

## УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

Физ 101

## ЗАМЕЧАНИЯ К ТЕОРИИ АТОМНОГО ЯДРА \*

В. Гейзенберг, Лейпциг

Обилие экспериментального материала, собираемого об атомных ядрах, выявляет все более ясную картину законов, определяющих их строение. Поэтому мы попытаемся ниже дать краткое сопоставление современных теоретических взглядов на строение атомного ядра, частично уже давно известных.

С этой целью мы произведем сравнение эмпирических данных об оболочке атома с соответствующими данными о ядре и будем искать своего рода аналогии, в духе принципа соответствия между уже известными законами атомной оболочки и еще неизвестными законами ядра. Теория Резерфорда-Бора утверждает, что атом состоит из ядра и электронов. Это положение подтверждается тем экспериментальным фактом, что в опытах с соударениями атом может быть разложен на составные части — ядро и электроны. В то же время световые кванты не рассматриваются как составные элементы атома, несмотря на то, что они могут быть излучены атомом и что в виде максвелловского поля, соединяющего электроны с ядром, они составляют значительную часть общей энергии атома. Для оправдания такого способа выражения можно указать, что, вообще говоря, при опытах с соударениями никакие световые кванты не покидают атома. Вернее, световые кванты, которые играют некоторую роль при опытах с соударениями, излучаются атомом обычно через долгое время после самого процесса удара, уже по истечении нормальной продолжительности жизни возбужденных состояний. Их возникновение не связано непосредственно с процессом удара. Поэтому целесообразнее говорить, что световые кванты создаются атомом при переходе из одного стационарного состояния в другое, в самом же атоме они не существуют в качестве индивидуумов, существует только сопряженное с ними поле — максвелловское поле ядра и электронов. Это довольно строгое разделение частиц на те, из которых состоит атом, и те, которые им создаются, облегчается малостью сил излучения по сравнению с кулоновскими силами, важность чего была подчеркнута Бором.

\* Verhandelingen op 25 Mai 1935 aangeboden aan Prof. Dr. P. Seeman. M. Nijhoff. Hague. (Из сборника статей к 70-летию П. Зеемана). Перев. Б. Левина.

Малая величина этих сил является в свою очередь следствием малости скоростей электронов в атоме по сравнению со скоростью света, т. е. в конце концов малости величины  $\frac{e^2}{hc}$ .

Если попытаться описать подобным же образом структуру атомного ядра, то на основании опытов с соударениями в этом случае — опытов по превращению атомов — в качестве составных частей ядра придется рассматривать только тяжелые частицы — протоны, нейтроны и возможно  $\alpha$ -частицы. Ибо только эти частицы появляются после соударения в качестве непосредственных осколков ядра. Легкие частицы — электроны, позитроны и световые кванты — согласно опытам над искусственной радиоактивностью и над продолжительностью жизни возбужденных состояний ядра излучаются обычно только через долгое время после превращения. Таким образом их возникновение не связано непосредственно с процессом разрушения ядра. Поэтому целесообразно говорить о возникновении электронов при переходе ядра из одного стационарного состояния в другое. Что такой способ описания является разумным, убедительно доказываются опытами Жолио и Кюри, согласно которым позитроны также могут быть радиоактивно излучаемы, а ведь, конечно, невозможно одновременно считать составными частями ядра и положительные и отрицательные электроны.

Точно так же, как возникновение световых квантов зависит от максвелловского поля, которое обеспечивает устойчивость атомной оболочки, так и возможность возникновения легких заряженных частиц из ядра должно быть связано с существованием волнового поля, которое в этом случае должно быть существенным для устойчивости атомного ядра. Это как раз совпадает с результатами исследований Ферми<sup>1</sup> по теории  $\beta$ -распада и развивающих их исследований Тамма<sup>2</sup> и Иваненко,<sup>3</sup> о которых еще будет говориться ниже. У ядер, так же как и у оболочек, различие между частицами, входящими в состав ядра, и частицами, которые создаются при переходах, облегчается малостью „сил  $\beta$ -излучения“ по сравнению с силами взаимодействия в ядре. Последнее обстоятельство проявляется в величине естественной продолжительности жизни  $\beta$ -активных ядер. Такое положение вещей зависит, как это можно установить, например, на основании теории  $\beta$ -распада Ферми, опять-таки от того, что энергии переходов ядра, равные кинетическим энергиям испускаемых частиц, малы по сравнению с энергией покоя составных частей ядра, т. е. от того, что скорости протонов и нейтронов ядра малы по сравнению со скоростью света.

