

ИЗ ИСТОРИИ ФИЗИКИ

539.143.45(09)

МОДЕЛЬ СОСТАВНОГО ЯДРА Н. БОРА И НАРУШЕНИЕ ЧЕТНОСТИ**И. М. Франк*

В июне 1937 г. профессор Бор читал лекцию в Москве в Институте физических проблем АН СССР. В числе слушателей был и я. Он говорил о следствиях своей работы, опубликованной в 1936 г. Таким образом, я начну с рассказа о событиях пятидесятилетней давности. В то время уже были выполнены первые исследования взаимодействия нейтронов с ядрами, которые привели к непонятным результатам. Бор в своей лекции объяснил их. Было известно, что медленные нейтроны очень легко проникают в атомные ядра. Казалось, должно быть и обратное — так же легко, как входить в ядра, они должны и выходить из них. Этого, однако, не происходит, попавший в ядро медленный нейтрон, как правило, остается в нем, а вместо него в большинстве случаев испускаются гамма-лучи. В объяснении Бора все было для меня неожиданным. Не было сложных теоретических рассуждений и не было никаких формул. Была простая модель, скорее, похожая на игрушку, которую Бор показывал с явным удовольствием. На стол была поставлена деревянная неглубокая тарелка, в которую он положил стальные шарики. Тарелка изображала ядро, а шарики — содержащиеся в нем протоны и нейтроны. По наклонно поставленному деревянному желобу в тарелочку скатывался еще один шарик — в ядро влетал нейтрон.

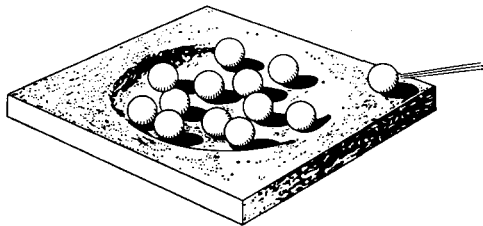


Рис. 1

К сожалению, у меня нет фотографии этой модели, а на рис. 1, заимствованном из статьи Бора 1937 г., она показана несколько иначе, хотя сказанное вполне иллюстрирует¹. Если бы других шариков в углублении не было, то вкатившийся в него шарик свободно перекатился бы через противоположный край. Нейтрон, вошедший в ядро, свободно из него бы и выходил. Иное положение, когда в тарелке имеются другие шарики. Скатившись в углубление, он ударяется о какой-то шарик, затем о другой. Шарики, сталкиваясь между собой, приходят в движение, но, как правило, у каждого из них недостаточно кинетической энергии, чтобы перекатиться через край углубления. Нейтрон, свободно вошедший в ядро, не может выйти, так как он отдал свою энергию многим частицам. Это, конечно, только иллюстрация, но за ней стоит прекрасная теория, так называемая модель составного ядра, развитая Бором.

*) Лекция, прочитанная 3 июля 1985 г. в Ливдау (ФРГ) на 35-м Совещании нобелевских лауреатов (12-я встреча физиков). Текст для печати несколько переработан.

Теория составного ядра лежит в основе наших представлений о большой части ядерных реакций. Конечно, в ней Бор вовсе не отказывается от квантовых представлений, и он сразу же указал на очень важные их следствия. Поскольку в ядре возникает очень сложное движение многих частиц, то должно быть много квантовых состояний, так называемых резонансов, возбуждаемых нейтронами. Чем больше возбуждение ядра, тем гуще расположены эти энергетические состояния. При попадании в ядро медленного

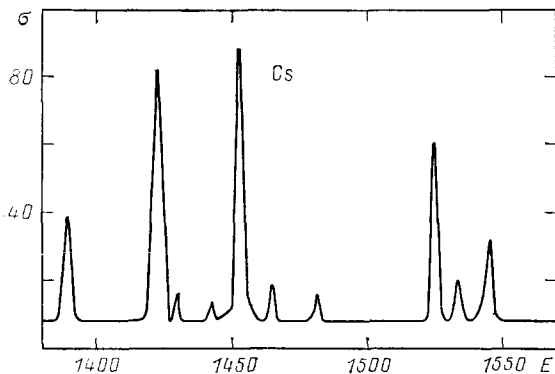


Рис. 2 (E — в эВ)

нейтрона выделяется энергия связи, достигающая 6—8 миллионов электронвольт. Ее достаточно, как показал Бор, для того, чтобы резонансы мало отличались по энергии, и это объяснило еще одну экспериментально установленную особенность — селективное поглощение нейтронов. На рис. 2 показан пример нейтронного спектра для одного из ядер. Видно, что резонансы узкие, и это также одно из следствий теории Бора. Разумеется, в 1937 г. получение такого спектра было еще невозможно.

