

АТОМНЫЕ ЯДРА И ИХ ПРЕВРАЩЕНИЯ¹⁾.

Сэр Э. Резерфорд, Кембридж.

В 1911 г., когда мною была предложена ядерная теория строения атома, основанная на объяснении простого рассеяния α -частиц материей, было мало надежды на быстрый успех наших знаний о деталях строения ядра. Положение было таково, что во время дискуссии о строении атома, имевшей место в Королевском Обществе в 1913 г., на вопрос о строении ядра я должен был ответить, что рассмотрение этого вопроса лучше всего будет оставить для следующего поколения. Правда, за истекший с тех пор промежуток времени нам удалось добиться гораздо больших успехов, чем можно было ожидать, но вместе с тем нельзя не признать, что в разрешении этой основной и наиболее трудной проблемы физики сделано только начало. Представляется, однако, интересным дать краткий обзор наших успехов за последние годы и затем более или менее детально рассмотреть некоторые из наиболее обещающих путей к разрешению этой задачи.

Из первых опытов над рассеянием α -частиц оказалось, что пространство, занятое атомным ядром, мало в сравнении с пространством, занятым всем атомом. Следовательно, составные части заряженного ядра должны быть связаны в этом малом объеме такими огромными силами, что мы не могли надеяться оказать на ядро серьезное влияние при

¹⁾ Двенадцатая лекция в честь Гётри, читанная 25 февраля 1927 г., опубликована в Proceedings of the Physical Society of London 39 (Part 4), June 15, 1927, p. 359. Перев. Н. А. Шишakov.

помощи физических сил, которыми мы пользуемся в лаборатории. Об огромной величине сил, действующих в ядре тяжелого атома, можно судить по высокой кинетической энергии α - и β -частиц, которые освобождаются при радиоактивных превращениях. Позже работами Эллиса (Ellis), Мейтнер (Meitner) и других было определенно доказано, что большая часть γ -излучения происходит из ядра. Были измерены длины волн некоторых из этих γ -лучей и таким образом получены определенные указания относительно некоторых видов колебаний составных частей ядра. Квантовая энергия этих γ -лучей оказывается очень высокой: она соответствует в некоторых случаях по крайней мере 3 миллионам вольт.

Удивительный ряд превращений, происходящих в элементах уране, тории и актинии, с избытком снабжает нас данными относительно хода превращений в этих тяжелых элементах; но, к сожалению, наши теории строения ядра находятся сейчас в таком зачаточном состоянии, что мы можем лишь в малой степени использовать множество накопленных фактов. В дальнейшем я вернусь к этому вопросу; пока же достаточно будет отметить, что изучение этих превращений дало нам некоторые общие, чрезвычайно важные указания относительно ядра.

Так как ядра гелия (α -частицы) и быстрые электроны (β -частицы) выбрасываются ядром, то можно было бы заключить, что ядра тяжелых атомов должны в качестве своих составных частей содержать электроны и ядра гелия, если только исключить предположение, что ядро гелия образуется каким-нибудь путем из более простых составных частей в момент его выталкивания из главного ядра.

Изучение радиоактивных превращений дало нам наиболее убедительные доводы в пользу ядерной теории и привело к обнаружению чрезвычайно простого соотношения между изменением атомного номера в распадающемся элементе и природой превращения. Вылет α -частицы, заряд которой равен $2e$, уменьшает заряд ядра на две единицы, в то время как вылет электрона увеличивает заряд ядра на одну единицу. Это обобщение, известное под именем правила сдвига,

предложенного в общей форме Рёсселем (Russel), Фаансом и Содди, дает нам в одно и то же время заряд ядра и массу каждого элемента в радиоактивном ряду и, таким образом, определяет обыкновенные физические и химические свойства каждого из радиоактивных элементов, равно как и их атомные веса. Это соотношение является замечательным как по простоте, так и по общности, и, по моему мнению, представляет важнейшее и интереснейшее достижение в наших знаниях о ядре.

Я могу только мимоходом сослаться на тот огромный шаг вперед, который был сделан Мозели, указавшим, что заряд ядра элемента в основных единицах выражается его порядковым или атомным номером. Этот вывод непосредственно был подтвержден для целого ряда случаев Чадвиком (Chadwick) при помощи точного измерения рассеяния α -частиц.

Открытие в радиоактивном ряду элементов, которые известны теперь под именем изотопов и которые оказываются одинаковыми по химическим свойствам, но имеют разные массы и неодинаковые радиоактивные свойства, явилось существенным успехом в наших знаниях. Можно было видеть, что сходство в химическом поведении является определенным доказательством того, что изотопы имеют одинаковый заряд ядра и что различие в массе и в радиоактивности показывает, что ядра изотопов отличаются строением и устойчивостью. Различие в массе некоторых радиоактивных изотопов является весьма замечательным. В этих радиоактивных рядах имеется, например, 7 изотопов свинца, масса которых меняется в пределах от 214 до 206, а период полураспада для радиоактивных изотопов — от 27 минут до 16 лет. Конечные продукты — урановый свинец (206) и ториевый свинец (208) — являются устойчивыми.

Я могу только мимоходом сослаться на доказательство, данное Астоном, что многие обыкновенные элементы состоят из смеси изотопов. Одним из важнейших выводов из его работы является правило „целых чисел“: оказалось, что во многих случаях масса каждого изотопа является целым числом, если исходить из массы кислорода, принятой

равной 16. Это показывает, что предельная составная единица структуры ядра обладает массой, равной единице. Эта единица, называемая протоном, имеет несколько меньшую массу, чем водородное ядро, масса которого равна 1,0072; разницу относят на счет „эффекта уплотнения“, т. е. на счет взаимодействия электромагнитных полей в сильно сжатом ядре. Однако дальнейшие опыты показали, что в то время, как правило целых чисел во многих случаях с большой степенью точности оправдывается, в других — наблюдаются значительные отклонения. Справедливость „правила целых чисел“ вновь исследуется в настоящее время Астоном, который пользуется спектрографом гораздо большей разрешающей силы, так что мы можем скоро ожидать более точных сведений об относительной массе изотопов. Если окажется возможным получить эти константы с достаточной точностью, то, вероятно, они будут иметь большое значение для освещения многих вопросов строения ядра. Причины этого будут ясны из дальнейших рассуждений в этой статье.

