

ЯДЕРНОЕ СТРОЕНИЕ АТОМОВ

Бейкериянская лекция

Э. Резерфорд

Профессор экспериментальной физики
лаб. Кавендиша, университет Кембриджа
(Получено 3 июня 1920 года)

— — $\diamond \diamond \diamond$ — —

Русский перевод взят из сборника: Э. Резерфорд “Избранные научные труды” Отв. ред. академик Г.Н. Флеров, М. Наука 1972, стр. 292.

— — $\diamond \diamond \diamond$ — —

Введение

Представление о ядерном строении вещества первоначально возникло из попыток объяснить рассеяние α -частиц на большие углы при прохождении через тонкие слои вещества.[1] Поскольку α -частицы обладают большой скоростью и большой массой, то эти большие отклонения были весьма примечательны и указывали на существование очень интенсивных электрических или магнитных полей внутри атома. Чтобы объяснить эти результаты, необходимо было предположить, [2] что атом состоит из заряженного массивного ядра очень малых размеров по сравнению с обычно принятой величиной диаметра атома. В этом положительно заряженном ядре сосредоточена большая часть массы атома, и оно окружено на некотором расстоянии системой отрицательных электронов, число которых равно результирующему положительному заряду ядра. В этих условиях вблизи ядра существует очень интенсивное электрическое поле, и большие отклонения α -частицы при встрече с отдельным атомом происходит в том случае, когда частица проходит вблизи ядра.

Предполагая, что электрические силы между α -частицей и ядром в прилегающей к ядру области изменяются обратно пропорционально квадрату расстояния, автор получил соотношение, связывающее число рассеянных на некоторый угол α -частиц с зарядом ядра и энергией α -частицы. Под влиянием центрального силового поля α -частица описывает гиперболическую орбиту вокруг ядра, и величина отклонения частицы зависит от степени приближения ее к ядру. Из полученных таким образом данных по рассеянию α -частиц было сделано заключение, что результирующий заряд ядра приблизительно равен $\frac{1}{2}$, где A – атомный вес, e – фундаментальная единица заряда. Гейгер и Марсден [3] провели серию тщательных экспериментов для проверки справедливости этой теории и подтвердили основные выводы. Они нашли, что заряд ядра примерно равен $\frac{1}{2}$, но в силу специфики этих экспериментов точность определения его величины составляет около 20%. Дарвин [4] разработал полностью теорию отклонения α -частицы и ядра с учетом массы ядра и показал, что результаты экспериментов Гейгера и Марсдена в случае действия центральных сил не могут быть согласованы ни с одним законом, кроме закона обратной пропорциональности квадрату расстояния. Таким образом, в опытах по рассеянию α -лучей идея ядерного строения атомов нашла сильное подтверждение.

Так как атом электрически нейтрален, то число внешних электронов, окружающих ядро, должно быть равно числу единиц общего заряда ядра. Следует отметить, что на основании исследования рассеяния X-лучей легкими элементами Баркла [5] в 1911 г. показал, что число электронов должно быть примерно равно половине атомного веса. Этот вывод был сделан на основе теории рассеяния Дж.Дж. Томсона, в которой предполагается, что каждый внешний электрон в атоме действует как независимая рассеивающая единица.

Таким образом, два совершенно различных метода дали одинаковые результаты относительно числа внешних электронов в атоме. Рассеяние α -лучей, кроме того, еще показало, что положительный заряд должен быть сконцентрирован в массивном ядре малых размеров. Ван-ден-Брок [6] высказал мысль, что рассеяние α -частиц атомами не противоречит возможности того, что заряд ядра равен атомному номеру атома, т.е. номеру места, занимаемого данным атомом, когда элементы расположены в порядке возрастания их атомных весов. Важное значение атомного номера для характеристики свойств атома было выяснено в замечательной работе Мозли [7] о спектрах X-лучей элементов. Он показал, что частота колебаний соответствующих линий в спектрах X-лучей элементов зависит от квадрата числа, которое изменяется на единицу при после-

довательном переходе от элемента к элементу. Это соотношение можно объяснить, предположив, что при переходе от атома к атому ядерный заряд изменяется на единицу и что он именно равен атомному номеру. Кстати, я должен подчеркнуть, что большое значение работы Мозли заключается не только в определении числа возможных элементов и положения неизвестных элементов, но и в установлении того факта, что свойства атомов определяются числом, которое изменяется на единицу при переходе от атома к атому. Это дает нам новый метод изучения периодической системы элементов, так как атомный номер или равный ему заряд ядра имеет более фундаментальное значение, нежели атомный вес. В работе Мозли частота колебаний атома не точно пропорциональна N (N – атомный номер), а $(N - a)^2$, где a – постоянная, зависящая от того, какая из серий характеристических излучений элементов (K - или L -серия) измеряется. Предполагают, что эта константа зависит от числа и положения электронов вблизи ядра.

Заряд ядра

Вопрос о том, является ли атомный номер элемента действительной мерой его ядерного заряда, настолько важен, что для разрешения его должны быть применены любые возможные методы. В настоящее время в Кавендишской лаборатории ведется несколько исследований с целью проверки этого соотношения. Два наиболее прямых метода основаны на изучении рассеяния быстрых α - и β -лучей. Первый метод применяет Чадвик, который внес ряд новых приемов; вторым пользуется Кроусер. Полученные до сих пор Чадвиком результаты вполне подтверждают идентичность атомного номера с ядерным зарядом в пределах возможной точности эксперимента – около 1%.

Таким образом, ясно, что мы имеем серьезные основания утверждать, что ядерный заряд численно равен атомному номеру элемента. Между прочим, эти результаты, а также работа Мозли показывают, что в окружающей ядро области достаточно точно выполняется закон обратной пропорциональности квадрату расстояния. В высшей степени интересно найти размеры этой области, так как они дают нам определенные сведения о расстояниях внутренних электронов от ядра. С этой точки зрения важная информация должна быть получена от сравнения рассеяния быстрых и медленных β -лучей. Согласно эксперименту и теории,

при рассеянии α -лучей между 5 и 150° следует, что в случае тяжелых элементов вроде золота закон обратной пропорциональности квадрату расстояния выполняется точно для расстояний примерно между $36 \cdot 10^{-12}$ и $3 \cdot 10^{-12}$ см от центра ядра. Следовательно, можно сделать вывод, что в этой области если и имеются электроны, то в малом количестве.

При прямом столкновении с атомом золота (ядерный заряд 79) α -частица поворачивает назад на расстояние $3 \cdot 10^{-12}$ см от ядра. Это указывает, что даже на столь коротких расстояниях ядро можно рассматривать как точечный заряд. Продвинуться дальше в вопросе о размерах ядра тяжелых атомов мы не сможем до тех пор, пока у экспериментаторов в распоряжении не будет более быстрых α -частиц. Однако, как мы увидим дальше, в случае более легких атомов, когда α -частицы могут подходить ближе к ядру, ситуация более обнадеживающая.

Вряд ли необходимо подчеркивать большое значение ядерного заряда для характеристики физических и химических свойств элемента, так как совершенно очевидно, что число и распределение внешних электронов, от которых зависит большинство физических и химических свойств, обусловлено общим зарядом ядра. Как это следует из теоретических соображений и подтверждается экспериментально, истинная масса ядра оказывает незначительное влияние на расположение внешних электронов и их колебания.

Поэтому вполне возможно представить себе существование элементов с совершенно одинаковыми физическими и химическими свойствами, но с разными массами, так как при одном и том же ядерном заряде могут существовать различные устойчивые комбинации единиц, из которых построено сложное ядро. Следовательно, зависимость свойств атома от заряда его ядра, а не от массы дает рациональное объяснение существования изотопов, физические и химические свойства которых могут быть совершенно неразличимыми, тогда как массы могут варьироваться в определенных пределах. Этот важный вопрос мы рассмотрим в дальнейшем более подробно, когда будем говорить о природе структурных единиц, из которых построено ядро.

Таким образом, общая проблема строения атома, естественно, распадается на две части:

- 1) строение самого ядра;
- 2) распределение и способы колебания внешних электронов.