Рассматриваемая аналогия между поведением атомной оболочки и поведением атомного ядра, может быть в целом представлена следующей схемой (см. стр. 3).

Вместе с электронами и позитронами здесь упомянуты также и нейтрино Паули. Как известно, их существование на основании непрерывных  $\beta$ -спектров и эмпирических правил по статистике и спину ядер является весьма вероятным. Точно так же соотноше-

	Оболочка атома	Атомное ядро	
Элементарные составные части	Ядро, электроны	Протоны, нейтроны	
Частицы, испускаемые при переходах	Световые кванты	Электроны позитроны нейтрино	Световые кванты
Соответствующее им поле	Максвелловское поле	Поле Ферми	Максвелловское поле
Первое приближение для сил взаимодействия	Кулоновы силы	Силы обмена	Кулоновы силы

ние между продолжительностью жизни  $\beta$  активных ядер и продолжительностью жизни возбужденных состояний при эмиссии  $\gamma$ -лучей указывает на то, что при  $\beta$ -излучении ядро одновременно покидают две частицы.

Если желательно составить представление о характере взаимодействий, ведущих к излучению электронов и нейтрино, то в духе изложенной выше аналогии следует представить себе энергию взаимодействия зависящей от произведения волновых функций тяжелых частиц и соответствующих легких частиц в одном и том же месте пространства. Ибо подобно тому как световые кванты и электроны могут вступать во взаимодействие только в одном и том же месте пространства — ведь максвелловская теория есть теория „близодействия“, — так и легкие заряженные элементарные частицы и тяжелые составные части ядра могут влиять друг на друга, отвлекаясь от действия их максвелловских полей, только в одном и том же месте. И действительно, это предположение Ферми положил в основание своей теории  $\beta$ -распада. При этом оказывается, что предположение об одновременном испускании одного электрона и одного нейтрино является необходимой предпосылкой для математической формулировки теории  $\beta$ -распада. Энергия взаимодействия представляется объемным интегралом от произведения четырех волновых функций, которые всегда принадлежат протону, нейтрону, электрону и нейтрино. Волновая функция нейтрино необходима при этом для того, чтобы получилось выражение, которое ведет себя релятивистки, как плотность энергии.

Ферми предположил, кроме того, что в выражение для энергии взаимодействия входят только волновые функции, а не их производные. Однако это предположение, как было указано Бэте и Пайерльсом,\* повидимому, является слишком специальным.

\* Результаты Бэте и Пайерльса были доложены Бэте в сентябре 1934 г. на конференции в Копенгагене. См. также Отчеты конгресса в Лондоне, осень 1934 г.

Если энергия взаимодействия известна, то этим самым определены не только законы  $\beta$ -распада. Аналогично тому как максвелловскими уравнениями определяются все электрические силовые взаимодействия между материальными частицами, так и энергия взаимодействия между тяжелыми составными частями ядра и легкими элементарными частицами определяет все силы взаимодействия между тяжелыми частицами, которые связаны с полем электронов и нейтрино. Приближенно, если можно отвлечься от обратного действия излучения, т. е. тогда, когда электроны движутся медленно по сравнению со скоростью света, действие максвелловского поля может быть заменено дальнедействующей силой, а именно кулоновской силой. Подобным же образом в случае, если движение тяжелых частиц совершается медленно по сравнению со скоростью света, взаимодействие по Ферми приводит к дальнедействующей силе между нейтронами и протонами, как это было независимо показано Ферми,<sup>\*</sup> Таммом и Иваненко (1. с.). Возникающие таким образом силы являются по своему характеру обменными силами. Итак, теория Ферми допускает в принципе математическое выражение той мысли, что из возможности  $\beta$ -распада следует существование обменных сил<sup>5</sup>. Зависимость этих сил от расстояния между тяжелыми частицами и от их спиновых координат зависит, конечно, от точной формы выражения энергии взаимодействия по Ферми и поэтому пока что не может быть определена окончательно. Тамм и Иваненко показали, что если принять форму энергии взаимодействия, специально выбранную Ферми, то силы обмена оказываются слишком малыми для того, чтобы объяснить строение ядра. Однако эта трудность может быть устранена, если в выражение для энергии взаимодействия ввести производные волновых функций электрона и нейтрино, как это было предложено Бэте и Пайерльсом. Вследствие этой неопределенности в выражении для энергии взаимодействия невозможно еще решить, имеют ли обменные силы вид, предложенный Майорана,<sup>6</sup> или же вид, предложенный ранее автором. Эмпирические данные о дефектах массы говорят скорее в пользу майорановской формы взаимодействия.

