

Строение атома

Э. Резерфорд
(Получено февраль 1914 года)

— — ◊ ◊ ◊ — —

Русский перевод взят из сборника: Э. Резерфорд “Избранные научные труды” Под редакцией Г.Н. Флёрв М. Наука, 1972, стр. 238.

— — ◊ ◊ ◊ — —

Настоящая работа, а также опубликованная в этом журнале статья Дарвина посвящены некоторым вопросам “ядерной” теории строения атома, преднамеренно опущенным в моем первом сообщении на эту тему[1]. Здесь приводится краткое описание более поздних исследований, проведенных для проверки теории, и те выводы, которые можно сделать на их основе. Кроме того, кратко описаны выполненные в последнее время эксперименты по прохождению α -частиц через водород, которые играют существенную роль в определении размеров ядра.

В предыдущей работе[1] я указывал на важность изучения прохождения быстрых α - и β -частиц через вещество как метода исследования внутренней структуры атома. В работе обращено внимание на замечательный факт, впервые обнаруженный Гейгером и Марсденом[2], заключающийся в том, что малая часть быстрых α -частиц, испускаемых радиоактивными веществами, может быть отклонена на угол, больший 90° , в результате столкновения с одним-единственным атомом. Было показано, что модель, предложенная Кельвином и детально разработанная Дж.Дж. Томсоном, не может дать таких больших отклонений, если не предполагать, что диаметр положительной сферы мал. Чтобы объяснить эти большие углы рассеяния α -частиц, я предположил, что атом состоит из положительно заряженного ядра малых размеров, в котором практически сосредоточена вся масса атома. Согласно этому предположению, ядро должно быть окружено системой электронов, которые обеспечивают нейтральность атома и расположены на расстоянии, сравнимом с обычно принятой величиной радиуса атома. Некоторые из быстрых α -частиц, проходя на своем пути сквозь атомы и подвергаясь вблизи ядра действию интенсивного электрического поля, отклоняются от прямолинейного движения. Чтобы отклониться на угол, больший нескольких градусов, α -частица должна пройти весьма близко от ядра; при этом предполагалось, что внешние электроны существенно не

искажают поле сил в этой области. Если допустить, что между ядром и α -частицей действуют силы отталкивания, подчиняющиеся закону обратных квадратов, то α -частица описывает гиперболическую орбиту вокруг ядра и ее отклонение можно вычислить.

На основании этой теории было выведено, что число α -частиц, падающих нормально на единицу площади и образующих угол φ с первоначальным направлением пучка, пропорционально

- 1) $\operatorname{cosec}^4\varphi/2$ или $1/\varphi^4$, если φ мало;
- 2) числу атомов в единице объема рассеивающего вещества;
- 3) толщине рассеивающего вещества t , если она мала;
- 4) квадрату заряда ядра Ne ;
- 5) обратно пропорционально $(mu^2)^2$, где m – масса α -частицы, а u – ее скорость.

Данные по рассеянию α -частиц, полученные ранее Гейгером[3] позволили сделать вывод, что заряд ядра примерно равен половине атомного веса, помноженной на заряд электрона. Гейгер и Марсден[4] начали эксперименты для проверки согласия законов однократного рассеяния α -частиц с теорией. Общий экспериментальный метод, примененный ими, состоял в том, что узкий пучок α -частиц падал нормально на тонкую пленку вещества и по методу сцинтилляций наблюдалось число частиц, рассеянных на различных углах. Это была трудная и кропотливая работа, заключавшаяся в подсчете многих тысяч частиц. Полученные результаты находятся в очень хорошем согласии с теорией. При очень малой толщине рассеивающей пластинки рассеяние оказалось прямо пропорционально этой толщине и обратно пропорционально четвертой степени скорости падающих частиц. Специально было изучено число α -частиц, рассеянных в интервале углов от 5 до 150 градусов. Хотя в этом диапазоне число углов рассеянных частиц уменьшалось в отношении 200 000 : 1, зависимость числа рассеянных частиц от угла совпала с теорией в пределах экспериментальных ошибок. Гейгер и Марсден обнаружили, что рассеяние различными атомами вещества примерно пропорционально квадрату атомного веса, откуда следует, что заряд ядра приблизительно пропорционален атомному весу. Определяя число α -частиц, рассеянных тонкими пластинками золота, они сделали вывод, что ядерный заряд примерно равен половине атомного веса, помноженной на заряд электрона. Вследствие трудности эксперимента ошибка в определении этого числа составляет не менее 20%. Таким образом, экспериментальные результаты Гейгера и Марсдена оказались в полном согласии с предсказаниями теории и показали, что эта гипотеза о структуре атома в существенных чертах правильна.

