведения ядер, что не остается никаких сомнений в том, что она в существенных чертах правильна.

Но как же опровергнуть возражение, состоящее в том, что взаимное возмущение частиц при движении по орбитам должно быть столь сильным, что модель оболочек не может быть справедливой? Кроме этой загадки, возникает еще вопрос, как можно определить орбиты частиц, зная основной закон взаимодействия между ними. До сих пор орбиты просто выбирались так, чтобы наилучшим образом удовлетворить экспериментальным данным; было бы, конечно, весьма желательно понять происхождение орбит.

Эти вопросы нашли свое разрешение в целой серии исследований, начатых Брюкнером и продолженных многими другими. В этих работах заложены две основные составляющие. Первая: принимается в расчет действие принципа исключения, который утверждает, что только два протона и два нейтрона могут находиться на одной и той же орбите. В нормальном состоянии ядра все орбиты, соответствующие наименьшей энергии, заняты каждая четырьмя такими частицами и взаимное влияние частиц на их движение очень невелико. Отклонить движение частицы с движения по орбите—это значит перекинуть ее на другую орбиту, но все другие орбиты, соответствующие наименьшим энергиям, уже заняты. Перебросить же частицу на орбиту, на которой энергия движения значительно больше, довольно трудно, если только какой-либо другой партнер при столкновении не отдаст частице свою энергию, т. е. сам перейдет в состояние движения с низшей энергией, что оказывается невозможным, потому что все пригодные для этой цели орбиты уже заняты. Таким же поведением характеризуются, как это хорошо известно, электроны в металле, которых очень трудно перекинуть с их орбит именно по такой же причине; этим и объясняется то, что многие металлы являются хорошими проводниками электричества (рис. 6).

Принцип исключения мог бы дать вполне приемлемое оправдание модели оболочек, если бы не было отталкивающей сердцевины ядерных сил. Силы отталкивания, действующие между двумя частицами, находящимися в непосредственной близости, настолько велики, что даже при лобовом ударе прохождение одной частицы через другую невозможно. Таким образом, несмотря на принцип исключения, частицы вынуждены несколько отклоняться от своих орбит.

Это приводит к появлению второй составляющей в рассуждениях Брюкнера. Рассмотрев внимательно столкновение двух частиц, в котором проявляется такое отталкивание, действующее на очень малых рас-

стояниях, он обнаружил, что отклонение частиц от своего пути зависит не столько от того, насколько сильно это отталкивание (при условии, что оно вообще достаточно сильное), сколько от того, на какое расстояние простирается действие этого отталкивания. Если это расстояние, т. е. диаметр сердцевины, достаточно мало, результирующее возмущение будет небольшим, поскольку частицы испытывают только легкое «неуловимое действие», происходящее при прохождении частиц мимо друг друга. Поскольку диаметр сердцевины ядерных сил мал по сравнению со средним

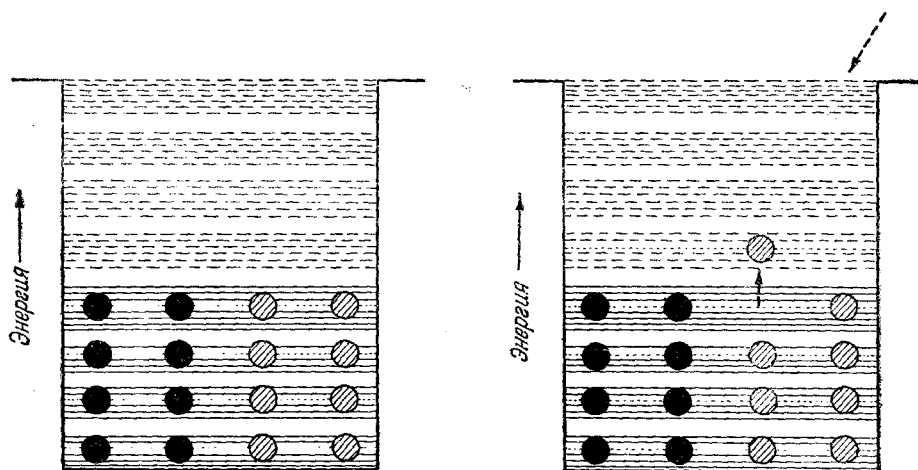


Рис. 6. Орбиты с наименьшей энергией, согласно модели оболочек ядра, могут быть заняты каждая только двумя нейтронами (светлые кружки) и двумя протонами (черные кружки). При нормальном положении дел (левый рисунок) орбиты с наименьшей энергией заняты; частицы не могут отдать или приобрести энергию и, следовательно, не могут уйти со своих орбит. Бомбардирующая частица (в верхней части правого рисунка) имеет некоторый запас энергии; тем самым она имеет возможность обмениваться энергией с частицами, находящимися в ядре, и перемещать их на орбиты, соответствующие более высокой энергии.