Сегодня я не собираюсь касаться второго вопроса, так как это необычайно обширная тема, и здесь есть широкое поле для различных

мнений. Эта сторона проблемы первоначально изучалась Бором и Никольсоном, которые сделали значительный шаг вперед. Недавно Зоммерфельд и другие с большим успехом применили общий метод Бора для объяснения тонкой структуры спектральных линий и сложных типов колебаний простых атомов, наблюдающихся при эффекте Штарка. Недавно Ленгмюр и другие изучали проблему распределения внешних электронов с химической точки зрения и подчеркнули важность допущения более или менее кубического расположения электронов в атоме. Не подлежит сомнению, что каждая из этих теорий имеет определенную сферу приложения, однако на сегодня наши знания слишком скудны, чтобы согласовать между собой очевидные различия в этих теориях.

Сегодня я намереваюсь обсудить довольно подробно эксперименты, проведенные для выяснения вопроса о строении и устойчивости ядер некоторых простых атомов. Из изучения радиоактивности известно, что ядра радиоактивных элементов частично состоят из ядер гелия с зарядом 2. Кроме того, у нас имеются серьезные основания считать, что ядра атомов наряду с положительно заряженными частицами содержат также и электроны и что положительный заряд ядра соответствует избытку общего положительного заряда над отрицательным. Интересно отметить совершенно различную роль, которую играют электроны вне атома и внутри него. В первом случае они располагаются на расстоянии от ядра, которое, несомненно, определяется главным образом зарядом ядра и взаимодействием их собственных полей. Внутри ядра электроны образуют очень тесное и прочное объединение с положительно заряженными единицами, и, насколько нам известно, именно вне ядра они находятся в неустойчивом состоянии. Каждый внешний электрон, несомненно, взаимодействует с ядром как точечный заряд, тогда как о внутреннем электроне этого сказать нельзя. По-видимому, внутренние электроны под влиянием огромных сил сильно деформируются и силы в этом случае могут совершенно отличаться от тех сил, которые можно ожидать для недеформированного электрона, как, например, вне ядра. Быть может, поэтому электрон может играть столь различную роль в этих двух случаях и даже образовывать стабильные системы.

В ядерной теории обычно предполагается, что электрические силы и заряды играют преобладающую роль в формировании структуры внутренних и внешних частей атома. Значительный успех этой теории в объяснении фундаментальных явлений служит указанием общей справедливости этой точки зрения. В то же время, если электроны и составляющие ядро части находятся в движении, то должны возникать магнитные поля, которые следует принимать во внимание во всякой полной

теории атома. В первом отношении магнитные поля надо считать скорее вторичным, нежели первичным, фактором, несмотря на то, что эти поля могут играть существенную роль в условиях равновесия атома.

Размеры ядер

Мы видели, что в случае атомов с большим ядерным зарядом даже самая быстрая α -частица не может проникнуть в саму структуру ядра, так что мы можем лишь оценить его максимальные размеры. Однако в случае легких атомов, когда заряд ядра мал, при прямом столкновении α -частица приближается так близко к ядру, что мы можем оценить его размеры и составить некоторое представление о действующих силах. Наилучшим образом это видно в случае прямого столкновения α -частицы с атомом водорода. В этом случае Н-атом приходит в столь быстрое движение, что он проходит в четыре раза больший путь, чем сталкивающаяся с ним α -частица, и может быть зарегистрирован по сцинтилляции, вызываемой им на экране из сернистого цинка [8]. В работе [9] я показал, что эти сцинтилляции обусловлены атомами водорода, несущими единичный положительный заряд и летящими со скоростью, которую следует ожидать по простой теории столкновений, т.е. со скоростью в 1.6 раза большей скорости α -частицы. Соотношение между числом и скоростью этих Н-атомов совершенно отлично от того, которое следовало ожидать, если рассматривать α -частицу и Н-атом как точечные заряды на данном расстоянии. В результате столкновения с быстрыми α -частицами получают Н-атомы, которые с почти одинаковыми скоростями летят по направлению налетающих α -частиц. Отсюда было выведено, что закон обратной пропорциональности квадрату расстояния становится несправедливым, когда ядра приближаются друг к другу на расстояние, меньшее $3 \cdot 10^{-13}$ см. Это служит указанием на то, что ядра имеют размеры этого порядка величины и что силы между ядрами очень быстро меняются по величине и направлению при сближении на расстояние, сравнимые с обычно принятыми размерами диаметра электрона. Было указано, что при таких близких столкновениях между ядрами развиваются огромные силы и что, возможно, при столкновении структура ядер претерпевает значительную деформацию. Тот факт, что ядро гелия, которое, как можно предполагать, состоит из четырех Н-атомов и двух электронов, выдерживает это столкновение, сви-

детельствует о чрезвычайной устойчивости его структуры. Аналогичные результаты [10] наблюдались при столкновении α -частиц с атомами азота и кислорода. И в этом случае атомы отдачи вылетали главным образом вперед, в направлении α -частицы, а область, где развивались особые силы, имела тот же порядок величины, что и в случае столкновения α -частицы с водородом.

Не подлежит сомнению, что пространство, занятое ядром, и расстояния на которых силы становятся необычными, возрастают вместе со сложностью структуры ядра. Следует ожидать, что Н-ядро должно быть наиболее простым из всех, и если это положительный электрон, то оно может иметь чрезвычайно малые размеры по сравнению с отрицательным электроном. При столкновениях с Н-атомами α -частицы следует рассматривать как более сложные структуры.

Диаметр ядер легких атомов, за исключением водорода, имеет, по видимому, порядок величины $5 \cdot 10^{-13}$ см, и при близких столкновениях ядра приходит почти в контакт, а, быть может, их структуры даже проникают одна в другую. Можно предполагать, что в этих условиях столкновение выдержат только очень устойчивые ядра, так что весьма интересно исследовать возможность распада ядра.

Длиннопробежные частицы, возникающие в азоте

В предыдущих статьях [9] [10] я описал явления, происходящие при тесных столкновениях быстрых α -частиц с легкими атомами вещества, чтобы определить, не могут ли подвергаться разложению ядра некоторых легких атомов под влиянием огромных сил, развивающихся при столь тесных столкновениях. Было показано, что при прохождении α -частиц через сухой азот возникают быстрые частицы, весьма напоминающие по яркости сцинтилляций и по дальности проникновения атомы водорода, приведенные в движение в результате столкновения с α -частицами. Далее было показано, что эти быстрые атомы, которые появляются только в сухом азоте, но не в кислороде или двуокиси углерода, не могут быть приписаны присутствию водяного пара или другого вещества, содержащего водород, и должны возникать при столкновении α -частицы с атомами азота. Число таких сцинтилляций, вызванных азотом, было мало (примерно 1 : 12 соответствующего числа в водороде), но

оно было в два или в три раза больше числа естественных сцинтилляций источника. В среднем число наблюдавшихся в азоте сцинтилляций было равно числу сцинтилляций, которые наблюдались, когда водород при давлении примерно 6 см примешивался к кислороду или двуокиси углерода при нормальном давлении.

Хотя в основном результаты указывали на то, что эти длиннопробежные атомы из азота представляют собой заряженные атомы водорода, первые эксперименты по определению массы этих частиц путем отклонения в сильном магнитном поле не привели к определенным результатам.

На основании данных моей предыдущей работы [10] можно построить несколько теорий относительно этих частиц. Вычисленная длина пробега однозарядного атома, приведенного в движение в результате столкновения в α -частицей с пробегом в воздухе R см, имеет следующие значения:

Масса	1	2	3	4
Пробег R , см	3.91	4.6	5.06	4.0

Вследствие малого числа и слабости сцинтилляций, в этих экспериментах пробег быстрых атомов из азота не мог быть измерен с точностью, достаточной, чтобы сделать определенный выбор между предполагаемыми теориями. Некоторые из моих корреспондентов указывали на вероятность того, что эти частицы были просто первоначальные α -частицы, потерявшие один из своих зарядов, т.е. атомы с зарядом 1 и массой 4. Однако, вероятно, нет никаких веских оснований считать, что из всех исследованных элементов именно азот должен быть тем единственным элементом, в котором прохождение быстрых α -частиц приводит к захвату одного электрона.

Однако, если бы условия эксперимента позволили получить достаточно число сцинтилляций, было бы нетрудно выбрать одну из этих различных возможностей, исследуя отклонение быстрых атомов в магнитном поле. Величина отклонения заряженных атомов магнитным полем, перпендикулярном к направлению их полета, пропорциональна e/mv . Предполагая, что эти частицы высвобождаются при прямом столкновении с α -частицей, легко вычислить относительные значения этой величины для различных масс. Если принять величину MV/E для α -частицы за единицу, то значение mv/e для атомов с зарядом 1 и массой 1, 2, 3 и 4 соответственно будут равны 1.25; 0.75; 0.58; и 0.50. Следовательно, Н-атомы должны отклоняться больше, чем α -частицы, под дей-

ствием которых они возникают, между тем как атомы с массой 2, или 3, или 4 будут отклоняться труднее, чем первоначальные α -частицы.