В предыдущей работе при определении величины однократного рассеяния я предположил, что атом остается в покое во время столкновения с α -частицей. В вышедшей одновременно статье Дарвин[5] вывел соотношения,

которые должны соблюдаться при учете движения атома отдачи. Он показал, что если не учитывается это движение, то не вносится существенной ошибки даже для таких легких атомов, как атомы углерода. Дарвин определил также, какое рассеяние следует ожидать, если закон сил отличен от закона обратной пропорциональности квадрату расстояния, и показал, что в этом случае не получается согласия с опытом ни для зависимости рассеяния от угла, ни для зависимости рассеяния от скорости. Эти результаты определенно указывают, что закон сил, действующий между α -частицей и ядром, есть закон обратной пропорциональности квадрату расстояния.

Интересно отметить, что Вильсон[6], фотографируя пути α -частиц, впоследствии показал, что в некоторых случаях α -частица испытывает внезапное отклонение на большой угол. Это убедительно доказывает справедливость того взгляда, что большие отклонения в некоторых случаях получаются в результате столкновения только с одним атомом.

Согласно описанной теории, большие отклонения α -частица испытывает при прохождении вблизи ядра, где поле весьма интенсивно, причем это отклонение не изменяется существенным образом при прохождении мимо внешних электронов. Такое предположение, по видимому, достаточно обоснованно, если вспомнить, что масса и энергия α -частицы весьма велики по сравнению с массой и энергией электрона даже тогда, когда скорость его движения сравнима со скоростью света. Простые рассуждения показывают, что отклонения, которые α -частица должна испытать даже при прохождении сквозь сложную систему электронов тяжелого атома, подобного атому золота, должны быть малы по сравнению с действительно наблюдающимися отклонениями. Исследование прохождения быстрых α -частиц через вещество представляют собой наиболее определенный и простой метод изучения общей структуры атома, так как α -частица может проникать внутрь атома без значительных возмущений со стороны электронов и, таким образом, подвергается влиянию лишь интенсивного поля атомного ядра.

Независимость рассеяния на большие углы от внешних электронов справедлива лишь для заряженных частиц с очень малой кинетической энергией. Вряд ли можно ожидать, что она будет справедлива также для частиц, движущихся с гораздо меньшими скоростями и меньшей энергией, например для обыкновенных катодных лучей или атомов отдачи активного вещества. В этих случаях, видимо, внешняя система электронов при рассеянии играет гораздо более существенную роль, нежели в рассматриваемом случае.

Рассеяние β -частиц

На основании ядерной теории следует ожидать, что быстрые β -частицы должны испытывать отклонения на большие углы при прохождении вблизи ядра. Кажется, нет сомнения в том, что столь большие отклонения образуются, и в предыдущей статье я показал, что данные, полученные Кроусером[7]

для рассеяния β -частиц, можно в общем объяснить исходя из ядерной теории строения атома. Однако следует помнить, что существует несколько важных пунктов различия между эффектами, ожидаемыми для α - и β -частиц. Поскольку между ядром и β -частицей действует сила притяжения, то скорость β -частицы быстро возрастает при ее приближении к ядру. Согласно обычной электродинамике, это влечет за собой потерю энергии путем излучения и увеличения кажущейся массы электрона.