расстоянием между частицами в ядре, есть надежда на то, что возмущение, вносимое силами отталкивания, невелико. Но, чтобы правильно описывать соударения, мы должны быть в состоянии строго и полностью решить задачу о соударении двух частиц, учитывая также наличие и сил отталкивания. К счастью, эта задача может быть решена.

Подобно тому как в атоме мы предполагаем, что каждая частица движется под действием средней силы, создаваемой всеми остальными частицами, задача об ядре может быть упрощена при допущении, что происходит столкновение двух частиц, происходящее в условиях взаимодействия со средней силой, создаваемой всеми остальными частицами. Математическая трактовка, воплощающая эти идеи, сделала впервые возможным подсчитать энергию связи и другие характеристики ядер из данных о ядерных силах, почерпнутых из изучения столкновений двух частиц без каких-либо дополнительных произвольных гипотез.

Эти идеи не обесценивают соображений Бора относительно соударения ядерной частицы, идущей извне, с ядром. В этом случае мы имеем дело с частицей, которая обладает заметным количеством излишней энергии, а именно такой энергии, которая необходима для удаления частицы из ядра, если частица была этим ядром захвачена. Поэтому частица легко может обмениваться энергией с другими частицами, входящими в состав ядра, не нарушая при этом принцип исключения.

Однако эта проблема не исчерпывается одной только этой стороной дела. При изучении нейтронных резонансов, о которых мы уже рассказывали, и при аналогичных соударениях протонов с ядрами, было обнаружено, что вовсе не все резонансы обладают одинаковой силой. При заданной скорости нейтрона можно найти несколько ядер, которые

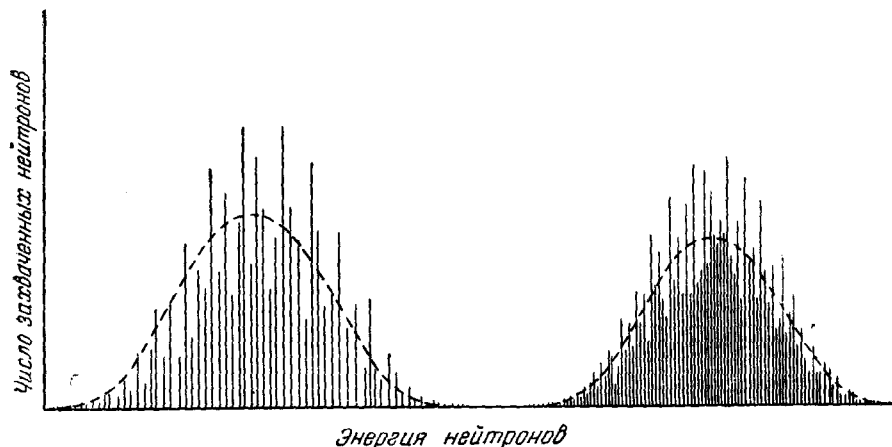


Рис. 7. Пунктирная кривая изображает гигантский резонанс, типичный для ядер. Каждая из вертикальных линий соответствует обычному (одинарному) резонансу. Высота каждой линии соответствует числу бомбардирующих нейтронов, с соответствующей энергией, которые либо захватываются ядром, либо выбрасываются ядром с некоторой частью первоначальной энергии. Гигантские резонансы наблюдаются при бомбардировке ядра частицами малой энергии с нерезкой сортировкой по энергиям.

обнаруживают особенно сильные резонансы или, наоборот, для каждого данного ядра имеется несколько интервалов скоростей нейтронов, для которых резонанс выражен особенно отчетливо. Эти интервалы скоростей носят название «гигантских резонансов» (рис. 7).

ОПТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Эти результаты были истолкованы Виктором Вайскопфом на основе «оптической модели» ядра, в которой мы снова возвращаемся к представлению о частице, движущейся в поле некоторых сил (рис. 8). К этой картине мы должны добавить возможность поглощения частицы, т. е. выхода частицы из пучка бомбардирующих нейтронов. Как можно понять успех этой картины независимого движения частиц в свете рассуждений Бора?

В существенных чертах ответ на этот вопрос был дан Вайскопфом. Этот ответ может быть изложен путем рассмотрения последовательности событий во времени. Конечно, вероятнее всего бомбардирующая частица будет отклонена от своего пути в результате соударения, для этого потребуется незначительное время. Таким образом, она будет проникать в ядро по невозмущенной орбите в течение очень малого промежутка времени и именно этот начальный период имеет существенное значение для того, будет ли на самом деле частица захвачена ядром или же она будет возвращена обратно на поверхность. Теперь припомним еще раз принцип неопределенности; когда мы говорим о малых промежутках времени, мы не можем рассчитывать на слишком точное определение значений энергии. Поэтому мы должны рассматривать не нейтроны с точно

определенной энергией, а пучок нейтронов с различной энергией, причем разброс нейтронов по энергиям будет тем больше, чем меньше то время, за которое они с заметной вероятностью будут вовлечены в соударения внутри ядра. В экспериментах очень часто используются такие смешанные пучки, если не приняты специальные меры для выделения электронов с одинаковой энергией. Если же мы будем рассматривать данные опытов, где использовались хорошо отсортированные по энергиям нейтроны, мы сумеем собрать вместе наблюдения в подходящем интервале энергий.

Теперь мы уже не будем искать острых резонансов, потому что их всегда будет несколько внутри используемого нами интервала энергий.

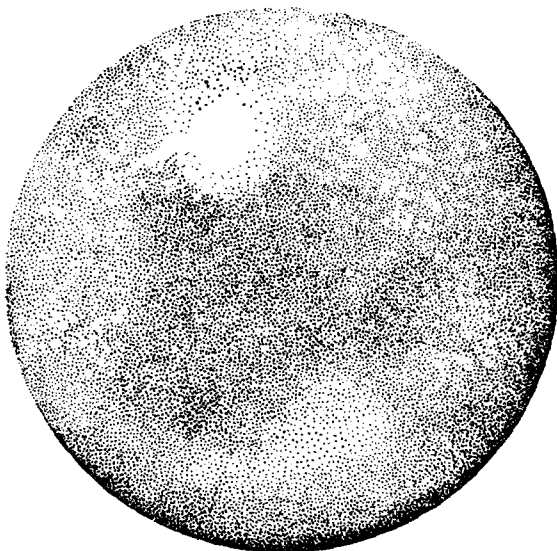


Рис. 8. Оптическая модель представляет ядро как серую кристаллическую сферу. Серость сферы соответствует возможности поглощения налетающих нейтронов ядром.

Результат, который мы получим таким образом, будет отражать силу резонансов и их число внутри избранного интервала. Вместе с тем, эти результаты отражают первый кратковременный период развития процесса; поскольку нейтрон следует в течение короткого промежутка времени по невозмущенной орбите, они отражают свойства таких невозмущенных орбит. Эта картина непосредственно приводит нас к оптической модели ядра, которая предполагает, что нейтроны движутся по невозмущенным орбитам. Поглощение, которое введено в оптическую модель Вайскопфа, просто отражает тот факт, что частицы не остаются на таких невозмущенных орбитах вечно, но что они рано или поздно уходят с этих орбит, благодаря соударениям с другими частицами.

Величина этого поглощения, таким образом, связывается с частотой, с которой происходят соударения внутри ядра. Если такие соударения часты, так что частица успевает пройти лишь незначительную часть ядерного диаметра до того, как она испытает соударение, гигантские резонансы, соответствующие орбитам отдельной частицы, делаются слабыми и более расплывчатыми. Из того факта, что гигантские резонансы оказываются хорошо выраженными и отчетливыми, следует, что у частиц есть

достаточная возможность завершить по крайней мере один полный оборот на своей орбите. В этом отношении мы обнаруживаем, что крайняя форма модели жидкой капли Бора (наша примитивная модель с мячами) явно преувеличивала реальное положение дел. Однако, нам удалось сочетать боровское объяснение большого количества острых резонансов на основе рассмотрения системы, как системы многих тел, со структурой, полученной наложением гигантских резонансов, характеризующей ранние стадии процесса.