После прибытия в Кембридж я приступил к решению этой задачи различными путями. За счет подбора объектива с большой апертурой удалось увеличить яркость сцинтилляций, и тем самым стало легче их считать. Кроме того, был проведен ряд экспериментов по получению более мощных источников излучения на основе имеющегося в моем распоряжении радия. Однако в конце концов по причинам, которые нет нужды здесь обсуждать, оказалось, что лучше всего получить активный источник излучения в виде радия С способом, описанным в моей предыдущей работе. После некоторого числа наблюдений с твердыми соединениями азота (мы говорим о них ниже) был выработан метод оценки масс частиц, возникающих из азота в газообразном состоянии. Употребление для этой цели собственно газа имело несколько преимуществ перед использованием твердого соединения азота, так как не только возросло число сцинтилляций, но можно было быть уверенным также в отсутствие водорода или водородных соединений.

Окончательная схема эксперимента показана на рис. 1. Главная особенность заключается в применении широкой щели, через которую проходили α -частицы. Как показали эксперименты, отношение числа связанных с газом сцинтилляций к числу естественных сцинтилляций от источника быстро возрастает с увеличением ширины щели. Для пластинок, расположенных на расстоянии 1 мм одна от другой, это отношение было меньше единицы, тогда как при расстоянии между ними 8 мм оно имело значение от 2 до 3. Такую зависимость следует ожидать по теоретическим соображениям в том случае, если большинство частиц вылетает по направлению полета α -частиц.

Горизонтальные пластины имели 0.6 см в длину, 1.5 см в ширину и были расположены на расстоянии 8 мм одна от другой. На одном конце помещался источник – активный осадок радия, а вблизи другого – экран из сернистого цинка. Подставки для источника и щели были установлены в прямоугольном латунном ящике, через который во избежание радиоактивного загрязнения непрерывно пропусклся сухой воздух или другой газ. Ящик устанавливался между полюсами большого электромагнита

так, чтобы равномерное поле было параллельно плоскости пластин и перпендикулярно их длине. Между экраном и концом пластинок дополнительно вставляли наконечник D длиной 1.2 см для увеличения отклонения выходящих из щели частиц. Экран из сернистого цинка S устанавливался на стеклянной пластинке, закрывавшей с одного кон-

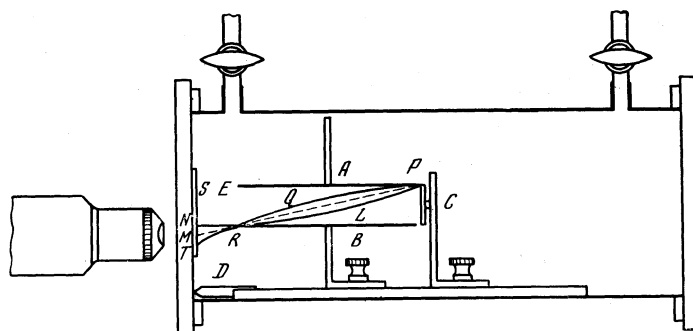


Рис. 1:

ца ящик; расстояние между экраном и источником было равно 7.4 см. Атомы отдачи из кислорода или азота с пробегом 9 см могли задерживаться алюминиевым экраном с тормозной способностью около 2 см воздуха, который устанавливался в конце щели.

При такой ширине щели нельзя было отклонить широкий пучок излучения в сторону, но измерялась величина отклонения излучения, проходящего вблизи нижнего края щели. Для этого важно было наблюдать сцинтилляции в определенном месте экрана вблизи точки . Метод фиксации положения счетного микроскопа заключался в следующем: источник C устанавливался на своем месте, и объем откачивался до давления в несколько сантиметров. В отсутствие поля нижний край пучка определялся прямой линией , пересекающей экран в точке . Микроскоп располагался так, чтобы граничная линия сцинтилляций была выше горизонтальной риски микроскопа.

При возбуждении магнита, когда лучи отклоняются вниз (назовем его $+$ полем), путь крайних α -частиц изображен кривой $PLRN$, пересекающей экран в точке N так, что граничная линия сцинтилляций смещается в поле зрения вниз. При перемене направления поля (назовем его $-$ полем) путь крайней α -частицы $PQRT$ пересекает экран в точке и полоса сцинтилляций смещается в поле зрения вверх. Напряженность магнитного поля подбиралась так, чтобы при отрицательном поле сцинтилляции наблюдались по всему экрану, а при положительном они возникали главным образом ниже горизонтальной риски. Вид поля зрения в микроскопе в этих двух случаях изображен на рис. 2, где точки примерно соответствуют плотности распределения сцинтилляций. Горизонтальные границы поля зрения создавались прямоугольным отверстием пластинки, распо-

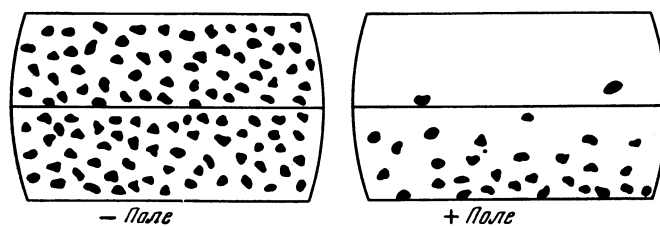


Рис. 2:

ложенной в плоскости перекрестия. Горизонтальная риска, пересекавшая поле зрения, была видна в условиях счета и позволяла, если это было нужно, считать относительное число сцинтилляций в двух половинах поля. Так как в действительности в экспериментах с азотом число сцинтилляций было слишком мало, чтобы можно было прямо отмечать границы сцинтилляций, то для оценки границы лучей необходимо было определять отношение числа сцинтилляций с + полем и - полем.

Положение микроскопа и напряженность магнитного поля в большинстве экспериментов выбирались такими, чтобы это отношение примерно равнялось 1 : 3. Предварительные наблюдения показали, что это отношение чувствительно к изменениям поля, и, таким образом, оно становится удобным методом оценки относительного отклонения лучей.

После того как положение микроскопа зафиксировано, через прибор непрерывно пропускали поток сухого воздуха. Поглощающий экран устанавливался в положение, чтобы задерживать N- и O-атомы с пробегом 9 см. Затем систематически подсчитывалось число сцинтилляций при двух направлениях поля и, если требовалось, вводилась поправка на слабое радиоактивное загрязнение экрана. Отклонение неизвестных лучей непосредственно сравнивалось с отклонением известных α -лучей. Для этого источник и поглощающий экран удалялись и на месте радиоактивного источника ставилась такая же пластинка, покрытая небольшим количеством активного осадка тория. Испущенные торием C α -частицы с пробегом 8.6 см, пройдя в воздухе расстояние 7.4 см, создавали на экране яркие сцинтилляции. Как и раньше, определялось отношение числа сцинтилляций при + и - полях.

Ниже дан пример подобного сравнения. При токе 4.0 а через обмотки электромагнита это отношение частиц, испущенных из азота, равнялось 0.33. Соответствующее отношение для α -частиц, испущенных торием C, было равно 0.44 при токе 4а и 0.31 при токе 5а. Отсюда видно, что в среднем частицы из азота отклоняются в данном поле больше, чем

α -частицы из тория С. Однако, чтобы провести количественное сравнение, необходимо принять во внимание уменьшение скорости лучей при прохождении через воздух. Величина tu/e для α -лучей тория С с пробегом 8.6 см, как известно, равна $4.28 \cdot 10^5$. Поскольку лучи, прежде чем попасть на экран, проходят в однородном поле 7.4 см воздуха, то можно вычислить, что истинное отклонение соответствует в вакууме α -лучам, для которых величина $tu/e = 3.7 \cdot 10^5$. Если считать, что отклонение α -частиц при токе 4.8 а то же самое, что и для частиц из азота при токе 4 а (отношение полей 1.17), то среднее отклонение азотных частиц в условиях данного опыта соответствует лучам в вакууме, для которых величина tu/e равна $3.1 \cdot 10^5$.