Дарвин[5] математически исследовал влияние этих эффектов на орбиту электрона и показал, что при определенных условиях β -частица уже не высвобождается из атома, а описывает спиральную орбиту и в конце концов попадает на ядро. Этот результат весьма интересен, так как может объяснить исчезновение быстрых β -частиц при прохождении через вещество. Кроме того, следует помнить, что наиболее быстрая β -частица, испускаемая радием С, обладает лишь $1/3$ энергии соответствующей α -частицы, тогда как средняя энергия β -частицы составляет менее $1/6$ энергии α -частицы. Таким образом, следует ожидать, что большие углы рассеяния β -частицы ядром должны получаться уже в тех областях, где применение простой теории невозможно проверить точно. Поэтому весьма важно найти законы рассеяния β -частиц на большие углы при различных скоростях, ибо это должно осветить ряд важных вопросов строения атома. В настоящее время в нашей лаборатории поставлены эксперименты с целью детального изучения рассеяния быстрых β -частиц.

Очевидно, что, проходя вблизи электрона, β -частица может испытывать большое отклонение. Математически эта задача аналогична исследованной Дарвином задаче о близком столкновении α -частицы с атомом гелия, обладающего равной ей массой. Однако такие большие отклонения, обусловленные столкновением с электронами, должны быть сравнительно реже, нежели отклонения под действием ядра тяжелого атома.

Рассеяние в водороде

Особый интерес представляют явления, которые можно ожидать в результате прохождения α -частиц через легкие газы, например через водород и гелий. В работе Нэттола и моей[9] показано, что рассеяние α -частиц в водороде и гелии хорошо согласуется с представлением о том, что ядро водорода имеет один положительный заряд, тогда как α -частица, или гелий, — два заряда. Дарвин подробно исследовал простое рассеяние, которое должно происходить, когда α -частица проходит через водород или гелий. Необходимо лишь подчеркнуть, что, согласно ядерной теории, в результате близких столкновений с α -частицей небольшое число атомов водорода должно приобретать скорость, в 1.6 раза превышающую скорость α -частицы. Принимая во внимание, что атомы водорода имеют один положительный заряд, а α -частица — два, можно вычислить, что некоторые атомы водорода должны

иметь пробег, примерно в четыре раза больший пробега α -частиц, которые эти атомы приводят в движение.

Марсден любезно провел для меня эксперименты, чтобы проверить, можно ли обнаружить присутствие таких атомов водорода. Детальное описание этих опытов появится позже. Достаточно лишь упомянуть, что Марсден получил несомненное доказательство того, что некоторые из атомов водорода приводятся в столь быстрое движение, что способны вызывать заметные сцинтилляции на экране из сернистого цинка и проходить через водород расстояние в три или четыре раза большее, чем налетающие α -частицы. Общий метод, примененный Марсденом, состоял в следующем. Тонкая трубочка, в которой было примерно 100 мкюри очищенной эманации, располагалась в трубе, наполненной водородом. Сцинтилляции, вызванные α -частицами, вылетающими из трубочки, исчезали в воздухе на расстоянии около 5 см. Если же воздух заменить водородом, то большинство сцинтилляций пропадает примерно на расстоянии 20 см от источника, что соответствует побегу α -частицы в водороде. Небольшое число сцинтилляций, однако, наблюдалось в водороде вплоть до расстояния около 90 см. Эти сцинтилляции были менее интенсивными, чем сцинтилляции обусловленные α -частицами. Наблюдаемое число таких сцинтилляций было как раз порядка величины, предсказываемой теорией однократного рассеяния, если предположить, что ядра водорода и гелия обладают столь малыми размерами, что ведут себя как точечные заряды вплоть до расстояний 10^{-13} см.

По-видимому, нет сомнений в том, что сцинтилляции, наблюдаемые дальше 20 см, вызываются заряженными атомами водорода, приведенными в быстрое движение при близком столкновении с α -частицами. В настоящее время Марсден проводит эксперименты по определению числа атомов водорода, приведенных в движение, и зависимости этого числа от угла рассеяния.

Появление таких быстрых атомов водорода, вероятно, невозможно объяснить, не предположив, что силы отталкивания между α -частицей и атомом водорода чрезвычайно велики. Столь большие силы могут возникнуть лишь в том случае, если размеры положительных ядер так малы, что между ними возможно тесное сближение.