Мы видели, что радиоактивные явления указывают на то, что ядра гелия и электроны являются составными частями ядер тяжелых атомов; однако, несмотря на фундаментальный характер радиоактивных превращений, протон ни в одном случае не освобождается из ядра. Вся совокупность известных нам фактов весьма сильно подкрепляет представление о том, что электроны и протоны являются основными единицами в структуре ядра; непосредственное доказательство правильности этого представления было дано опытами Резерфорда и Чадвика, Петерсона и Кирша с искусственным разложением легких элементов α -частицами. Для двенадцати элементов было получено определенное доказательство, что протоны выбрасываются с большой скоростью, когда вещество подвергается бомбардировке быстрыми α -частицами. За исключением углерода и кислорода, для которых экспериментальные результаты являются спорными, все элементы от бора до калия включительно при бомбардировке освобождают протоны.

В большинстве этих опытов применялся метод сцинтилляций там, где известные наблюдения могли быть сделаны

только над выбрасыванием частиц, имеющих больший пробег, чем α -частицы, ибо число последних обычно значительно превышает число выбрасываемых протонов. Вообще говоря, протоны излучаются почти одинаково по всем направлениям относительно бомбардирующего пучка α -частиц, но скорость протонов оказывается большей по направлению луча, чем в обратном направлении, что, вероятно, обусловлено движением бомбардируемого ядра.

К несчастью, разложение, вызванное даже наиболее быстрыми α -частицами, оказывается очень малым, — один протон освобождается примерно на 100 000 бомбардирующих α -частиц. Экспериментальное изучение этого искусственного разложения элементов, хотя и является принципиально очень простым, на практике сопряжено со многими трудностями, так что для получения количественных результатов требуется большой навык в этих наблюдениях.

РАЗМЕРЫ ЯДРА И ЗАКОН СИЛЫ.

Мы видели, что изучение рассеяния α -частиц впервые повело к открытию ядерной теории атома и что даже теперь это рассеяние является единственным надежным методом, при помощи которого могут быть исследованы законы сил вокруг ядра и получены некоторые представления о его размерах. В классических экспериментах Гейера и Марсдена рассеяние α -частиц под различными углами оказалось в согласии с кулоновским законом сил для серебра и золота. Этот вопрос недавно было снова исследован Резерфордом и Чадвиком при помощи несколько измененного метода и привел к подобным же результатам. Даже для самых быстрых из применяемых α -частиц рассеяние их на угол до 135° для элементов меди, серебра и золота не показало заметного отступления от рассеяния, вычисленного по закону обратной пропорциональности квадрату расстояния. Для этих элементов наибольшее приближение α -частиц к ядру, при употреблении α -частиц радия С со скоростью $1,922 \cdot 10^9$ см/сек, оказалось: 1,23 (Cu), 1,94 (Ag) и $3,15 \cdot 10^{-12}$ см. (Au). Так как можно предположить, что в случае проникно-

вения α -частицы в самую нуклеарную систему кулоновский закон не должен оправдываться, то мы можем отсюда заключить, что радиусы заряженных ядер (если принять их сферическими) должны быть меньше, чем приведенные выше числа для меди, серебра и золота. Если нельзя будет использовать α -частицы с еще большими скоростями, то при помощи этого метода никоим образом нельзя будет установить минимальный предел для размеров ядра. Аналогичные эксперименты, сделанные с тонким слоем распыленного металлического урана, не показали определенного изменения закона сил при расстоянии $3 \cdot 10^{-12}$ см от центра ядра. Это наблюдение ведет к значительным осложнениям, ибо, как будет видно ниже, некоторые данные из области радиоактивности показывают, что ядро урана, или во всяком случае некоторые его составные части, может превышать это расстояние более, чем вдвое.

В случае легких атомов с малым нуклеарным зарядом, α -частица при тесном столкновении может приближаться к ядру гораздо более, и мы, таким образом, оказываемся в состоянии изучать закон сил при много меньших расстояниях. Опыты Резерфорда и обстоятельные исследования Чадвика и Билера уже с самого начала обнаружили, что кулоновский закон сил становится неприменимым, когда быстрые α -частицы сталкиваются с водородными ядрами. Изменение рассеяния с изменением угла, равно как и с изменением скорости α -частиц, оказываются почти противоположными тому, что можно ожидать на основании закона обратных квадратов. Для самых быстрых α -частиц, число Н-частиц, вырывающихся вперед внутри небольшого угла с направлением α -частиц, раз в сто превышает вычисленную величину.

Характер полученных результатов можно иллюстрировать следующим примером. Подсчитывалось число Н-частиц, летящих после столкновения в направлениях, составляющих с направлением полета α -частиц угол от 20° до 30° . Когда скорость α -частиц была мала, например соответствовала пробегу в воздухе около 2 см, число α -частиц, рассеянных в названном направлении, оказалось близким к тому, которое можно

было ожидать на основании кулоновского закона сил. С возрастанием скорости α -частиц, число наблюдаемых Н-частиц оказалось больше теоретического, причем несогласие очень быстро увеличивалось с возрастанием скорости α -частиц. Например, для α -частиц, имеющих пробег около 2,9 см, наблюдаемое число в три раза больше вычисленного, а для α -частиц с пробегом в 6,6 см это отношение возрастает почти до тридцати.

Это отступление от закона обратных квадратов было истолковано Чадвиком и Билером следующим образом. Если рассматривать Н-ядро как точечный заряд, то для ядра гелия (α -частицы) можно найти такую модель, которая даст общее объяснение для всех экспериментальных результатов. Из вычислений Дарвина оказалось, что при таких условиях α -частицы ведут себя как тела, обладающие промежуточными свойствами между свойствами заряженной электрической сферы и заряженной электрической пластинки, и в первом приближении могут быть рассматриваемы как эластические сплюснутые сфероиды с полуосями около $8 \cdot 10^{-13}$ см и $4 \cdot 10^{-13}$ см, движущиеся по направлению их малых осей. Н-ядро, выбрасываемое такой α -частицей, будет находиться в поле обыкновенных электростатических сил, пока не достигнет поверхности сфероида с названными выше размерами. Здесь оно встречается с очень сильным полем и испытывает отражение, как от твердого эластического тела. Однако, вследствие трудностей, возникающих при вычислении соударений с таким сфероидом, оказалось невозможным добиться более близких сравнений с этой моделью.