Если принять во внимание, что частицы возникают во всем объеме газа между пластинками, что их распределение неизвестно и что частицы в среднем вылетают вперед под некоторым углом к направлению падающих α -частиц, то экспериментальных данных совершенно недостаточно для того, чтобы вычислить среднюю величину tu/e для какой бы то ни было массы выбрасываемых частиц. По-видимому, большинство частиц, которые вызывают сцинтилляции, возникает в первых нескольких сантиметрах воздуха возле источника. Действительное отклонение данной частицы магнитным полем зависит от расстояния места ее возникновения от источника. Эти факторы, очевидно, приведут к уменьшению среднего отклонения частиц по сравнению с той величиной, которую имело бы отклонение, если бы частицы вылетали с постоянной скоростью из самого источника. Допуская, что поправка на уменьшение скорости длиннопробежных частиц при прохождении через воздух составляет 10%, получим, что среднее значение tu/e примерно равно $3.4 \cdot 10^5$. Так как величина MV/E для α -частиц, испущенных радием С, равна $3.98 \cdot 10^5$, то при данных условиях эксперимента среднее значение tu/e для азотных частиц меньше, чем для α -частиц, которые их создают.

Из приведенных далее в статье данных следует, что это может быть только в том случае, если масса частицы сравнима с массой атома водорода, так как однократно заряженные частицы с массой 2, 3 или 4 должны испытывать меньшие отклонения, чем α -частицы. Например, если мы предположим, что эти частицы есть атомы гелия с одним зарядом, то следует ожидать, что они будут отклоняться примерно вдвое меньше, чем α -частица. Таким образом, результаты экспериментов служат весьма веским доказательством того, что освобождаемые из азота частицы есть атомы водорода.

Однако еще более убедительное доказательство этого факта можно

получить, сравнив отклонение азотных частиц с отклонениями Н-атомов при одинаковых условиях. Для этого в газгольдере была собрана смесь примерно одного объема водорода с двумя объемами углекислого газа, и эта смесь вместо воздуха пропусклась через прибор. Такая пропорция газов была выбрана для того, чтобы тормозная способность смеси для α -частиц была такая же, как у воздуха. При этих условиях Н-атомы, подобно азотным частицам, возникали во всем объеме газа, и, вероятно, относительное распределение Н-атомов вдоль пути α -лучей не сильно отличалось от соответствующего распределения азотных частиц. Если азотные частицы – это Н-атомы, то мы должны ожидать, что среднее отклонение их будет примерно таким же, как и для Н-атомов, высвобождаемых из водородной смеси. ряд тщательных опытов показал, что отношения чисел сцинтилляций при + и – полях одинаковой величины в обоих случаях были настолько близки, что нельзя было экспериментально различить эти случаи. Так как и в одном и другом случае эксперименты проводились, насколько это возможно, в идентичных условиях, то равенство отношений показывает, что высвобождаемые из азота длиннопробежные частицы есть атомы водорода. Вероятность, что эти частицы обладают массой 2, 3 или 4, определено исключается.

В предыдущей работе я показал, что длиннопробежные частицы, наблюдаемые в сухом воздухе и чистом азоте, должны возникать из самих атомов азота. Следовательно, ясно, что некоторые атомы азота разрушаются при столкновении с α -частицами и что при этом возникают быстрые атомы положительно заряженного водорода. Отсюда следует сделать вывод, что заряженный атом водорода есть один из компонентов ядра азота.

Хотя давно уже известно, что гелий – продукт самопроизвольного превращения некоторых радиоактивных элементов, вопрос о возможности разрушения структуры стабильных атомов искусственными методами оставался открытым. Здесь впервые было получено доказательство, что водород есть один из компонентов ядра азота.

Нельзя забывать, что количество распадов, возникающих в азоте под действием частиц, чрезвычайно мало. В среднем, вероятно, лишь одна α -частица из 300000 может подойти достаточно близко к ядру азота, чтобы освободить атом водорода с энергией, достаточной для его регистрации методом сцинтилляций. Если бы даже все α -излучение из 1 г радия поглотилось газообразным азотом, объем высвободившегося водорода составлял бы всего $1/300000$ объема гелия, образованного его α -частицами, т.е. был бы равен примерно $5 \cdot 10^{-4}$ мм³ в год. Возможно, что при столкновении α -частицы с ядром может высвободиться

водород со скоростью, недостаточной для регистрации методом сцинтилляций. Если это окажется так, то количество распадов может быть намного больше приведенной величины.

Эксперименты с твердыми соединениями азота

Опишем теперь вкратце эксперименты с твердыми соединениями азота. Поскольку высвобождение частиц из азота представляет собой чисто атомное явление, то следует ожидать, что подобные частицы должны высвобождаться также из соединений азота в количестве, пропорциональном содержанию азота. Чтобы это проверить, а также изучить природу этих частиц, были исследованы некоторые соединения, богатые азотом. Для этого я использовал следующие вещества, приготовленные со всей возможной тщательностью, чтобы исключить присутствие водорода в какой бы то ни было форме:

1) нитрид бора, любезно приготовленный для меня В. Дж. Шатгом в Манчестерском университете;

2) нитрид натрия, титана и парацан, любезно приготовленные для меня Вильямом Поупом и его ассистентами.

Прибор в этих экспериментах был подобен изображенному на рис. 1, с той лишь разницей, что длина пластинок достигала 4 см. Материал в виде порошка насыпался по возможности равномерно при помощи сита на алюминиевую пластинку площадью 2 см^2 . Вес алюминиевой пластинки составлял около 6 мг/см^2 , и обычно на 1 см^2 приходилось от 4 до 5 мг вещества. Тормозная способность алюминиевой пластинки для α -частиц соответствовала примерно 3.4 см воздуха, а материал брался в таком количестве, что его тормозная способность в среднем была примерно такая же, как и для алюминия. Чтобы вещество пристало к пластинке, вначале наливался слой спирта, затем быстро насыпалось вещество и пластинка просушивалась.

Опыт показал, что при таком применении спирта заметной примеси водорода не вводилось. Экран из сернистого цинка устанавливался вне камеры непосредственно за алюминиевой пластинкой с тормозной способностью, эквивалентной 5.2 см воздуха, закрывавшей отверстие в конце латунного ящика. Алюминиевая пластинка с веществом располагалась затем так, что закрывала конец щели, обращенной к источнику,

причем принимались необходимые меры, чтобы не стряхнуть вещество. Воздух откачивался, и считалось число сцинтилляций при двух положениях пластинки: 1) когда вещество было обращено к источнику и 2) когда пластинка была перевернута и вещество обращено к щели.

В первом случае α -частицы попадали прямо в исследуемое вещество; во втором случае α -частицы попадали на вещество лишь после того, как их пробег уменьшался примерно на половину, когда их способность освобождать быстрые атомы значительно уменьшалась. Преимущество этого метода в том, что он избавляет от необходимости вводить поправку на неодинаковое поглощение Н-частиц источником в различных экспериментах.

Таким способом было обнаружено, что все исследованные соединения азота давали большое число сцинтилляций в первом положении. Природа этих частиц была исследована таким же методом, как и в случае азота. Кроме того, было проверено непосредственное сравнение отклонения этих частиц с отклонениями Н-атомов, высвобожденных из парафиновой пленки, установленной вместо азотных соединений. Все опыты показали, что частицы отклоняются так же, как и Н-атомы из парафина, причем не было обнаружено следов частиц с массой 2, 3 или 4.

Для пленок с одинаковой средней тормозной способностью для α -лучей можно легко подсчитать по правилу Брэгга, что относительная тормозная способность азота в соединениях будет 0.67 для VN, 0.74 для C_2N_2 и 0.40 для нитрида циана, если тормозную способность нитрида натрия принять за единицу. Так как выбрасывание длиннопробежных азотных частиц должно быть атомным явлением, то следует ожидать, что число сцинтилляций за вычетом поправки на естественный фон источника должно быть пропорционально приведенным выше относительным значениям тормозной способности. Наблюдения с нитридами титана и натрия вполне подтвердили это, и число длиннопробежных азотных частиц было в правильном соотношении и примерно таким, как можно было ожидать из опытов с газообразным азотом.