Важнейшей задачей теории строения ядра на ближайшее время будет определение точного выражения энергии взаимодействия по Ферми между тяжелыми и легкими частицами путем сравнения всех эмпирических данных — о виде непрерывного спектра  $\beta$ -лучей, о дефектах массы и т. п.

Правда, даже когда это взаимодействие известно, в наших знаниях о строении ядра остается еще один пробел, который не имеет никаких аналогий в теории оболочки атома. Вследствие кулоновской формы взаимодействия на строение оболочки атома совершенно несущественно влияют небольшие отклонения от закона Кулона, которые возникают при очень малых расстояниях между частицами. Напротив, обменные силы в теории ядра зависят от гораздо более высокой степени расстояния между частицами, чем

---

<sup>\*</sup> Считаю своим долгом поблагодарить Ферми за любезное сообщение своих соображений. См. также Викк<sup>4</sup>.

силы Кулоновы (если принять выражение взаимодействия по Ферми, то согласно Тамму и Иваненко — пропорционально  $r^{-5}$ ; если производные волновых функций входят в энергию взаимодействия, то возможно — пропорционально  $r^{-7}$  или  $r^{-9}$ ); так что именно отклонения от этого простого силового закона при малых расстояниях между частицами представляют первостепенную важность для строения ядра. Определение этих отклонений тесно связано с проблемой бесконечной собственной энергии, которая получается из поля Ферми для тяжелой частицы совершенно таким же образом, как это получается из максвелловского поля для заряженной частицы. Однако для решения этого вопроса до сих пор не предложено никакого метода.

Можно избежать этой трудности вводя, чисто формально, соответственно подобранные радиусы протонов или нейтронов; однако правильность подобной операции остается сомнительной. Тогда взаимодействие, приводящее к образованию электронов и нейтрино, согласно исследованиям Вика<sup>7</sup> имеет еще одно важное следствие: оно приводит к некоторому добавку к магнитному моменту протона и к магнитному моменту нейтрона.

Возникает вопрос, как далеко может быть продолжена аналогия между магнитными моментами этих тяжелых частиц и магнитными моментами электронов в оболочке атома. Для полного описания аналогии между атомной оболочкой и ядром особенно важно установить, в какой мере магнитные моменты тяжелых частиц ядра могут быть при помощи векторной модели объединены в магнитный момент всего ядра. Результаты Вика базируются на соображениях, аналогичных соображениям Тамма и Иваненко. Мы их здесь кратко повторим.

Если провести расчет возмущений, с энергией взаимодействия между легкими и тяжелыми частицами по Ферми в качестве возмущения, и вычислить магнитный момент протона или нейтрона, то возникают дополнительные члены, соответствующие второму приближению. По форме они в точности равны собственной энергии этих частиц и соответствуют возможному возникновению и уничтожению пары позитрон—нейтрино у протона, или электрон—нейтрино у нейтрона. Эти дополнительные моменты были бы бесконечно велики, если бы не вводился конечный радиус тяжелых частиц, как это делается и в случае собственных энергий. Если подобрать этот радиус так, чтобы собственная энергия оказалась порядком релятивистской энергии покоя, то получается наибольший добавок к магнитным моментам пар электрон—нейтрино и позитрон—нейтрино, энергия которого в сто—тысячу раз больше энергии покоя электрона. Точное значение опять-таки зависит от точной формы взаимодействия по Ферми. Если выбрать для этого взаимодействия форму, дающую правильный порядок величин для обменных сил, то дополнительные магнитные моменты получаются порядка ядерного магнетона.

Тем не менее для нейтрона этот магнитный момент мог бы быть скомпенсирован до нуля, если бы нейтрон мог переходить не

только путем испускания электрона и нейтрино в протон, но и путем испускания позитрона и нейтрино в гипотетический отрицательный протон. Эмпирические результаты<sup>8</sup> для магнитных моментов  ${}^1_1\text{H}$  и  ${}^2_1\text{D}$  как будто говорят против подобной возможности. Повидимому, нейтрон обладает магнитным моментом.