Рассматривая эту модель с физической точки зрения, мы можем сказать, что рассеяние будет нормальным для всех тех частиц, которые не достигают сфероидальной поверхности, и что, наоборот, частицы, пересекающие эту поверхность, встречают отклоняющее поле, в котором силы частиц будут возрастать гораздо быстрее, чем это следует по закону обратных квадратов, так что рассеяние будет аномальным.

Прежде, чем разбирать эту модель более подробно, рассмотрим сначала некоторые эксперименты, которые были

недавно поставлены Чадвиком и мною с целью изучения рассеяния α -частиц в гелии при помощи такого же метода. В этом случае участвующие в соударениях частицы являются одинаковыми как по заряду и массе, так и по структуре. Однако эти опыты являются связанными с одним затруднением, которое не возникает при исследовании соударений между α -частицами и Н-ядрами, когда выбрасываемые Н-частицы, благодаря их большому пробегу, во многих случаях могут быть наблюдаемы независимо от α -частиц. В случае соударения между двумя частицами, с равной массой, угол между рассеиваемой α -частицей и отбрасываемым ядром всегда равен 90° , так что в этом случае никак нельзя различить оба типа частиц. Положим, например, что мы наблюдаем частицы, которые отклоняются на угол φ от направления налетающих частиц. Они будут заключать в себе α -частицы, рассеянные на угол φ , и отбрасываемые ядра, которые возникают под действием α -частиц, рассеянным на угол $90^\circ - \varphi$, так что во многих случаях, где закон обратных квадратов становится более неприменимым, мы можем лишь грубо оценить относительную значительность обеих групп.

Взятое в целом, распределение рассеиваемых частиц при столкновениях между α -частицами и ядрами гелия по типу является очень похожим на то распределение, которое наблюдается для случая α -частиц и Н-ядер. В обоих случаях будет одинаковая концентрация рассеиваемых α -частиц по направлению вперед, причем это делается тем более заметным, чем быстрее α -частицы. В одном отношении эти опыты дали нам сведения, которые не легко могли быть получены из результатов исследования Н-ядер. Когда рассеиваемые частицы наблюдаются под углами в 40° и 50° с направлением падающих лучей, число рассеиваемых α -частиц и ядер гелия, приходящих в движение благодаря соударениям, оказывается равным по количеству и скорости. Кривая изменения количества α -частиц с энергией приведена на рис. 1, где ординаты представляют отношение наблюдаемого количества к вычисленному, а абсциссы — значения $\frac{1}{E}$, где E — энергия сталкивающихся α -частиц. Пунктирная линия

для ординаты 1 представляет то отношение, которое наблюдалось бы для закона обратных квадратов. Очевидно, что это отношение велико для быстрых α -частиц, затем быстро падает ниже единицы и снова возрастает до вычисленной величины. Гораздо более заметное падение ниже вычисленной величины наблюдается для α -частиц с пробегом около 3 см, когда рассеяние наблюдается между 10° и 20° .

Таким образом ясно, что для известного ряда скоростей α -частиц рассеяние между некоторыми углами будет больше

„нормальной“ величины, т. е. величины, вычисленной для точечных зарядов, или, иными словами, подчиняющейся закону обратных квадратов. Для другого ряда скоростей, рассеяние становится ни-

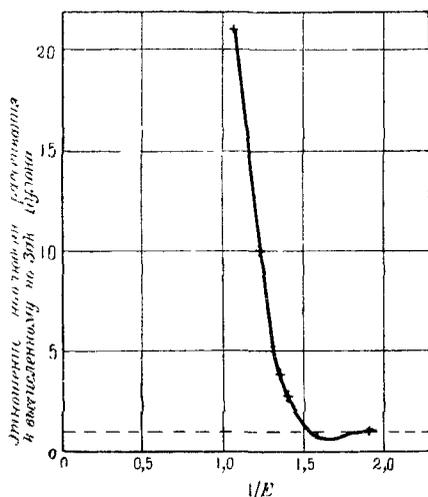


Рис. 1.

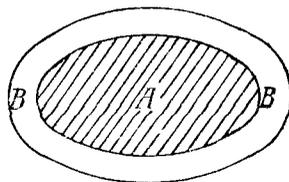


Рис. 2.

же нормального и с убыванием скорости α -частиц доходит, наконец, до нормального значения.

Эту недостаточность рассеивания между известными углами для α -частиц данной скорости можно ожидать для столкновений такого типа, где рассеяние является ненормально большим для других углов рассеяния. Так как это заключение имеет самый общий характер и совершенно не зависит при этом от наших познаний о силах, играющих роль при столкновении, то было бы желательно рассмотреть его более подробно.

На рис. 2 представлен центральный разрез воображаемой поверхности, которая представляет собой границу между

областями, где исходящие от ядра силы являются нормальными и аномальными. Каждая частица, которая не входит в эту область, претерпевает нормальное рассеяние, но частица, достаточно быстрая для того, чтобы проникнуть внутрь поверхности, отклоняется со своего пути благодаря какой-то неизвестной комбинации сил. Предположим для простоты, что α -частица летит нормально к сечению рис. 2. Это сечение, следовательно, представляет собой мишень, выставленную под удары α -частиц. Допустим для наглядности, что все частицы, попадающие на площадь A , претерпевают рассеяние в известном ряде углов и что число рассеиваемых таким образом α -частиц выше нормального. Так как число α -частиц, падающих на поверхность, определяется площадью мишени, причем каждая частица отклоняется в том или ином направлении, то избыток рассеянных частиц, зависящий от площади A , точно должен уравнивать недостаток числа частиц, рассеянных под другим рядом углов в области B . Это всегда должно быть справедливым для данной скорости α -частиц, если только последние не поглощаются ядром.