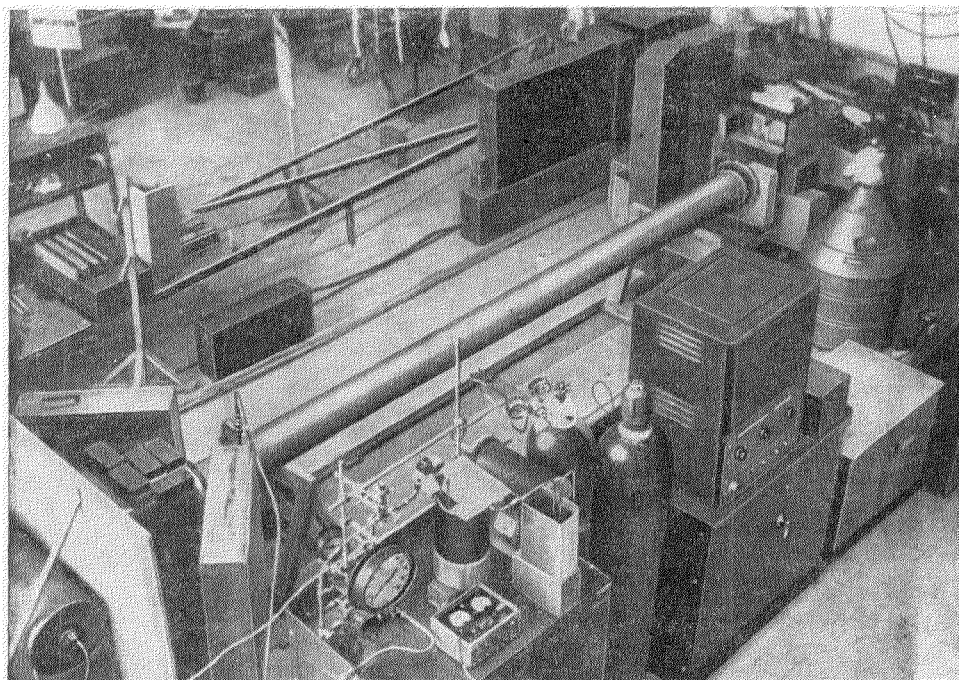


Рис. 9. Бомбардировка ядер кислорода нейтронами на установке Брукхейвенской Национальной лаборатории. Нейтроны получены на Брукхейвенском ядерном реакторе, бетонная защита которого видна в правой части рисунка. Кислородные атомы находятся в вытянутом баке, находящемся в центральной части снимка. Непоглощенные нейтроны регистрируются в маленьком бачке, расположенном внизу слева.

Остается разъяснить количественные особенности оптической модели и в частности то, что частица может длительное время находиться на своей орбите до того, как она будет отброшена с этой орбиты в результате близкого соударения с другой частицей, используя для этого основные силы взаимодействия. Как раз в настоящее время производится многообещающая разработка этой проблемы. Среди работающих в этом направлении—сотрудник автора статьи Г. Броун. В частности, малая частота соударений, по-видимому, может быть связана опять-таки с действием принципа исключения. Мы видели, что этот принцип резко снижает число соударений в единицу времени в нормальном ядре. В задаче о соударении частицы с ядром, где имеется значительно больший запас энергии, столкновения происходят более часто, так как в этом случае имеется большее число доступных орбит, которые еще не заняты, но запрет все же достаточно эффективен и число соударений в секунду значительно меньше, чем это соответствует картине, где рассматривались мячи,

потому что в последнем случае все чисто квантовые эффекты, в том числе и принцип исключения, не оказывают никакого влияния.

В итоге возникает картина, когда совершенно различные и на первый взгляд противоречивые модели ядра оказываются вполне согласующимися между собой частями единого целого, каждая из которых дает правильный ответ касающийся определенной стороны поведения ядра. Есть и такие вопросы в которых необходимо привлечение других моделей ядра, в том числе очень важной «коллективной модели», предложенной Оге Бором и Моттельсоном, но описание этих моделей и их места в развитии теории ядра уже выходит за рамки этой статьи.