Развитие экспериментальной техники продолжается и до сих пор. Я буду говорить об использовании современных ее возможностей для изучения очень слабых резонансов с помощью поляризованных нейтронов.

Следствием квантовой теории является и то, что каждому из резонансов присущи определенные характеристики: спин и четность (положительная или отрицательная).

При этом должны выполняться определенные правила, связывающие спин и четность ядра, поглощающего нейтроны, с квантовыми характеристиками резонанса. Для дальнейшего существенно только, что медленный нейтрон, как правило, возбуждает в ядре состояния с такой же четностью, как у исходного ядра. Это следствие того, что возбуждение ядра связано с s -волновыми нейтронами. Однако, с очень малой вероятностью, медленный нейтрон возбуждает и резонансы, четность которых отлична от той, которую имело ядро первоначально. Эти резонансы проявляются очень слабо, поглощение в них медленных нейтронов незначительно. Здесь играют роль p -волновые нейтроны, вклад которых в поток медленных нейтронов незначителен. Не рассматривая подробнее квантовые характеристики нейтронных волн, отметим только, что возбуждаются резонансы разной четности, одни сильнее, другие слабее. Возникает вопрос, который мы хотим рассмотреть, является ли четность в этих состояниях ядра вполне определенной, или возможны случаи, в которых в какой-то мере присутствует одновременно и положительная, и отрицательная четность. Если это возможно, то это означало бы то, что называют нарушением пространственной четности. Что это значит? Чтобы ответить на этот вопрос, видимо, нет необходимости обсуждать свойства симметрии волновой функции, определяющие четность. Поясним его на примерах. Допустим, что мы смотрим на циферблат часов. Мы не только видим, но и знаем, в какую сторону вращается секундная стрелка. Так же вращаются минутная и часовая стрелки, хотя их движение настолько медленно, что глаз этого сразу не улавливает. Если же мы взглянем на отражение циферблата часов в зеркале, то увидим удивительную вещь: секундная стрелка вращается не в привычную сторону, а в противоположную (рис. 3). То же происходит и с минутной, и с часовой.

Вместе с тем часы, у которых стрелки вращаются так, как мы видим это в зеркале, т. е. в противоположную сторону, должны быть ничем не хуже обычных, хотя пользоваться ими было бы и непривычно, и крайне неудобно. Действительно, совершенно очевидно, что механизм работы часов не может зависеть от того, в какую сторону происходит в нем вращение. Если бы здесь проявились различия, то это означало бы нарушение четности. Однако в процессах механики четность сохраняется. Возникает, конечно, вопрос: а почему мы отличаем вращение по часовой стрелке от вращения в противоположную сторону? В чем причина того, что для нас они не одинаковы? Разумеется, это способность биологически очень существенно, так как без нее ориентироваться во внешнем мире было бы значительно труднее. Чем же она обусловлена? Быть может, в каких-то процессах нашего восприятия отсутствует сохранение четности? Но причина, видимо, в другом. В живом

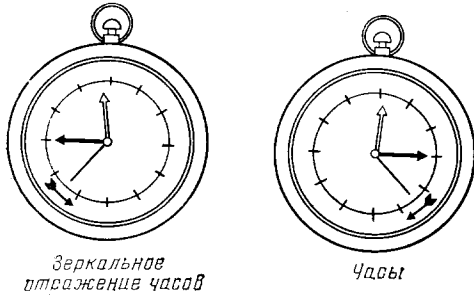


Рис. 3

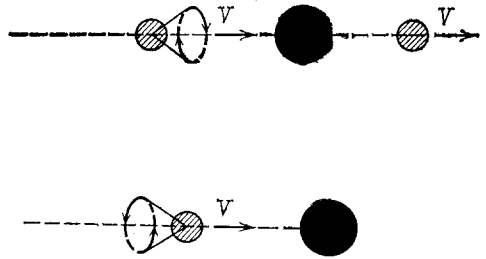


Рис. 4

организме многое асимметрично, и он не тождествен со своим зеркальным изображением. Поэтому нет оснований удивляться тому, что два направления вращения для него не представляются одинаковыми.