В известных отношениях это заключение, т. е. что избыток α -частиц в одном направлении должен быть одинаковым с недостатком в другом направлении, представляет собой очевидный вывод, но выгодность этого понятия для толкования явлений рассеяния, насколько мне известно, не была вполне признана. Оно может быть применено тогда, когда угловое распределение рассеиваемых α -частиц было определено для известной скорости α -частиц, и имеет то большое преимущество, что не требует развития какого-либо учения о природе столкновения или структуре ядра.

Чадвик и Билер рассматривали, например, рассеяние H -частиц для α -частиц с пробегом 6,3 см в воздухе между углами 0° и 60° . Полученная ими кривая показана на рис. 3, где ординаты представляют отношение числа H -частиц к числу α -частиц. Выше известного угла отклонения, рассеяние, в конце концов, должно стать нормальным. Величины, вычисленные по закону обратных квадратов, показаны на кривой B . После экстраполяции, наблюдаемой

кривой, обе кривые пересекаются в точке *P*, соответствующей углу около 80° и представляющей собой границу между двумя областями углов, в которых рассеяние является нормальным и аномальным. Так как между углами 0° и 60° имеется большой избыток рассеиваемых α -частиц, то между 60° и 80° должен быть соответствующий недостаток. Это иллюстрировано на рис. 4, где число рассеиваемых частиц на градус, от 0° до 80° , сопоставлено с теоретическим числом. Площадь *AA* над теоретической кривой должна быть равна площади между этой кривой и *BB*. Если считать, что приведенные здесь данные правильны, то очевидно, что около 70° в рассеянии должен быть заметный недостаток и что около 80° , где рассеяние становится нормальным, кривая должна быстро подниматься.

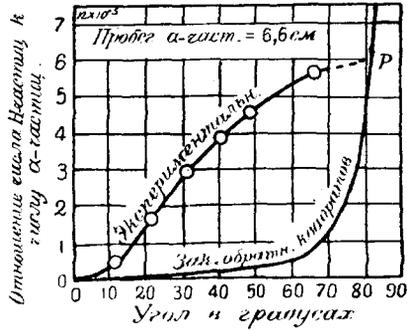


Рис. 3.

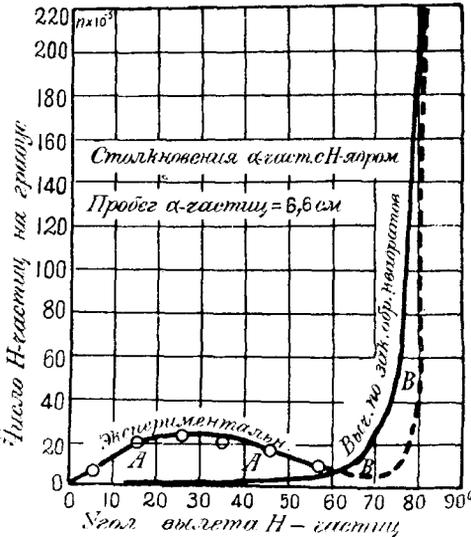


Рис. 4.

сомневаться в том, что он по существу является правильным.

В связи с этим особый интерес представляет рассеяние α -частиц алюминием — вопрос, который тщательно изучался в течение последних нескольких лет. Билер сравнивал

рассеяние тонкими листками алюминия и золота; считая, что в случае золота имеет место нормальное рассеяние, он заключает, что число α -частиц, рассеиваемых алюминием, меньше нормального. Этот недостаток по сравнению с вычисленной величиной возрастает с увеличением скорости α -частиц и угла рассеяния α -частиц. Резерфорд и Чадвик наблюдали рассеяние при больших углах (135°) и получили неожиданный результат, который и показан на рис. 5, где пунктирная линия означает нормальное вычисленное рассеяние, а сплошная — результаты опыта. Абсциссы представляют обратные величины энергии α -частиц, так что левая сторона кривой соответствует большим скоростям α -частиц.

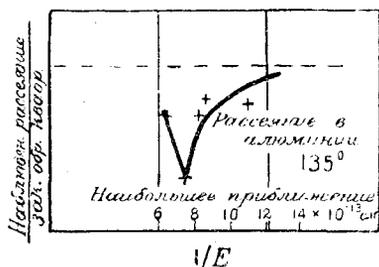


Рис. 5.

Для малых энергий отношение наблюдаемого рассеяния к вычисленному меньше единицы и убывает с увеличением энергии α -частиц, проходя через минимум, соответствующий α -частицам с пробегом в 5 см; для частиц с более высоким пробегом ($6,6$ см) кривая рассеяния имеет крутой подъем.

Результаты, подобные этим, наблюдались и для магния. Для 90° кривые рассеяния показывают заметное отклонение от нормального рассеяния, но никакого минимума не наблюдается. Однако едва ли может быть сомнение в том, что, если бы применялись α -частицы с еще большим пробегом, то кривая имела бы минимум, соответствующий кривой рис. 5.

Пользуясь данными, опубликованными Билером, Резерфордом и Чадвиком, оказывается возможным оценить недостаток рассеяния для α -частиц с пробегом в 5 см при всех углах между 30° и 135° . Результаты представлены на рис. 6. Очевидно, что существует заметный недостаток рассеяния во всем этом широком ряде углов. Из того, что было сказано ранее, ясно, что этот недостаток компенсируется избытком рассеяния в другой области углов. Кажется невероятным, что рассеяние на 180° может быть достаточно большим для такой компенсации, так как это

соответствовало бы возрастанию вычисленной величины в этой области примерно в сто раз. Исследование этого вопроса представляется нелегким делом, но все же производящиеся теперь опыты в состоянии ответить, будет ли наблюдаться заметный излишек. Если в этой области нет достаточной компенсации, тогда избыток рассеяния должен находиться в области между 0° и 30° . Сейчас этот вопрос изучается, но получение результатов той точности, которая требуется для разрешения вопроса, может встретить затруднения, ибо маленький процентный избыток рассеяния при малых углах легко может компенсироваться недостатком в области выше 100° , показанной на рисунке.

Все приведенные выше примеры являются интересной иллюстрацией выгоды этого принципа компенсации, применение которого обещает развитие исследований в полезных направлениях.