С другой стороны, нитрид бора и парацан дали примерно в полтора – два раза большее число частиц, чем ожидалось теоретически. В этих опытах были приняты все меры, чтобы избежать присутствия водорода или водяных паров. Перед употреблением алюминиевые пластинки прогревались в откаченной кварцевой трубке в электрической печи почти до точки плавления, чтобы выделить водород и другие газы. Исследуемые пленки хранились в эксикаторе и прогревались в электрической печи перед тем, как переносились в прибор. Было проведено несколько контрольных опытов с препаратами, не содержащими азот, например с

чистым графитом и кремнеземом, которые любезно изготовил для меня Вильям Поуп. В обоих случаях число сцинтилляций, наблюдавшихся, когда вещество было обращено к источнику α -лучей, было меньше, чем в том случае, когда пластинка переворачивалась. Это указывает на то, что некоторое количество Н-атомов высвобождается из прогретого алюминия под действием α -лучей. Таким образом, контрольные эксперименты дали вполне удовлетворительные результаты, так как показали, что Н-атомы не появляются в веществах, не содержащих азот. В то же время видно, что Н-атомы не возникают в заметных количествах из углерода, кремния или кислорода.

Повышенный эффект в нитриде бора и парациане, естественно, заставляет подозревать, что эти препараты содержат некоторое количество водорода, несмотря на принятые меры предосторожности. В случае нитрида бора пока неизвестно, не испускает ли Н-атомы сам бор. Это обстоятельство еще не исследовано. Ввиду такой неопределенности эксперименты с твердыми соединениями азота были временно отложены, и проводились уже описанные эксперименты с газообразным азотом.

Интересно отметить, что для получения того числа Н-атомов, которое наблюдалось в этих соединениях, необходимо значительное загрязнение их водородом. Так, в случае нитрида натрия на 1 г вещества должно приходиться по крайней мере 50 см³ водорода. Я склонен думать, что Н-атомы, высвобождаемые α -лучами из нитрида натрия, главным образом, если не полностью, обусловлены азотом, а в случае парациана часть эффекта, по видимому, вызвана примесью водорода или какого-либо его соединения. Впоследствии я надеюсь исследовать этот вопрос более детально.

Короткопробежные атомы, возникающие в кислороде и азоте

Кроме длиннопробежных Н-атомов, высвобождаемых из азота в результате прохождения α -частиц через кислород и азот, в гораздо больших количествах возникают быстрые атомы, имеющие в воздухе пробег около 9.0 см, тогда как побег налетающих α -частиц 7.0 см. Метод измерения пробега и числа этих атомов был изложен в моей предыдущей работе. [10] Там показано, что эти атомы возникают при прохождении α -частиц через газ. Как раз за пределами пробега α -частиц, испуска-

емых радием С, эти сцинтилляции оказались ярче тех, которые обусловлены Н-атомами, и больше походили на сцинтилляции, вызванные α -частицами.

Ввиду отсутствия определенной информации о природе этих атомов, было сделано предварительное предположение, что это атомы кислорода или азота, несущие один заряд и приведенные в быстрое движение в результате близкого столкновения с α -частицами, так как наблюдаемый пробег этих частиц приблизительно совпадал с пробегом, вычисленным на основе такого предположения. В то же время было указано, что совпадение пробегов атомов кислорода и азота весьма неожиданно, так как предполагалось, что пробег более быстрых N-атомов должен быть на 19% больше пробега более медленных O-атомов. Представлялось возможным, что эти быстрые атомы могут оказаться осколками распавшихся атомов, однако до самого последнего времени я не видел способа решить этот вопрос. ¹

Как только применение широкой щели увенчалось успехом при решении вопроса о природе длиннопробежных частиц из азота, и тем же самым прибором и тем же самым методом были проведены опыты по выяснению природы короткопробежных частиц из азота и кислорода.

Прежде всего рассмотрим относительное отклонение, которое можно ожидать для O-атома, приходящего в движение в результате прямого столкновения с α -частицей. Скорость O-атома после соударения равна $2/5V$, где V – скорость налетающей α -частицы. Величина mu/e для O-атома с единичным зарядом, как легко видеть, должна быть в 3.1 раза больше, чем для α -частицы перед столкновением. Следовательно, O-атом с единичным зарядом отклонить намного труднее, чем α -частицу; то же самое будет даже тогда, когда его заряд равен 2.

Для проверки этих двух фактов использовался тот же прибор, что изображен на рис. 1. Источник находился на расстоянии 7.4 см от экрана из сернистого цинка; как и раньше, для увеличения отклонения лучей применялись наконечники длиной 1.2 см. Во избежание радиоактивного заражения экрана в течение эксперимента через прибор медленно циркулировал сухой воздух или кислород. В случае кислорода наблюдаемые на экране сцинтилляции были обусловлены O-атомами и немного H-атомами из источника. В случае воздуха сцинтилляции частично вызывались N-атомами и частично O-атомами и H-атомами из источника и азота. Истинное число короткопробежных N-атомов, по-видимому, было

¹В ноябре 1919 г. в письме ко мне Г. Фулчер (National Research Council, USA) высказал предположение, что эти атомы, возможно α -частицы

меньше числа О-атомов в аналогичных условиях.

Положение микроскопа фиксировалось, как и прежде, так, чтобы получилось подходящее отношение числа сцинтилляций при перемене направления магнитного поля. Это отношение зависело от положения микроскопа и в наших экспериментах колебалось между 0.2 и 0.4.

Сразу же стало очевидно, что атомы из кислорода не отклонялись меньше, чем α -частицы, как это должно было быть, если бы они были О-атомами, а отклонялись как раз *больше*. Это обстоятельство сразу же исключило возможность того, что мы имеем здесь дело с атомами кислорода, несущими один или два заряда. Так как гелий выбрасывается при столь многих радиоактивных превращениях, то можно было ожидать, что он представляет собой один из компонентов легких атомов и освобождается при интенсивном столкновении. Однако отклонение атомов, возникающих из кислорода, было значительно больше того, которое можно объяснить таким образом. Чтобы выяснить этот вопрос, в конце экспериментов с кислородом вместо радиевого источника α -частиц был поставлен источник, полученный экспозицией пластины, в эманации тория, и таким же способом исследовалось отклонение α -лучей, испущенных торием С, с пробегом 8.6 см. Если бы α -частицы выбрасывались из О-атомов вблизи от источника, то они отклонялись бы так, как и α -частицы с пробегом 9.0 см; если же они образуются в конце пробега α -лучей, величина отклонения не должна быть больше отклонения α -частиц с пробегом 7.0 см, т.е. примерно на 9% больше, чем в первом случае. Даже если предположить, что частицы высвобождаются равномерно вдоль всего пути α -частиц и движутся в том же направлении, что и налетающие частицы, среднее отклонение пучка не должно отличаться более чем на 5% от величины отклонения α -частиц, испущенных торием С. Если, что кажется вероятным, отдельные атомы вылетают под некоторым углом к направлению падающих α -частиц, среднее отклонение должно быть еще меньше, и, по всей вероятности, меньше, чем у α -частиц, испущенных торием С. В действительности наблюдаемое отклонение было примерно на 20% больше. Это свидетельствует о том, что гипотеза, по которой атомы из кислорода представляют собой заряженные атомы гелия, совершенно неверна.

Если бы атомы из кислорода были Н-атомами, они отклонялись бы больше, чем α -частицы, но тогда их максимальный пробег был бы равен 28 см, а не наблюдавшемуся пробегу 9 см. Таким образом, ясно, что масса этих атомов должна лежать в диапазоне от 1 до 4, тогда как из рассмотрения пробега частиц и величины отклонения видно, что они несут две единицы заряда.

Чтобы прийти к более определенному выводу, непосредственно сравнивалось отклонение О-атомов в положительном и отрицательном полях определенной величины с отклонением Н-атомов из смеси водорода и углекислого газа, взятых по объему в отношении 1 : 2. Чтобы полностью поглотить О-атомы из CO_2 , перед экраном из сернистого цинка устанавливался алюминиевый листок, так что полное поглощение между источником и экраном соответствовало 9 см воздуха. В обоих экспериментах исследуемые атомы возникали в газе между пластинками, и, вероятно, относительное распределение их вдоль пути α -лучей в обоих случаях заметно не отличалось.

Искомые отношения при перемене направления поля в обоих опытах оказались примерно одинаковыми, но в среднем по нескольким опытам отклонение Н-атомов было немного больше, чем атомов, возникающих из кислорода. По результатам нескольких опытов был сделан вывод, что разница в отклонении в среднем не превышает 5%, хотя по характеру наблюдений трудно было фиксировать эту разницу сколько-нибудь определенно.

На основании этих данных и пробегов атомов из кислорода в воздухе можно вычислить массу частиц, высвобождаемых из кислорода.

Пусть m – масса атома кислорода, u – его максимальная скорость вблизи от источника, e – заряд, M , V , E – соответствующие величины для налетающих α -частиц, а m' , u' , e – для Н-атомов, высвобождаемых вблизи источника.