В ряде явлений природы мы встречаемся с тем или иным направлением вращения. Так, например, многие молекулы имеют структуру, обладающую определенной асимметрией. Это обнаруживается в том числе и в оптических явлениях. При прохождении поляризованного света через вещество, содержащее такие молекулы, плоскость поляризации поворачивается определенным образом. Мы говорим, что есть право- и левовращающие свет молекулы. По какой-то причине белки, из которых построено живое вещество, — это всегда левовращающие свет молекулы. Таким образом, уже в самой основе строения живых организмов содержится существенный элемент асимметрии. Лево- и правовращающие свет молекулы одного и того же вещества являются зеркальным изображением друг друга, а в остальном они эквивалентны. Если бы оказалось, например, что один вид молекул поглощает поляризованный свет сильнее, чем другой, это означало бы нарушение четности. Этого не наблюдается.

Возникает вопрос, может ли наблюдаться нечто подобное при взаимодействии нейтронов с ядром. Вопрос этот не праздный. Дело в том, что нейтрон обладает собственным моментом количества движения — спином. Говоря классическим языком, он находится в состоянии вращения. Таким образом, если ядро бомбардируют поляризованные нейтроны, у которых спин ориентирован по скорости или в противоположном направлении, то ядро будет «видеть» их вращающимся либо по часовой стрелке, либо против нее, как это показано на рис. 4. Принято говорить, что это соответствует двум разным знакам спиральности нейтрона. Может ли быть так, что вероятность захвата нейтрона ядром зависит от его спиральности? На рис. 4 сверху изображен случай, когда нейтрон проходит сквозь ядро, а внизу — когда он в нем поглощается. Может ли наблюдаться подобного рода различие в величинах вероятности поглощения? Теория отвечает на этот вопрос, казалось бы, отрицательно. В самом деле, взаимодействие нейтрона с ядром принадлежит

к типу сильных взаимодействий, в которых четность должна сохраняться. Поэтому если в самом ядре нет выделенного направления вращения, т. е. если спин ядра ориентирован произвольно, то ему все равно, в какую сторону вращается нейтрон. При этом все же имеется одна, казалась бы, несущественная особенность, которой, на первый взгляд, можно пренебречь. Кроме сильных взаимодействий в природе имеются и слабые, в которых пространственная четность не сохраняется. Примером слабых взаимодействий являются неэлектромагнитные взаимодействия электрона с ядром.

Слабые взаимодействия должны иметь место и при наличии сильных, но их величина примерно в десять миллионов раз меньше. Поэтому закон сохранения пространственной четности, свойственный сильным взаимодействиям нейтрона с ядром, должен выполняться с очень высокой точностью. Эффекты нарушения четности, если ожидать их пропорциональными вкладу слабых взаимодействий, должны быть меньше миллионной доли от измеряемых величин. Это представляется практически необнаружимым в эксперименте. Однако в физике с такого рода утверждениями следует быть очень осторожным. То, чем можно пренебречь в одних условиях, неожиданным образом может оказаться существенным в других. Так произошло и в случае поглощения поляризованных нейтронов ядрами, особенно резонансных нейтронов. Как уже отмечалось, основные резонансы, возбуждаемые медлен-

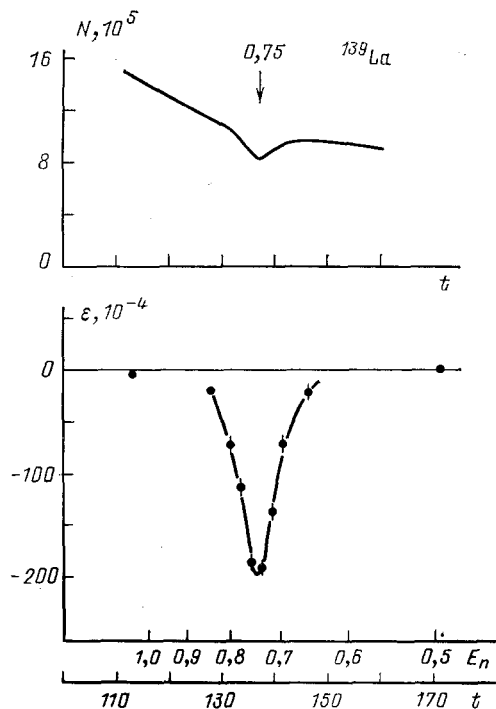


Рис. 5 (E_n — в эВ)