Принцип компенсации оказывается действительным только тогда, когда не имеет места исчезновение α -частиц в ядре. Теперь известно, что алюминий и магний выбрасывают протоны при бомбардировке α -частицами; представляется совершенно вероятным, что столкновение, которое ведет к выбрасыванию протона, связано с захватыванием α -частицы.

Блэккет (Blackett), при помощи наблюдения вильсоновых следов при столкновениях, сопровождающихся разрушением ядер, дал убедительное доказательство такого захватывания α -частиц в азоте. К сожалению, данные, которые в настоящее время являются полезными при решении вопроса о числе протонов, выбрасываемых алюминием и магнием под различными углами с направлением α -частиц, оказываются ненадежными, чтобы определенно ответить, можно ли показанный на рис. 6 недостаток рассеяния

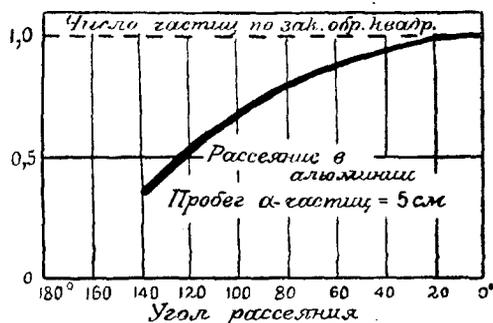


Рис. 6.

объяснять захватыванием α -частиц. Некоторые данные скорее указывают, что число выбрасываемых протонов представляет собой только часть этого недостатка рассеиваемых α -частиц. Если это действительно имеет место, то мы должны считать вероятным, что для недостатка рассеяния существует избыток при других углах.

НУКЛЕАРНЫЕ СИЛЫ И СТРОЕНИЕ ЯДРА.

До сих пор мы сравнивали наблюдаемое рассеяние α -частиц ядрами с рассеянием, вычисляемым по классической механике. Если принять, что ядра ведут себя как точечные заряды, то всякое расхождение с вычислением приходится приписывать отступлению сил от закона Кулона или строению ядра, размеры которого сравнимы с расстояниями, получающимися при тесных столкновениях.

Однако в последние годы применимость классической механики к разрешению проблемы внутриатомной физики была поставлена под сомнение, и возникла новая механика, основанная на работах Гейзенберга, Шрёдингера, Борна, Дирака и других. Новая механика уже показала свое могущество, дав правильное разрешение разнообразным атомным проблемам, и можно предположить, что аномальное рассеяние α -частиц легкими элементами является вполне естественным и зависит скорее от несостоятельности классической механики, когда ее применяют к столкновениям α -частиц, чем от какого-либо недостатка кулоновского закона сил.

Однако, недавно, Венцель, Борн и Оппенгеймер показали, что при некоторых допущениях законы рассеяния центральным полем сил, подчиняющихся закону обратных квадратов, имеют одну и ту же форму как в волновой, так и в классической механике. В настоящее время ведется общее изучение этой задачи о столкновениях, но я полагаю, что, за исключением маленьких пертурбаций, кажется невероятным, что волновая механика может дать какое-либо объяснение аномальному рассеянию α -частиц с большой скоростью легкими элементами — водородом, гелием и алюминием.

Шрёдингер и де-Бройль указали определенные критерии, при выполнении которых можно ожидать появление дифракционной картины¹⁾. В статье, подготовленной к печати и любезно показанной мне Блэккетом²⁾, эти критерии истолковываются в применении к условиям, имеющим место при столкновениях, согласно классической механике. К сожалению эти критерии недостаточно точны, и до тех пор, пока некоторые явления рассеяния не будут полностью объяснены по волновой механике, так что мы получим необходимые для сравнения данные, трудно быть уверенным в том, когда именно можно ожидать, что в столкновениях подобных, изученным нами, — т. е. в столкновениях массивных частиц с тяжелыми ядрами, — проявится определенная дифракционная картина.

В общем, если мы попытаемся определить эти условия, допуская, скажем, что аномальное рассеяние α -частиц алюминия объясняется по волновой механике, то критерии оказываются совершенно непригодными для столкновений α -частиц с ядрами водорода и гелия.

Таким образом представляется вероятным, что для объяснения аномального рассеяния α -частиц нам надлежит обратиться к изучению детальной структуры ядра и сил, исходящих от составляющих его частиц. Мы должны принять во внимание также и огромные, искажающие силы в ядрах, которые должны возникать при этих чрезвычайно сильных столкновениях, когда ядра тесно сближаются друг с другом. В моей оригинальной статье³⁾ о рассеянии α -частиц во-

1) Считаю нелишним в пояснение этого абзаца подчеркнуть, что речь идет об интерференции частиц материи. Согласно теориям де-Бройля и Шрёдингера, „волны материи“ имеют длину, определяемую равенством $\lambda = \frac{h}{mv}$. Именно эти волны и их дифракцию имеет в виду автор. Следует заметить, что дифракционные явления при рассеянии электронов при прохождении их через монокристаллы и тонкие металлические пластинки недавно с полной несомненностью установлены опытами Дэвиссона и Джермера и Дж. Томсона (G. P. Thomson — сын). *Ред.*

2) В настоящее время напечатана в *Cambr. Phil. Soc.* 33 (p. 6), 1927.

3) *Phil. Mag.* 37, 561 (1919).

дородными ядрами, я обратил внимание на значение этих искажающих сил при изменении нормальной структуры ядер, т. е. сил, действующих вблизи ядра, и указал, что на очень малых расстояниях силы могут меняться из сил отталкивательных в силы притяжения.