Скорость частиц из кислорода с пробегом 9 см при прохождении их через слой кислорода между источником и экраном толщиной 7.4 см непрерывно уменьшается. Отсюда легко подсчитать, что их среднее отклонение в магнитном поле пропорционально $1.14 E/mu$, а не E/mu , как в вакууме.

Точно так же отклонение Н-атомов пропорционально $1.05 e/m' u'$, причем в этом случае поправка на изменение скорости меньше и оценивается примерно в 5%. Мы видели, что экспериментальные результаты указывают на то, что атомы, возникающие в азоте, отклоняются примерно на 5% меньше, чем Н-атомы. Следовательно,

$$1.14E/mu = \frac{1.05}{1.05} \cdot e/m'u' = 1.25 \cdot E/mV,$$

или

$$1.14MV = 1.25mu, \quad (1)$$

поскольку вычислено и проверено экспериментально, что отклонение Н-атомов в магнитном поле в 1.25 раза больше отклонения α -частицы,

приводящей его в движение (см. статью II [9]). В статье III [10] я указал причины, в силу которых надо считать, что пробег массы m , имеющей начальную скорость и несущей двойной заряд, определяется формулой

$$\frac{x}{R} = \frac{m}{M} \cdot \left(\frac{u}{V}\right)^3,$$

где R – пробег α -частицы, обладающей массой m и скоростью V . Поскольку $x = 9.0$ см для атомов, вылетающих из кислорода при столкновении с α -частицами, испущенными радием С и имеющими пробег $R = 7$ см, то

$$\frac{x}{R} = 1.29;$$

полагая $M = 4$, получим

$$mu^3 = 5.16V^3. \quad (2)$$

Формула этого типа была выведена из пробега Н-атомов и есть все основания считать, что она достаточно точна при таких малых расстояниях пробега.

Из формул (1) и (2) получаем

$$u = 1.19V,$$

$$m = 3.1.$$

Если принять во внимание трудность получения точных данных, то величина 3.1 показывает, что масса атома примерно равна 3, и при дальнейших обсуждениях эту величину следует считать вероятной.

Когда вместо кислорода брался воздух, то невозможно было в этих двух случаях обнаружить какую-либо разницу в отклонении короткопробежных атомов. Поскольку в воздухе короткопробежные атомы возникают главным образом из азота, можно сделать вывод, что короткопробежные атомы, высвобождаемые при прохождении α -частиц через кислород или азот, состоят из атомов с массой 3, несущих двойной заряд, и первоначально выбрасываются со скоростью $1.19V$, где V – скорость налетающей α -частицы.

По-видимому, из полученных результатов следует однозначный вывод: атомы с массой 3 высвобождаются из атомов азота или кислорода в результате интенсивного столкновения с α -частицей. Поэтому разумно предположить, что атомы с массой 3 – это структурные компоненты как ядер кислорода, так и азота. Мы уже ранее показали, что водород также один из компонентов структуры ядра азота. Таким образом, ясно, что

распад ядра азота может произойти двумя путями: либо выбрасыванием Н-атомов, либо выбрасыванием атомов с массой 3, несущих два заряда. Поскольку этих атомов с массой 3 в 5–10 раз больше, чем Н-атомов, то, возможно, эти две формы распада независимы одна от другой и не одновременно. Учитывая, что столкновения очень редки, в высшей степени невероятно, чтобы отдельные атомы подвергались обоим типам распада.

Так как частицы, выбрасываемые из кислорода и азота, возникают не у самого источника, а вдоль пути α -частиц, трудно с желаемой точностью определить их массу и скорость. Чтобы обойти эту трудность, были сделаны попытки определения О-атомов, высвобождаемых из слюдяной пластинки, расположенной за источником. Вследствие наличия в слюде водорода, Н-атомы, падающие на экран, были так многочисленны по сравнению с О-частицами, а их отклонения при данных условиях опыта столь близки, что трудно было различить эти атомы.

Вопрос об энергии

При близких столкновениях между α -частицей и атомом законы сохранения энергии и импульса, по-видимому, остаются в силе. [11] Однако в тех случаях, когда атомы распадаются, не обязательно ожидать справедливости этих законов, если не учитывать изменение энергии и импульса атома вследствие его распада. В том случае, когда из ядер азота выбрасывается атом водорода, имеющихся данных недостаточно, чтобы судить об этом, так как мы не знаем определенно ни скорости атомов, ни скорости α -частицы после столкновения.

Если справедливо наше предположение, что из О- и Н-атомов высвобождаются атомы с массой 3, то легко подсчитать, что в результате распада должен получиться небольшой выигрыш в энергии. Если масса высвобождаемого атома точно 3, а скорость равна $1.20V$ (где V – скорость налетающей α -частицы), то

$$\frac{\text{Энергия освобожденного атома}}{\text{Энергия } \alpha\text{-частицы}} = \frac{3 \cdot 1.44}{4} = 1.08,$$

т.е. выигрыш в энергии движения составляет 8%, если даже не учитывать последующее движение распавшегося ядра и α -частицы. Эта дополнительная энергия должна заимствоваться из ядра азота или ки-

слорода точно так же, как и энергия движения α -частицы при вылете из радиоактивного атома.

Для расчета рассмотрим прямое столкновение α -частицы с атомом с массой 3. Скорость последнего равна $8/7V$, где V – скорость α -частицы, а его энергия составляет 0.96 начальной энергии α -частицы. Без сомнения, при фактическом столкновении с атомами кислорода или азота, из которых высвобождается атом с массой 3, как α -частица, так и атом с массой 3 на своем пути находятся под влиянием основного поля ядра. В обоих случаях следует ожидать, что не только α -частица отдает 0.96 своей энергии высвобождающемуся атому, но и он приобретает дополнительную энергию за счет отталкивающего поля ядра.

Поскольку строение ядра и природа сил в непосредственной близости от него нам неизвестны, то нежелательно заниматься предположениями относительно механизма столкновения на этой стадии. Однако можно получить дальнейшие сведения, изучая пути α -частиц в азоте и кислороде с помощью хорошо известного метода Вильсона. В предыдущей работе [12] я подверг анализу полученную Вильсоном фотографию, на которой имеется внезапное изменение направления пути на 43° , и маленькое ответвление в виде короткой шпоры. Было показано, что относительная длина треков α -частиц и шпоры в грубом приближении согласуется с предположением, что шпора обусловлена атомом кислорода, получившим ускорение. Это вполне вероятно, так как данные свидетельствуют о том, что атомы с массой 3 после высвобождения движутся примерно по направлению α -частицы, а косой удар может и не вызвать распад атома.

Недавно Шимицу в Кавендишской лаборатории модифицировал камеру Вильсона так, что расширения в ней могут периодически повторяться несколько раз в секунду; это позволяет наблюдать пути нескольких частиц в течение достаточного времени. В этих условиях как Шимицу, так и я сам наблюдали в нескольких случаях разветвленные пути α -частицы, в которых длины обоих треков были соизмеримы. Подобные наблюдения непосредственно глазом слишком неопределенны, чтобы можно было относиться к ним с большим доверием. Поэтому Шимицу разработал устройство для получения таких фотографий, где треки можно будет подробно исследовать, не торопясь. Таким образом, можно будет надеяться получить ценную информацию об условиях, которые определяют распад атомов, и об относительной энергии, сообщаемой трем системам, участвующим в распаде, т.е. α -частице, вылетающему атому и остаточному ядру.

Пока мы не располагаем определенной информацией об энергии α -

частицы, необходимой для того, чтобы вызвать распад, но общие данные указывают, что быстрые α -частицы с пробегом в воздухе, равном примерно 7 см, более эффективны, нежели частицы с пробегом около 4 см. Это может и не быть непосредственно связано с энергией, необходимой для того, чтобы вызвать распад самого атома; скорее всего, это связано с невозможностью более медленных α -частиц вследствие влияния отталкивающего поля приблизиться достаточно близко к ядру, чтобы разрушить его. Возможно, что истинная энергия, необходимая для распада атома, мала по сравнению с энергией α -частицы.