Размеры и строение ядра

В предыдущей работе я показал, что ядро должно обладать чрезвычайно малыми размерами, и вычислил, что в случае золота его радиус не больше $3 \cdot 10^{-12}$ см. Чтобы объяснить скорость, приобретаемую атомом водорода при столкновении с α -частицей, надо допустить, что центры ядер гелия и водорода, как это может быть просто вычислено (см. работу Дарвина[5]), должны сближаться на расстояние $1.7 \cdot 10^{-13}$ см. Предположим для про-

стоты, что форма ядра сферическая, тогда ясно, что сумма радиусов ядер водорода и гелия не может быть больше $1.7 \cdot 10^{-13}$ см. Это чрезвычайно малая величина; она даже меньше обычно принимаемой величины диаметра электрона ($2 \cdot 10^{-13}$ см). Очевидно, что рассматриваемый метод позволяет получить лишь оценку максимальных размеров ядра, и вполне вероятно, что само ядро водорода может иметь еще меньшие размеры. Тем самым возникает вопрос: настолько ли мало ядро водорода, что его массу можно объяснить так же, как и массу отрицательного электрона?

Из опытов Дж.Дж. Томсона и других хорошо известно, что никогда не наблюдались носители положительного электричества с массой, меньшей массы атома водорода. Обнаруженные чрезвычайно малые размеры ядра водорода подтверждают предположение, что ядро водорода есть *положительный электрон* и что его масса исключительно электромагнитного происхождения. Согласно электромагнитной теории, электрическая масса сферического заряженного тела равна $\frac{2}{3}(e/a^2)$, где e – заряд, a – радиус. Следовательно, если массу ядра считать исключительно электромагнитной, то радиус ядра водорода должен составлять около $\frac{1}{1830}$ радиуса электрона. Сейчас еще нет экспериментальных доказательств ошибочности такого предположения. Масса ядра гелия примерно в четыре раза больше массы ядра водорода. Если предположить, что положительный электрон, т.е. атом водорода, – это тот единичный элемент, из которого составлены все атомы, то следует ожидать, что атом гелия содержит четыре положительных и два отрицательных электрона.

Хорошо известно, что во многих случаях превращения радиоактивных веществ испускается атом гелия. Однако до сих пор не обнаружено ни одного случая выбрасывания атома водорода. Совместно с Робинсоном я исследовал вопрос о том, испускают ли радиоактивные вещества еще какие-нибудь заряженные атомы кроме атомов гелия и атомов радиоактивного вещества, получивших ускорение вследствие отдачи при испускании α -частиц. Эти измерения показали, что даже если такие частицы и вылетают, то их число несомненно меньше $\frac{1}{10000}$ числа атомов гелия. Отсюда следует, что ядро гелия – очень стабильная конфигурация, которая выдерживает интенсивные возмущения, возникающие при его выбрасывании с большой скоростью из радиоактивного атома, и что оно представляет собой, по-видимому, одну из единиц, из которых построено большинство атомов. Радиоактивные явления показывают, что атомный вес последовательных продуктов при испускании α -частицы уменьшается на четыре единицы и, как часто указывалось, атомные веса многих стабильных атомов отличаются примерно на четыре единицы.

Как будет показано впоследствии, результирующий заряд ядра определяет большинство физических и химических свойств атома. Однако масса атома зависит от числа и расположения образующих его положительных и отрицательных электронов. Поскольку эксперименты показывают, что ядро имеет очень малые размеры, то образующие его положительные и отрицательные электроны должны быть плотно упакованы. Как показал Лорентц, электрическая масса системы заряженных частиц, если частицы располо-

жены близко одна к другой, зависит не только от числа этих частиц, но и от взаимодействия их полей. При найденных нами размерах положительных и отрицательных электронов упаковка должна быть очень плотной, чтобы создалось заметное изменение массы, обусловленное этой причиной. Этим, например, можно объяснить тот факт, что масса атомов гелия не в точности равна учетверенной массе атома водорода. Но до тех пор пока ядерная теория не будет более определенно проверена, преждевременно обсуждать возможное строение самого ядра. Общая теория указывает, что ядро тяжелого атома – очень сложная система, несмотря на то, что размеры его чрезвычайно малы.