Чтобы дать объяснение для недостатка рассеяния в алюминии, Билер математически исследовал вопрос об изменении ожидаемого рассеяния в предположении, что действие α -частицы сводится к комбинации сил, именно обыкновенных отталкивательных электростатических сил, действующих между ядрами, и притягательной силы, меняющейся обратно пропорционально четвертой степени расстояния. Таким путем ему удалось дать приближенное объяснение для его экспериментальных результатов с алюминием. Более детально этот вопрос недавно рассматривался Дебаем и Гардмейером на несколько иных основаниях. Они принимают, что когда α -частица тесно приближается к ядру, то имеет место поляризация ядра, совершенно так же, как поляризуется нейтральный атом при приближении к нему заряженной частицы. Благодаря этой поляризации на α -частицу действуют силы притяжения, меняющиеся пропорционально r^{-5} , где r — расстояние от центра ядра. При этом было предположено, что силы пропорциональны объему, занятому ядром. При соответствующих допущениях относительно констант, входящих в формулы, этим авторам удалось вычислить рассеяние α -частиц с различными скоростями для угла рассеяния в 135° . Таким путем они получили теоретическую кривую рассеяния для алюминия, которая в общих чертах похожа на кривую рис. 5. Недостаток рассеяния оказывается схожим с тем, что дает опыт, и минимум в теоретической кривой рассеяния выражен так же отчетливо. Таким образом кажется, что нет ничего невероятного в том, что главные особенности рассеяния α -частиц алюминием и магнием могут быть обусловлены поляризацией ядра заряженной α -частицей. Однако представляется невероятным, что притягательные силы, возникающие таким образом, могут выражаться простым степенным законом, так как получающиеся здесь рас-

стояния имеют одинаковый порядок с размерами ядра, которое не может иметь симметричной структуры. Тем не менее представляло бы большой интерес детально разработать эту простую теорию, чтобы определить рассеяние α -частиц с данной скоростью для всех углов. Такое вычисление могло бы дать ценные указания относительно той области углов, где число рассеиваемых α -частиц является в избытке над нормальным числом, чтобы объяснить уже открытую недостаточность рассеяния при больших углах.

В связи с этим следует указать на другое интересное обстоятельство. Так как при тесных столкновениях рассмотренных типов должны были бы иметь место значительные движения составных частей ядра, которые могут двигаться и не по квантовым орбитам, то в результате столкновения в той или иной форме должна рассеиваться энергия. Если бы это действительно имело место, то обыкновенные законы сохранения энергии и количества движения не были бы применимы к таким столкновениям. До сих пор никакого убедительного доказательства такого эффекта не получено, исключая те случаи, когда ядро претерпевает разложение. Скорость рассеиваемых α -частиц, насколько позволяют судить наши опыты, согласуется со скоростью, вычисленной на основании законов упругого столкновения. Наиболее точный метод для изучения этого вопроса состоит в тщательном наблюдении фотографическим путем разветвляющихся следов, обусловленных столкновениями в вильсоновской камере. Блэккет изучил большое количество таких фотографий и в пределах малых ошибок опыта не нашел никакого доказательства потери энергии даже при самых тесных столкновениях α -частиц с легкими элементами. Этот вопрос является очень важным, но для того, чтобы дать на него определенный ответ, требуются еще более точные данные. Однако представляется совершенно достоверным, что потеря энергии при таких столкновениях не может превышать одного или двух процентов общей энергии α -частицы. Таким образом представляется вероятным, что если не вся, то большая часть энергии, теряемой α -частицей при искажении ядра в первой стадии столкновения,

возвращается этой α -частице, когда она покидает ядро. Естественным было бы держаться мысли, что α -частицы при ударе, равно как и ядро при отражении, оба претерпевают некоторое искажение и что в случае столкновения α -частицы с легкими атомами это искажение по величине может быть одинакового порядка для обоих ядер.

Мы уже рассмотрели некоторые поразительные особенности в рассеянии α -частиц ядрами водорода и гелия и указали путь к объяснению главных черт этих явлений. Имеется, однако, целый ряд других интересных обстоятельств, на которых следовало бы остановиться. При объяснении столкновений между α -частицами и Н-ядрами предполагалось, что последние могут быть рассматриваемы как точечные заряды, откуда и выводилось заключение о „форме“ α -частицы, или, вернее, той области, где силы являются аномальными. Представляется интересным сравнить полученные результаты для водорода и гелия. Как мы видели в случае очень близких столкновений, рассеяние в обоих случаях оказывается аномальным, но становится нормальным для достаточно медленных α -частиц, когда наибольшее приближение к ядру имеет порядок $4 \cdot 10^{-13}$ см. Однако, целый ряд данных показывает, что рассеяние для ядер гелия является нормальным даже при большем приближении к ядру, чем для Н-ядер. Если сложность в силах приписывать целиком α -частице и считать, что Н-ядро действует как точечный заряд, то мы должны ожидать, что рассеяние будет аномальным при вдвое большем расстоянии α -частиц при столкновении с ядрами гелия, чем при столкновении с водородными ядрами. Однако, как бы там ни было, это кратчайшее расстояние от ядра является для гелия даже меньшим, чем для водорода. Конечно, очень трудно оценить эффект искажения, но оказывается таким образом, что водородные ядра или протоны должны иметь размеры, сравнимые с размерами α -частиц. Это является неожиданным результатом, так как обычно считали, что протон по своим размерам должен быть гораздо менее электрона. Так как, однако, мы имели в виду скорее область, в которой имеет место проявление аномальных сил, чем пространство, занятое самой структурой ядра, то более точным

будет сказать, что область вокруг протона, где силы являются аномальными, сравнима с размерами соответствующей области для α -частицы.

Конечно, очень трудно дать точное объяснение происхождению сил, которые обнаруживаются при столкновениях, так как следует помнить, что оба ядра во время столкновения находятся в движении и что они оба находятся в аномальном состоянии, которое вызвано искажающими силами, возникающими при тесном сближении ядер друг с другом.

Является, однако, вполне возможным, что аномальное рассеяние вызвано не только видоизменением электростатических сил при искажении, но что при таких тесных столкновениях весьма значительными становятся магнитные силы, которые, конечно, могут играть первенствующую роль в рассеянии для легких элементов. В течение последних нескольких лет указывалось, что отрицательный электрон имеет определенный, присущий ему, магнитный момент; если это так, то будет вполне разумным предположение, что соответствующий магнитный момент имеет и протон. Френкель, занимавшийся вопросом о влиянии магнитных сил на строение α -частицы, полагает, что протон имеет магнитный момент, равный только $\frac{1}{1840}$ магнитного момента электрона.