Если это так, то вполне возможно, что и другие агенты с меньшей энергией, чем α -частица, вызовут распад. Например, быстрый электрон может приблизиться к ядру с энергией, достаточной для распада ядра, так как он движется в притягивающем, а не отталкивающем поле, как α -частица. Точно так же проникающее γ -излучение может обладать достаточной энергией, чтобы вызвать распад. Таким образом, весьма важно проверить, могут ли распадаться азот, кислород или другие элементы под действием быстрых катодных лучей, образующихся в разрядной трубке. В отношении кислорода и азота это можно легко проверить, наблюдая после интенсивной бомбардировки соответствующего вещества электронами, не появляется ли спектр, близко напоминающий спектр гелия. Подобные эксперименты начал проводить в Кавендишской лаборатории Ишида. Чтобы быть уверенным в удалении окклюдированного гелия, который мог первоначально присутствовать в материале прибора, вакуумная трубка из специального стекла и электродов прогревается до высокой температуры. Гелий в разрядных трубках наблюдало несколько исследователей и связывало с выделением его из веществ в результате бомбардировки катодными лучами. Найти истинную причину появления гелия в этих случаях чрезвычайно трудно, однако последние достижения в технике разрядных трубок облегчают возможность дать определенный ответ на этот важный вопрос.

Свойства нового атома

Мы показали, что атомы с массой около 3 и двумя зарядами высвобождаются α -частицами как из кислорода, так и из азота, поэтому естественно предположить, что эти атомы представляют собой независимые структурные единицы обоих газов. Заряженный атом в течение своего полета,

видимо, есть ядро нового атома без внешних электронов. Поэтому можно ожидать, что, если придать этому новому атому два отрицательных электрона, он по своим физическим и химическим свойствам окажется почти идентичен атому гелия, но будет иметь массу 3, а не 4. Вполне возможно, что спектры гелия и этого изотопа должны быть практически одинаковыми, но вследствие заметной относительной разницы в массах смещение линий должно быть больше, нежели в случае изотопов тяжелых элементов вроде свинца.

Следует вспомнить, что Бурже, Фабри и Бюиссон [13] на основании изучения ширины линий в спектре туманностей сделали вывод, что этот спектр обусловлен элементом с атомной массой около 2.7, или, округляя, 3. Однако с современной точки зрения трудно предположить, что спектр так называемого “небулия” может быть обусловлен элементом с зарядом ядра 2, если только не предполагать, что при существующих в туманностях условиях спектры совершенно отличаются от наблюдаемых в лаборатории. Возможное происхождение спектра небулия подробно обсуждал Никольсон [14] в совершенно ином духе, и в настоящий момент трудно объяснить каким образом могут быть связаны новые атомы, возникающие в азоте и кислороде, с веществом туманностей.

Поскольку большая часть обычного гелия, по-видимому, непосредственно или косвенно образовалась при превращениях радиоактивных веществ, а они, насколько нам известно, всегда дают гелий с массой 4, то маловероятно обнаружить в подобных источниках изотопы гелия с массой 3. Однако в высшей степени интересно выяснить, не может ли присутствовать этот изотоп в тех случаях, когда кажущееся присутствие гелия трудно отнести за счет радиоактивного вещества; таков случай, например, берилла, на что обратил внимание Стрэтт. [15] Это все основано на предположении устойчивости атома с массой 3. Тот факт, что он выдерживает интенсивные возмущения в своей структуре при близком столкновении с α -частицей, указывает на то, что это – образование, трудно поддающееся разрушению внешними силами.

Строение ядра и изотопы

При рассмотрении возможного строения элементов естественно предположить, что они построены в конечном счете из ядер водорода и электронов. С этой точки зрения ядро гелия состоит из четырех ядер водорода и

двух отрицательных электронов, так что результирующий заряд равен двум. Обычно предполагают, что масса атома гелия, равная 3.997 (если считать массу кислорода равной 16), меньше массы четырех атомов кислорода (4.032) из-за близкого взаимодействия полей в ядре, которое приводит к тому, что это ядро обладает меньшей электромагнитной массой, нежели сумма масс его отдельных компонентов. На основе этого факта Зоммерфельд [16] сделал заключение, что ядро гелия должно обладать очень устойчивой структурой, требующей весьма интенсивных сил для ее разрушения. Этот вывод согласуется с экспериментом, так как ни разу не было обнаружено, чтобы гелий распадался под действием быстрых α -частиц, способных разрушить ядра азота и кислорода. В своих последних экспериментах Астон [17] показал, что в пределах точности измерений массы исследованных изотопов обычных элементов выражаются целыми числами, если массу кислорода принять равной 16. Единственное исключение составляет водород, масса которого равна 1.008 в согласии с химическими измерениями. Это не исключает возможности того, что водород представляет собой предельный составной элемент ядра, а указывает на то, что либо группировка ядер водорода и электронов такова, что средняя электромагнитная масса близка к единице, либо, (что более вероятно) что вторичные единицы, из которых главным образом построен атом, т.е. гелий или его изотоп, имеют массу, близкую к целому числу, если массу кислорода принять за 16.

Проведенные до сих пор наблюдения не дают возможности решить, обладает ли новый атом массой, равной в точности 3, но по аналогии с гелием можно ожидать, что ядро нового атома состоит из трех Н-ядер и одного электрона и что оно имеет массу, более близкую к 3, нежели сумма отдельных масс в свободном состоянии.

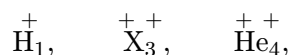
Если это предположение верно, то кажется весьма правдоподобным, что один электрон может связать также два Н-ядра, а может быть, и одно Н-ядро. Тогда в первом случае возможно существование атома с массой, примерно равной 2, и одним зарядом, который нужно рассматривать как изотоп водорода. В другом случае предполагается возможность существования атома с массой 1 и нулевым зарядом ядра. Подобная атомная структура представляется вполне возможной. С современной точки зрения нейтральный атом водорода следует рассматривать как ядро с единичным зарядом, к которому на некотором расстоянии присоединен электрон, и спектр водорода объясняется движением этого удаленного электрона. При некоторых условиях, однако, электрон может быть связан с Н-ядром намного сильнее, образуя нечто вроде нейтрального дублета. Такой атом обладал бы весьма своеобразными свойствами. Его

внешнее поле было бы практически равно нулю повсюду, за исключением области, прилегающей непосредственно к ядру, благодаря чему он мог бы проходить свободно через вещество. Существование таких атомов, вероятно, трудно было бы обнаружить с помощью спектроскопа, и их невозможно было бы сохранять в герметически закрытом сосуде. С другой стороны, они должны легко проникать в недра атома и могут либо соединяться с ядром, либо распадаться под действием интенсивного поля ядра, результатом чего будет, вероятно, испускание H-атома или электрона, или же обоих вместе.

Если существование таких атомов возможно, то они должны возникать, хотя, вероятно, в очень малых количествах, при электрическом разряде через водород, где присутствуют в значительном количестве как электроны, так и H-ядра. Автор намерен провести эксперименты с целью проверки, не имеется ли каких-либо указаний об образовании подобных атомов в упомянутых условиях.

Существование таких ядер может и не ограничиваться массой 1, а возможно, они существуют с массами 2, 3, 4 или больше в зависимости от возможных комбинаций между дублетами. Существование таких атомов, по-видимому, почти необходимо для объяснения строения ядер тяжелых элементов. Действительно, если не предполагать возможным получение заряженных частиц с очень высокими скоростями, то трудно себе представить, каким образом какая бы то ни была положительно заряженная частица может приблизиться к ядру тяжелого атома при наличии его интенсивного отталкивающего поля.

Мы видели, что пока экспериментально обнаружено, что ядра трех легких атомов, вероятно, представляют собой структурные единицы атома, т.е.



где индексы соответствуют массе элемента.

При рассмотрении возможного строения ядер сразу же возникают трудности, так как многочисленные комбинации этих структурных соединений с отрицательными электронами могут дать элемент с требуемым зарядом ядра и массой. При нашем полном незнании законов сил, действующих вблизи ядра, мы не имеем критерия устойчивости или относительной вероятности данной теоретической системы. За исключением нескольких элементов, которые могут существовать в газообразном состоянии, возможность существования изотопов у элементов еще не подтверждена. Когда будут получены дальнейшие сведения о продуктах распада других элементов, помимо двух уже исследованных, и

более полные данные о числе и массе изотопов, можно будет вывести приблизительные правила, которые помогут отбирать способы образования ядер из более простых элементов. Поэтому сейчас представляется преждевременным пытаться обсуждать сколько-нибудь детально даже возможную структуру легких и, вероятно, менее сложных атомов. Однако.