Возникает важный вопрос: содержат ли атомные ядра, которые все имеют положительный заряд, отрицательные электроны? Этот вопрос обсуждался Бором[10], который на основании радиоактивных данных сделал вывод, что β -частицы большой скорости возникают в ядре. Общие радиоактивные данные подтверждают такой вывод. Хорошо известно, что радиоактивные превращения, которые сопровождаются испусканием β -частиц большой скорости, подобны α -превращениям, не зависят от изменения в широких пределах температуры или физико-химических условий. Согласно ядерной теории, нет никакого сомнения в том, что α -частицы возникают в ядре и получают большую, если не всю, часть энергии своего движения при вылете из атома. Поэтому кажется обоснованным предположение, что и β -превращения есть следствие выброса отрицательного электрона из ядра. Хорошо известно, что при превращении радия С энергия[11], высвобождаемая в форме β - и γ -излучения, составляет около $1/4$ энергии испущенной α -частицы. Нелегко объяснить излучение такого большого количества энергии, если считать, что она связана с системой электронов. Кажется более вероятным, что электрон с большой скоростью высвобождается из ядра и при своем вылете из атома возбуждает сильные колебания в системе электронов, что приводит к возникновению интенсивного γ -излучения и вторичных β -частиц. Факты определенно свидетельствуют о том, что многие из быстрых электронов, испускаемых радиоактивными веществами, высвобождаются из электронной системы вследствие возмущения, вызванного первичным электроном, высвобождаемым из ядра.

Заряд ядра

В результате исследования рассеяния α -частиц веществом найдено, что положительный заряд ядра примерно равен $1/2$, где A – атомный вес, e – элементарный заряд. Это эквивалентно утверждению, что число внешних электронов равно приблизительно половине атомного веса, выраженного в единицах веса водорода. Интересно отметить, что такое же значение получил Барклай[12] из совершенно других данных, а именно из рассеяния X-лучей при прохождении через вещество. Этот вывод основан на теории Дж.Дж.

Томсона, в которой предполагается, что каждый электрон в атоме рассеивает как независимая единица. Представляется невероятным, чтобы электроны внутри ядра вносили вклад в это рассеяние, так как они тесно связаны с положительным ядром и должны удерживаться в равновесии силами совершенно иного порядка величины, нежели силы, связывающие внешние электроны.

Из рассмотрения атомов водорода и гелия, где водород имеет один электрон, а гелий – два, очевидно, что число электронов не может быть всегда точно равно половине атомного веса. Это приводит к интересному предположению, которое высказал Ван-ден-Брок[13], что число единиц заряда ядра, а следовательно число внешних электронов, должно быть равно номеру места, которое занимает элемент по порядку возрастания атомного веса. С этой точки зрения заряды ядер водорода, гелия и углерода должны быть соответственно равны 1, 2, 6 и т.д. для других элементов, если только мы не пропускаем каких-либо элементов. Эта точка зрения была принята Бором в его теории строения простых атомов и молекул.

Недавно это предположение получило дважды сильное подтверждение. Содди[14] указал, что последнее обобщение связи между химическими свойствами элемента и его излучением можно объяснить, предположив, что при испускании α -частицы атом теряет два положительных заряда, а при испускании электрона большой скорости – один отрицательный. Из рассмотрения последовательных продуктов трех главных радиоактивных семейств – урана, тория и актиния – следует, что некоторые радиоактивные элементы могут быть расположены таким образом, что заряд ядра уменьшается на единицу при переходе от каждого элемента к соседнему. Таким образом, представляется вероятным, что предположение Ван-ден-Брока справедливо для некоторых, если не для всех, тяжелых радиоактивных элементов. Недавно Мозли[15] привел очень ценное доказательство того, что это правило справедливо также для ряда более легких элементов. Исследуя длины волн характеристических X-лучей 12 элементов, расположенных между кальцием (атомный вес 40) и цинком (атомный вес 65.4), он показал, что изменение длины волны можно просто объяснить, предположив, что заряд ядра возрастает от элемента к элементу точно на единицу. Это справедливо также для кобальта и никеля, хотя уже давно известно, что в периодической системе элементов они занимают аномальное место. Нет причин, почему бы этот новый мощный метод анализа, заключающийся в определении частоты в характеристических спектрах X-лучей элементов, нельзя было распространить на большое число элементов. Следовательно, в ближайшем будущем можно ожидать получения дальнейших окончательных результатов.