Как бы мы ни смотрели на этот вопрос, ясно, что мы можем ожидать проявления больших магнитных сил вблизи ядра, вызванных внутренним магнитным моментом составляющих его частей или их движением. Нет никакого сомнения, что, в то время как частицы, составляющие ядро, могут стремиться к такому расположению, которое влечет за собой уменьшение магнитного момента до минимума, — по соседству с составными частями ядра всегда должны быть большие местные магнитные силы.

В случае ядра гелия, которое можно представлять себе состоящим из четырех протонов и двух электронов, является нетрудным вычислить из имеющихся данных, что влияние этих магнитных сил становится значительным для расстояний порядка $4 \cdot 10^{-13}$ см, т. е. для такого расстояния, на котором, как мы знаем, рассеяние α -частиц ядрами водорода и гелия становится заметно аномальным. Очень важно также

отметить, что так как отклоняющая заряженную частицу сила, вызванная магнитным полем, является пропорциональной скорости частицы, то мы оказываемся в состоянии понять в общих чертах почему аномальность в рассеянии в водороде и гелии так сильно возрастает с увеличением скорости α -частицы.

Представляется весьма вероятным, что магнитные силы по соседству с ядрами гелия имеют как раз такую величину, чтобы ими можно было объяснять аномальное рассеяние, наблюдаемое при тесных столкновениях с α -частицей. Чтобы дать объяснение для рассеяния α -частиц водородными ядрами, было сделано заключение, что область, в которой вызванные α -частицей силы являются аномальными, имеет сфероидальную форму и что этот сфероид должен двигаться своей короткой осью по направлению движения α -частицы. Это указывает на определенную ориентацию α -частицы, которая может произойти во время столкновения благодаря паре сил, вызванной взаимодействием магнитных полей обоих ядер. В то время как такие рассуждения носят, несомненно, широко спекулятивный характер, общие доводы поддерживают тот взгляд, что область, окружающая ядро, должна являться местопребыванием интенсивных магнитных сил, которые оказывают широкое влияние на аномальное рассеяние.

Радиоактивные ядра.

Нам надо будет остановиться сначала на расхождении между размерами ядра урана, вычисленными из данных рассеяния и радиоактивности. Резерфорд и Чадвик нашли, что рассеяние пленкой урана идет нормально, т. е. идет в соответствии с кулоновским законом сил вплоть до расстояний $3,2 \cdot 10^{-12}$ см. Однако следует отметить, что в то время, как с изменением скорости α -частиц рассеяние, в пределах ошибок опыта, остается нормальным, действительное количество рассеиваемых α -частиц, благодаря трудностям при определении с достаточной точностью веса урановой пленки, нельзя было уверенно сравнивать с вычисленным количеством.

Выбрасываемая ураном I α -частица имеет наименьшую из известных начальную энергию, именно $6,77 \cdot 10^{-6}$ эрг, или $4,25 \cdot 10^6$ вольт. Так как α -частица должна приобретать по крайней мере часть энергии при вылете в отталкивающем поле, то легко вычислить по кулоновским законам сил, что даже в том случае, когда α -частица не имеет никакой начальной скорости при вылете из внутренних частей ядра, она не может происходить из точек, отстоящих от центра ядра с зарядом 90 ближе, чем на $7 \cdot 10^{-12}$ см.

В то время как представляется совершенно невозможным, чтобы положительно заряженные частицы, подобные протону или α -частице, могли оставаться в равновесии под действием кулоновского закона отталкивательных сил, — совершенно иное будет в том случае, когда частицы являются электрически нейтральными. Нейтральная частица может быть удерживаема в равновесии притягательными силами либо благодаря ее поляризации, вызванной электрическим полем заряженного центрального ядра, либо благодаря магнитным силам возникающим вокруг ядра, или благодаря комбинации обоих типов сил. Предварительные вычисления, основанные на осторожных допущениях, показывают, что притягательные силы, вызванные такими причинами, оказываются как раз такой величины, которая требуется для удержания частиц в равновесии при их движении вокруг центрального ядра.

Таким образом мы приходим к общему представлению о таком строении ядра, при котором последнее в свою очередь имеет центральное заряженное ядро окруженным известным числом незаряженных частиц. В работе, доложенной во Франклиновском институте в 1924 г.¹⁾, я высказал предположение, что центральное ядро является тесно расположенной группировкой α -частиц и электронов вроде кристаллического образования и показал при этом, что известные простые группировки оказываются в хорошем согласии с зарядом и массой некоторых атомов. Как бы мы ни смотрели на этот вопрос, я склонен думать, что центральное

¹⁾ Ср. У. Ф. Н. 5, вып 1—2.

ядро тяжелых элементов обладает очень плотным строением, занимая очень малый объем радиуса порядка $1 \cdot 10^{-12}$ см. Нейтральные спутники, вращающиеся вокруг этого ядра, могут быть расположены на расстояниях, сравнительно больших с линейными размерами главного ядра.

Если в качестве нейтрального спутника мы представим незаряженную α -частицу, то она должна состоять из ядра гелия, которое получило два электрона. Эти электроны не могут занимать то же положение, какое занимают в обыкновенном атоме гелия в свободном его состоянии, ибо в таком случае они были бы сразу снесены сильным электрическим полем ядра. Вероятно они гораздо более тесно связаны с ядром и вращаются по таким орбитам, которые оказываются возможными только благодаря искажению строения ядра α -частицы посредством интенсивных электрических или магнитных полей, исходящих из центрального ядра. Такой взгляд не кажется необоснованным, ибо не подлежит никакому сомнению, что все сложные ядра должны претерпевать значительные деформации под влиянием огромных полей, присутствующих в нуклеарных системах. В полях ниже этой критической величины эти электронные орбиты не могут существовать и, следовательно, нейтральная α -частица, вылетающая из сложного ядра, должна лишаться двух ее электронов, когда достигается это критическое поле.