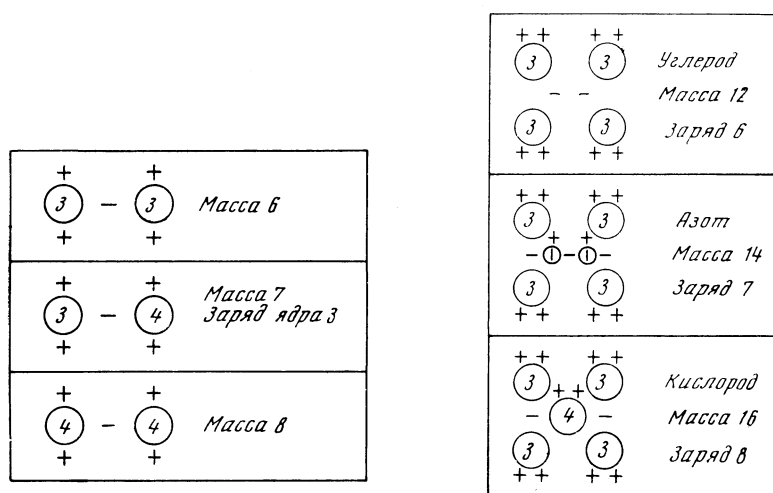


Рис. 3:

иллюстрации один пример возможных способов образования изотопа в случае легких элементов. Этот пример основан на представлении, что во многих случаях ядро гелия с массой 4 в сложных структурах, по-видимому, может быть заменено соответствующим ядром с массой 3 без серьезного нарушения устойчивости системы. В таком случае ядерный заряд остается неизменным, а масса изменится на единицу.

Рассмотрим в качестве примера случай лития с зарядом 3 и атомной массой около 7. естественно предположить, что его ядро построено из гелия или изотопа массой 3 и одного связывающего электрона. Три возможные комбинации изображены на рис. 3.

С этой точки зрения теоретически возможно существование по крайней мере трех изотопов лития с массой 6, 7 и 8, но, если даже эти комбинации одинаково стабильны, вопрос об их относительном содержании в элементе литий на Земле зависит от целого ряда факторов, о которых мы ничего не знаем. К числу таких факторов относятся, например, способы действительного образования таких ядер, относительное коли-

чество структурных единиц и вероятность их комбинаций.

Приведенные в этой статье экспериментальные результаты подтверждают ту точку зрения, что атомы водорода и атомы с массой 3 – это необходимые структурные единицы ядер азота и кислорода. В таком случае можно *a priori* предположить, что кислород есть некоторая комбинация четырех ядер гелия с массой 4. Кажется вероятным, что масса 3 – необходимая структурная единица ядер легких атомов вообще, но нельзя считать неправдоподобным и то, что при возрастании сложности ядра и соответствующем увеличении электрического поля структура с массой 3 испытывает перестроение и стремится перейти в предположительно более устойчивое ядро с массой 4. Именно это может быть причиной того, что гелий с массой 4 всегда выбрасывается из радиоактивных атомов, тогда как его изотоп с массой 3 возникает при искусственном разложении таких легких атомов, как азот и кислород. Уже давно известно, что атомные веса многих элементов могут быть выражены формулами $4n$ или $4n + 3$, где n – целое число, и это указывает на то, что атомы с массой 3 и 4 представляют собой важные структурные единицы ядер.²

Структура ядер углерода, кислорода и азота

В связи с описанными опытами представляют интерес некоторые, быть может пока еще не зрелые, мысли о возможном строении перечисленных атомов на основе полученных экспериментальных фактов. Следует помнить, что только в азоте, возникают Н-атомы, тогда как в углероде и кислороде их нет. Как в азоте, так и в кислороде возникают атомы с массой 3; с углеродом такие исследования не проводились. На рис. 4 показаны возможные структуры и указаны массы и заряды комбинирующихся единиц. Отрицательные электроны обозначены символом - .

По предположению, ядро углерода состоит из четырех атомов с массой 3 и зарядом 2 и двух связывающих электронов. Переход к азоту соответствует добавлению двух Н-атомов с одним связывающим электроном, а кислород получается заменой двух Н-атомов ядром гелия.

²На основании этих и других соображений Харкинс [18] предложил формулу строения для элементов. В качестве комбинируемых единиц он использовал электроны и атомы с массой 1, 3 и 4 и ядерным зарядом 1, 1 и 2 соответственно. Единице с массой 3 он приписал один, а не два заряда, и, следовательно, ее надо считать изотопом водорода, а не гелия

Из этих структур видно, что вероятность прямого столкновения с одним из четырех атомов с массой 3 в азоте гораздо больше, чем вероятность удаления одного Н-атома, так как следует ожидать, что, за исключением ограниченных областей, основная часть ядра будет экранировать Н-атом от прямого столкновения. Это служит иллюстрацией того обстоятельства, что число высвобождаемых из азота Н-атомов с массой 3 значительно больше числа Н-атомов, образующихся при соответствующих условиях. Следует помнить, что описанные структуры носят чисто иллюстративный характер и отдельным деталям их расположения не следует придавать значения.

Естественно задаться вопросом о природе остаточных атомов после распада кислорода и азота, предполагая, что эти остаточные атомы выдерживают столкновение и переходят в новую стадию временного или постоянного равновесия.

Вылет их азота Н-атомов с массой 1 и ядерным зарядом 1 должен уменьшить массу на единицу и заряд ядра тоже на единицу. Таким образом, остаточный атом должен иметь заряд ядра 6 и массу 13, т.е. быть изотопом углерода. Если одновременно освобождается и отрицательный электрон, то остаточное ядро становится изотопом азота.

Выбрасывание из азота массы 3 с двумя зарядами, происходящее, по-видимому, совершенно независимо от высвобождения Н-атома, понижает ядерный заряд на 2, а массу на 3. Следовательно, остаточный атом должен быть изотопом бора с ядерным зарядом 5 и массой 11. Если здесь, кроме того, вылетает еще и электрон, то остается изотоп углерода с массой 11. Выбрасывание массы 3 из кислорода приводит к массе 13 и заряду ядра 6; это должен быть изотоп углерода. Точно так же, если теряется электрон, то остается изотоп азота с массой 13. Имеющихся в настоящее время данных совершенно недостаточно, чтобы сделать выбор между этими альтернативами.

Мы намерены продолжить эксперименты, чтобы установить, нет ли каких-либо указаний о распаде других легких атомов, помимо азота и кислорода. Это более трудная задача, когда элемент нельзя получить просто в газообразном состоянии, так как нелегко обеспечить отсутствие водорода или приготовить однородные тонкие пленки этих веществ. По этим причинам, а также вследствие напряжения при счете сцинтилляций, проходящих в трудных условиях, нельзя ждать особенно быстрого прогресса в этом направлении.

Приношу благодарность моему ассистенту Г. Кроу за приготовление радиоактивных источников и помощь при счете сцинтилляций, а также Дж. Чадвику и Ишиде за помощь в счете сцинтилляций в некоторых

последних экспериментах.

Список литературы

- [1] Geiger H. Marsden E. Proc. Roy. Soc. A., 1909, 82, 495.
- [2] Rutherford E. Philos. Mag., 1911, 21, 669; 1914, 27, 488.
- [3] Geiger H. Marsden E., Philos. Mag., 1913, 25, 604.
- [4] Darwin C. Philos. Mag., 1914, 27, 499.
- [5] Barkla C., Philos. Mag. 1911, 21, 648.
- [6] Van den Broek A. Phys. Z., 1913, 14, 32.
- [7] Moseley H. Philos. Mag., 1913, 26, 1024; 1914, 27, 703.
- [8] Marsden P. Philos. Mag, 1914, 27, 824.
- [9] Rutherford E. Philos. Mag., 1919, 37, I and II, 538.
- [10] Rutherford E. Philos. Mag., 1919, 37, III, 571.
- [11] Rutherford E. Philos. Mag., 1919, 37, 562.
- [12] Rutherford E. Philos.Mag., 1919, 37, 577.
- [13] Bourget, Fabry, Buisson. Compt. Rend., 1914, April 6, May 18.
- [14] Nicholson D. Proc. Roy. Soc., 1911, 72, N 1, 49; 1914, 74, N 7, 623.
- [15] Strutt R. Proc. Roy. Soc. A, 1908, 80, 572.
- [16] Sommerfeld A. Atombau und Spektrallinien; 1919, p. 538.
- [17] Aston W. Philos.Mag., 1919, December; 1920, April, May.
- [18] Harkins W. Phys. Rev., 1920, 15, 73.