С точки зрения ядерной теории ясно, что физические и химические свойства обычных элементов зависят главным образом от заряда ядра, так как именно он определяет число и распределение внешних электронов, от которых в основном зависят эти свойства. Как указал Бор, свойства тяготения и радиоактивности, которые не поддаются воздействию никакаих физических или химических агентов, следует приписывать главным образом, если не

полностью, ядру, тогда как обычные физические или химические свойства определяются числом и расположением внешних электронов. С этой точки зрения заряд ядра есть фундаментальная константа атома, тогда как масса атома может быть сложной функцией расположения структурных единиц, образующих ядро.

Следует помнить, что, согласно ядерной теории, атомы вполне могут иметь одинаковый заряд ядра, но значительно различаться по атомному весу. Проще всего это можно проиллюстрировать данными из области радиоактивности. Ниже даны атомные веса и заряды для нескольких последовательных элементов, образующихся при превращениях урана. Истинный заряд ядра урана неизвестен, для простоты он принят равным 100.

Последовательные элементы	U_1	UX_1	UX_1	U_2	Io	Ra
Атомный вес	238.5	234.5	234.5	234.5	230.5	226.5
Заряд ядра	100	98	99	100	98	96

Согласно современным теориям, предполагается, что при испускании α -частицы заряд ядра уменьшается на две единицы, тогда как при испускании β -частицы он увеличивается на единицу. Из приведенных данных видно, что U_1 и U_2 имеют один и тот же заряд ядра, хотя их атомные веса различаются на четыре единицы. Если предположить, что ядро любого элемента представляет собой смесь ядер водорода с единичным зарядом и ядер гелия с двумя зарядами, то а priori понятно, что может существовать целый ряд атомов с одним и тем же зарядом ядра, но с различной массой. Радиоактивные данные определенно подтверждают эту точку зрения, но, вероятно, лишь немногие из таких ядер достаточно устойчивы, чтобы сохраняться в течение доступного для измерения времени.

Бор[16] обратил внимание на трудности построения атомов на основе "ядерной" теории и показал, что устойчивые положения внешних электронов не могут быть выведены из классической механики. Вводя некоторые понятия, связанные с квантом Планка, он показал, что при определенных предположениях можно построить простые атомы и молекулы (атом и молекулу водорода и атом гелия) из положительного и отрицательного ядер, которые во многих отношениях ведут себя как реальные атомы или молекулы. Хотя можно придерживаться различных мнений относительно справедливости и физического смысла допущений Бора, не подлежит сомнению, что его теории представляют большой интерес и значение для всех физиков как первая конкретная попытка построить простые атомы и молекулы и объяснить их спектры.

Манчестерский университет, февраль 1914 г.

Список литературы

- [1] Rutherford E. Philos.Mag., 1911, May, ser. 6, 21, 669.
- [2] Geiger H., Marsden E. Proc. Roy. Soc. A, 1909, 82, 498.
- [3] Geiger H., Proc. Roy. Soc. A, 1910, 83, 492.
- [4] Geiger H., Marsden E. PM 1913, 25, 604.
- [5] Darwin C. Philos.Mag., 1914, 27, 499.
- [6] Wilson C.T.R. Proc. Roy. Soc. A, 1912, 87, 277.
- [7] Crowther J. Proc. Roy. Soc. A, 1910, 84, 226.
- [8] Darwin C. Philos.Mag., 1913, 25, 201.
- [9] Rutherford E., Nuttall J.M. Philos.Mag., 1913, 24, 702.
- [10] Bohr N. Philos.Mag., 1913, 26, 476.
- [11] Rutherford E., Robinson H. Philos.Mag., 1913, 25, 312.
- [12] Barkla C. Philis.Mag., 1911, 21, 648.
- [13] Van den Broek A. Phys.Z., 1913, 14, 32.
- [14] Soddy F. Jahrb. Rad., 1913, 10, 188.
- [15] Moseley H. Philos.Mag., 1913, 26, 1024.
- [16] Bohr N. Philos.Mag., 1913, 26, 476, 857.