Мы можем, таким образом, представить себе следующую картину испускания α -частиц радиоактивными элементами. Может случиться, что нейтральная α -частица, которая, по всей вероятности, вращается по квантовой орбите, по какой-либо причине сместится из положения равновесия и будет иметь достаточную кинетическую энергию для того, чтобы уйти из поля притягательных сил центрального ядра. Когда напряжение поля падает ниже критической величины, нейтрализующие электроны покидают частицу и падают назад на ядро. После этого α -частица, которая имеет теперь двойной положительный заряд, приобретает добавочную энергию, проходит через поле отталкивательных сил ядра и вылетает в виде α -частицы с большой скоростью. В связи с этим интересно отметить, что Л. Мейтнер из рассмотре-

ния последовательных превращений радиоактивных атомов заключает, что некоторые из α -частиц в ядре должны существовать в нейтральном состоянии.

Согласно представленным здесь взглядам все α -частицы, которые выбрасываются радиоактивными ядрами, должны происходить из нейтральных спутников.

Мы должны теперь проследить вкратце судьбу электронов, которые освобождаются из нейтральной α -частицы. Из известного изменения заряда при радиоактивных превращениях ясно, что электроны должны отступать к главному ядру, где они вероятно будут описывать орбиты под влиянием сложной системы сил, которые существуют вблизи от ядра и которые, вследствие искажений ядра, могут иметь огромное значение. Может случиться, что какой-либо из этих электронов будет иметь достаточно энергии для того, чтобы целиком вырваться из ядра и дать, таким образом, возможность возникновению β -луча.

В нашем описании ядра мы имеем, таким образом, концентрированное внутреннее ядро, несущее положительный заряд и окруженное на близких расстояниях множеством электронов и, затем, имеющее на некоторых расстояниях множество нейтральных спутников, вращающихся вокруг системы. Я надеюсь в следующей статье дать более полное рассмотрение нуклеарной структуры этого типа, которое может дать в наше распоряжение известные возможности при объяснении богатых радиоактивных данных.

Эта картина строения ядра не ограничивается только радиоактивными атомами, но в такой же степени может быть применена и к обыкновенным атомам. До сих пор мы говорили о возможности существования нейтральных спутников только в форме α -частиц, т. е. с массой 4. Представляется, однако, вполне возможным, что другие типы нейтральных спутников могут иметь массу 2 или 3. Многими авторами обращалось внимание на возможность существования таких ядер в виде вторичных единиц, которые играют роль надстройки к нуклеарным образованиям,—но они обычно считали, что эти единицы существуют скорее в виде заряженных, чем нейтральных масс. Такие вторичные нейтраль-

ные единицы могут быть способными существовать только в присутствии мощных ядерных полей и, следовательно, не могут быть наблюдаемы в свободном состоянии.

Этот взгляд на строение ядра одновременно дает и правдоподобное объяснение существованию множества изотопов в элементе с данным атомным номером. Как только образовалось центральное ядро, к нему может быть прибавлено множество нейтральных спутников, которые удерживаются в равновесии силами притяжения. Астон показал, что в некоторых случаях может существовать большое количество изотопов, что, повидимому, указывает на то, что к нуклеарному образованию можно прибавить множество спутников без нарушения его равновесия. Он обратил внимание на тот факт, что во всех случаях тяжелые элементы с нечетным порядковым номером либо совсем не имеют изотопов, либо имеют два изотопа, массы которых отличаются на две единицы, в то время как элементы с четным номером могут иметь целый ряд изотопов. Это поразительное различие между элементами является аналогичным с наблюдаемым фактом, что элементы с нечетным атомным номером, которые подвергаются разрушению при бомбардировке α -частицами, выбрасывают протоны при гораздо более высокой средней скорости, чем четные элементы. Гаркинс (Harkins) также показал, что элементы с четными номерами гораздо более распространены в природе, чем элементы с нечетными номерами.

Эта разница в изотопических свойствах между четными и нечетными элементами представляется фундаментальной по своему характеру. Возможное объяснение может быть получено при помощи общего взгляда на строение ядра, которое мы набросали. Предполагалось, как обычно, что центральное ядро является построенным из ядер гелия, несущих два определенным образом расположенных заряда, и что у четных элементов должно иметься четное количество электронов.

Эти последние стремятся стать в равновесие, так чтобы результирующий магнитный момент системы был минимальным. Если теперь, путем прибавки протона или удаления

электрона, образуется элемент с нечетным атомным номером, то дальше может оказаться уже невозможным это равновесие между магнитными моментами, как в случае элемента с четным номером. Действие результирующего магнитного поля нуклеарной системы может повести к невозможности для нейтральных спутников вращаться по устойчивым орбитам вокруг ядра. Если этот взгляд правилен, то мы должны признать, что нуклеарный магнитный момент нечетных элементов должен заметно отличаться от магнитных моментов четных элементов. Насколько мне известно, в настоящее время по этому пункту не имеется никаких определенных доказательств.

В этом разборе атомного строения мы обращались большей частью к тяжелым элементам, где ядра представляются состоящими, главным образом, из α -частиц и спутников, и где приходится признать: правило целых чисел атомных масс должно оправдываться в тесных пределах. Если присутствие нейтральных спутников в нуклеарной системе зависит главным образом от электрического заряда ядра, прибавление таких спутников должно быть возможным только тогда, когда нуклеарный заряд превосходит известную величину. По этой причине строение легких элементов в общих чертах может значительно отличаться от строения тяжелых элементов, и отклонения от правила целых чисел атомных масс могут быть сильнее выражены, чем для тяжелых элементов. Точное определение атомных масс легких элементов, какое было предпринято Астоном, представляет, таким образом, огромный теоретический, равно как и практический интерес, ибо оно может дать нам ценные сведения о том, насколько тесно связаны компоненты ядра — протоны и электроны.

Так как строение легких элементов является неизвестным, то представляется очень трудным сочетать разложение таких элементов α -частицами с изучением каких-либо специальных черт их строения. Представленные здесь взгляды по своему характеру являются, надо признать, весьма спекулятивными, но они могут оказать полезные услуги тем, что укажут возможные пути к изучению этой основной про-

блемы. Хотя ядра тяжелых элементов по своему строению являются, несомненно, очень сложными, в них могут оказаться известные простые общие черты, которые могут отсутствовать или ускользать от наблюдения в легких элементах. По этой причине я имею большую надежду, что мы все-таки можем быть в состоянии при изучении радиоактивных данных бросить свет на некоторые выдающиеся черты строения ядер тяжелых элементов.