Если принять, что существует только первый из названных процессов испускания, то вследствие знака зарядов могущих возникнуть частиц дополнительные моменты протона и нейтрона должны быть равны и противоположны. Небольшое отклонение от этого равенства получается только, если учесть разницу масс протона и нейтрона. Относительная величина этого отклонения дается отношением разности масс (в энергетическом выражении) к увеличенной в сто или тысячу раз энергии покоя электрона. Отклонение должно составлять всего несколько процентов, и оказывается, что магнитный момент нейтрона должен быть по абсолютной величине несколько больше, если масса нейтрона больше массы протона, как это следует принять по Чадвику. Этот дополнительный момент должен быть прибавлен к обычному магнитному моменту протона, который по теории Дирака соответствует спину в  $\frac{1}{2} \hbar$ .

Магнитные моменты нейтрона и протона должны с достаточной точностью векторно складываться в магнитный момент всего ядра так же как это происходит у оболочки атома. Ибо, как указывалось выше, главный добавок к магнитным моментам происходит от тех орбит виртуальной пары электрон—нейтрино, энергия которых в сто—тысячу раз больше энергии покоя электрона. Присутствие по соседству других тяжелых частиц лишь немного возмущает эти орбиты. Относительная величина отклонений от строгой аддитивности магнитных моментов приближенно дается отношением кулоновских взаимодействий и взаимных энергий к сто—тысячкратной величине энергии покоя электрона. Таким образом оказывается возможным вычислить магнитные моменты ядер с ошибкой в несколько процентов путем векторного суммирования орбитальных моментов и моментов спина. Подобные попытки содержатся в работах Ланде<sup>9</sup>, Шюлера и Кальмана<sup>10</sup>, Тамма и Альтшулера<sup>11</sup> и Инглиса<sup>12</sup>. Однако следует иметь в виду, что векторная модель для атомных ядер вследствие отсутствия центральной силы может быть значительно сложнее, чем для оболочки атома. Поэтому от заключений, сделанных в названных выше работах, нельзя требовать такой же степени точности, как при определении конфигураций электронов на основании Зееман-эффекта.

Возвращаясь снова к описанной выше аналогии между атомным ядром и атомной оболочкой, следует сказать, что соображения о магнитных моментах хорошо дополняют картину строения ядра из протонов и нейтронов, которая может быть с успехом описана при помощи законов квантовой механики. Это описание является правильным лишь с той же степенью точности, с которой скорость тяжелых частиц может считаться очень малой по сравнению со

скоростью света. Согласно эмпирическим данным о размерах атомного ядра и о дефектах массы эта точность значительно ниже точности аналогичных расчетов для оболочки атома. Однако, если приведенные выше соображения о магнитных моментах правильны, можно, как и в оболочке атома, сделать еще один шаг вперед в смысле точности и приблизительно учесть релятивистские эффекты, в особенности спин. Благодаря богатому экспериментальному материалу, который Зееман-эффект привнес к нашим знаниям энергетических уровней и квантовых чисел атомной оболочки, оказалось возможным дать точное теоретическое объяснение ее структуры. Повидимому, можно надеяться, что подобным же образом магнитные моменты ядер дадут нам в будущем точнейшие сведения о структуре атомного ядра.

## ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. E. Fermi, *Z. Physik*, **88**, 161, 1934.
2. I. Tamm, *Nature*, **133**, 981, 1934.
3. D. Iwanenko, *Nature*, **133**, 981, 1934.
4. C. Wick, *Rendic. R. Nat. Acad. Lincei*, **19**, 319, 1934.
5. W. Heisenberg, *Z. Physik* **77**, 1; 78, 156; **80**, 587, 1932.
6. E. Majorana, *Z. Physik*, **82**, 137, 1933.
7. C. Wick, *Rend. R. Nat. Acad. Lincei* (в печати).
8. J. Estermann, R. Frisch u. O. Stern, *Nature*, **132**, 169, 1933; J. Estermann u. O. Stern, *Nature*, **133**, 911, 1934; J. Rabi, J. Kelllog, J. Zacharias, *Phys. Rev.*, **46**, 157 u. 163, 1934; F. Kalckar u. E. Teller, *Nature*, **134**, 183, 1934.
9. A. Landé, *Phys. Rev.* **44**, 1028, 1933; D. Inglis, u. A. Landé *Phys. Rev.*, **45**, 842; **46**, 76, 1934.
10. H. Kallmann u. H. Schüler, *Z. Physik*, **88**, 210, 1934; H. Schüler, *Z. Physik*, **88**, 323, 1934.
11. И. Тамм и Альтшулер, Докл. Акад. наук СССР **1**, 455, 1934.
12. D. Inglis, *Phys. Rev.*, **47**, 84, 1935; G. Breit, *Phys. Rev.* **46**, 230, 1934.