ными нейтронами в данном ядре, имеют одинаковую, вполне определенную четность. Так, у ядра лантана-139, который мы будем рассматривать, она положительна. Однако при тщательном анализе спектров поглощения нейтронов обнаруживаются очень слабо проявляющиеся резонансы противоположной, т. е. в рассматриваемом случае отрицательной четности. Оба вида резонансов в отдельности должны были бы иметь вполне определенную четность. Но в нейтронном спектре они соседствуют, и это приводит к дополнительным особенностям. Именно слабые взаимодействия являются своеобразным катализатором, приводящим к частичному смешиванию свойств резонансов различной четности. Это проявляется, как показывает теория, особенно значительно в р-волновых резонансах, имеющих четность, противоположную основным. Эффект несохранения четности может, как оказалось, усиливаться при этом до миллиона раз и становится значительным. Это приводит, в частности, к тому, что в опыте, рассмотренном на рис. 4, в самом деле наблюдается различное поглощение нейтронов, поляризованных по скорости и против нее. Особенно значительный эффект обнаружен именно у лантана-139. У него имеется очень слабый резонанс отрицательной четности, соответствующий энергии нейтрона 0,75 эВ. На рис. 5 показан участок спектра поглощения нейтронов вблизи этой энергии. Даже в толстом поглотителе из лантана этот резонанс проявляется как небольшое углубление в спектре проходящих через лантан нейтронов (см. верхнюю часть рисунка).

В нижней части рис. 5 приведена относительная величина разности интенсивностей пучка нейтронов после прохождения через образец для двух его поляризацій. В резонансе различие поглощения отчетливо проявляется, и разность эффективных сечений достигает 7 %. Вне резонанса она практически равна нулю. Таким образом, ядро в самом деле различает знак спиральности, т. е. эффект несохранения четности отчетливо проявляется. Эти результаты для лантана были получены недавно моими коллегами в Дубне *). Столь значительные проявления эффекта несохранения наблюдались впервые. Аналогичные эффекты, хотя и несколько меньшие, чем у лантана, удалось обнаружить еще у нескольких ядер. Эксперименты, о которых здесь рассказано, просты по идее и, казалось бы, легко осуществимы. На самом деле это не так. Сложной задачей является получение поляризованных резонансных нейтронов. Резонансы, возбуждаемые р-волновыми нейтронами, как правило, не известны и почти не исследованы. Интенсивность их очень мала, и поэтому для того, чтобы измерить поглощение в них нейтронов, необходима технически очень совершенная аппаратура и, конечно, большое умение экспериментаторов.

Исследования несохранения четности при взаимодействии нейтронов с ядрами имеют длительную историю *). Впервые они были открыты в экспериментах, выполненных примерно 20 лет назад в Москве в ИГЭФ. Очень важным явилось понимание того, что проявления несохранения четности могут быть во много раз большими, чем относительная величина вклада слабых взаимодействий. Это оказалось правильным и позволило их обнаружить. Все же наблюдаемые эффекты были очень малы, всего 10^{-4} от измеряемых величин. Теоретические и экспериментальные работы в этом направлении продолжались разными методами в разных местах: в Москве, Гренобле, Дубне, Гатчине под Ленинградом, в Новосибирске. В конечном итоге они привели к пониманию условий, в которых эффект несохранения четности во взаимодействиях нейтронов с ядрами должен проявиться особенно отчетливо, и к экспериментам, о результатах которых я рассказал.

Я начал свою лекцию с рассказа о простой модели, иллюстрирующей теорию составного ядра Бора. Эффекты несохранения четности, которые здесь рассмотрены, как мы видели, также связаны с составным ядром и являются следствием и развитием модели, предложенной Бором.

Объединенный институт ядерных исследований,
Дубна (Московская обл.)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бор Н. Превращения атомных ядер. // Избранные научные труды. — М.: Наука, 1971. — Т. II. С. 239; то же: // УФН. 1937. Т. 18. С. 333.
2. Алфименков В. П. // УФН. 1984. Т. 144. С. 331.

*) См. обзор В. П. Алфименкова ².