

ЕСТЕСТВЕННОЕ И ИСКУССТВЕННОЕ РАЗЛОЖЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ¹⁾.

Сэр Эрнест Резерфорд.

В этой статье я не буду подробно останавливаться ни на естественных превращениях радиоэлементов, ни на методах, при посредстве которых осуществляется искусственное разложение некоторых легких элементов. Я полагаю, что все вы знакомы с общими результатами этих исследований ²⁾ и потому ограничусь рассмотрением роли этих результатов в познании структуры атомного ядра.

В настоящее время общепринято считать, что атомы всех элементов имеют аналогичную структуру и состоят из центрального положительно заряженного ядра, окруженного на известном расстоянии соответствующим числом электронов. Из изучения рассеяния α -частиц материей и из классических исследований Мозеля о спектрах рентгеновых лучей мы знаем, что суммарный положительный заряд ядра, выраженный через заряды по абсолютной величине равные электронному, численно равен атомному или порядковому номеру элемента, т.е. номеру места, занимаемого элементом в периодической системе. Мы знаем, что, за немногими исключениями, все нуклеарные заряды от 1 — соответствующего самому легкому атому водорода — до 92 — соответствующего наиболее тяжелому элементу, урану — представлены элементами, встречающимися на земле. Заряд ядра элемента определяет число и распределение внешних электронов, так что свойства атома зависят, главным образом, от некоего целого числа, его нуклеарного заряда, и лишь в незначительной степени — от атомного веса этого атома.

Это ничтожное по размерам, но массивное ядро есть замкнутый в себе мир, и если обычные физические и химические силы, нахо-

¹⁾ Речь, произнесенная на торжественном чествовании столетия Франклиновского Института в Филадельфии, напечатана в Journ. Frankl. Inst. 198, № 6, p. 725.

Ред.

²⁾ С результатами работ над искусственным разложением элементов можно ознакомиться из статей Э. Резерфорда, собранных в книге: Э. Резерфорд. Строение атома и искусственное разложение элементов. Госиздат. М. 1923. *Ред.*

дящиеся в нашем распоряжении, и могут оказывать на него какое-либо влияние, то это влияние ничтожно. Проблема строения атомного ядра во многих отношениях значительно труднее соответствующей проблемы распределения и движения планетарных электронов. В последнем случае мы располагаем огромным количеством фактов, которые позволяют контролировать правильность наших теорий, между тем как число фактов, известных относительно ядра, незначительно, а методы, позволяющие изучать его структуру, ограничены.

Среди свойств элементов удобно отличать свойства, зависящие от ядра, от свойств, определяемых планетарными электронами. Движение внешних электронов обуславливает рентгеновские и оптические спектры элементов, а конфигурация этих электронов — обычные физические и химические свойства элементов. С другой стороны, явления радиоактивности и все свойства, зависящие от массы атома, определенно должны быть приписаны ядру. Изучение радиоактивных превращений показало нам, что ядро тяжелых атомов содержит не только положительно заряженные тела, но и отрицательные электроны, так что заряд ядра есть избыток положительного заряда над отрицательным. За последние годы укрепилось представление о том, что существуют вообще две основные структурные единицы, которые принимают участие в построении сложных ядер; это — легкий отрицательный электрон и относительно массивное водородное ядро, которое, как полагают, представляет собою положительный электрон.

Этот взгляд получил весьма сильное подкрепление в опытах над изотопами Астона, который показал, что массы различных типов атомов выражаются числами, весьма близкими к целым, если положить $0 = 16$. Исходя из общей электрической теории строения материи, можно было предвидеть, что вследствие весьма тесной группировки заряженных единиц в ядре масса водородного ядра, входящего в структуру какого-либо другого ядра, будет несколько меньше той величины, какую она имеет в свободном состоянии (1,0077). Из опытов Астона представляется, что, при этих условиях, средняя масса водородного ядра, или, как его теперь называют, протона, весьма близка к 1,000. Мы можем предвидеть, что «правило целых чисел», найденное Астоном, будет справедливо только в качестве первого приближения, так как масса протона может до некоторой степени зависеть от особенностей структуры ядра. В случае олова и ксенона Астон уже и констатировал определенное отступление от правила целых чисел, и не подлежит сомнению, что значительно более точное определение масс вскроет еще целый ряд подобных отступлений.

В то время как наши нынешние сведения определенно указывают на то, что протон и электрон являются основными компонентами ядра, представляется в высшей степени вероятным, что в структуре ядра выдающуюся роль играют вторичные, более сложные структурные

единицы. Так, например, испускание ядра гелия радиоактивными телами указывает на то, что ядро гелия с массой равной четырем, вероятно, является в высшей степени важной вторичной единицей атомной структуры. С только что очерченной точки зрения мы должны ожидать, что ядро гелия с зарядом $+2e$ построено из четырех протонов и двух электронов. Потеря массы, происшедшая при образовании этого ядра, указывает на то, что при этом должно было выделяться большое количество энергии. Если это так, то ядро гелия должно обладать настолько прочной структурой, что нужна была бы совокупная энергия четырех или пяти наиболее быстрых α -частиц для того, чтобы осуществить его разрушение. Это заключение подкрепляется нашей неудачей наблюдать какие-либо признаки разрушения даже самых быстрых α -частиц, независимо от того, применялись ли они для бомбардировки материи или же сами атомы гелия бомбардировались α -частицами.

С этой точки зрения мы должны заключить, что ядро радия с атомным номером 88 и атомным весом 226 содержит всего 226 протонов с массой 1 и 138 электронов. Таким образом мы имеем представление о численном соотношении двух основных структурных единиц. Однако в настоящее время мы не имеем еще определенных сведений ни о расположении этих единиц в ничтожном по размерам атомном ядре, ни о природе и величине сил, сдерживающих их. Мы должны ожидать, что некоторые из протонов и электронов соединяются, образуя вторичные единицы, например, ядра гелия, и что детали структуры ядра могут весьма отличаться от того, что следовало бы ожидать, если бы ядро представляло собою простой конгломерат свободных протонов и электронов.

Таким образом в высшей степени важно получить определенные сведения о природе и расположении компонентов ядра и о силах, сдерживающих их в равновесии. Мы рассмотрим сейчас некоторые пути, ведущих к познанию истинных размеров ядра и закона сил, действующих в непосредственной близости его; наряду с этим мы остановимся на изучении структуры и характера колебаний ядра, а также тех явлений, которые наблюдаются при разрушении некоторых ядер бомбардировкой α -частицами.

РАЗМЕР ЯДРА И ЗАКОН СИЛ.

Представление о нуклеарном строении атома возникло в 1911 году и имело целью объяснить рассеяние α -частиц на большие углы в результате одиночных столкновений. Тот факт, что α -частицы в некоторых случаях отклоняются на углы, большие прямого в результате столкновения с одним только атомом, впервые показал, какие интенсивные силы действуют в непосредственной близости ядра. Гейгер и

Марсден показали, что число частиц, рассеянных на различные углы, весьма хорошо согласуется с простой теорией, построенной на допущении, что для рассматриваемых расстояний α -частица и ядро ведут себя, как заряженные точки, отталкивая друг друга по закону обратной пропорциональности квадрату расстояния. Строгая применимость этого закона была, кроме того, недавно подтверждена Чадвиком (Chadwick), так что теперь мы можем определенно утверждать, что в области, непосредственно окружающей ядро, справедлив обычный закон действия силы.

Эти опыты над рассеянием дали первое представление о вероятных размерах ядер тяжелых атомов, ибо следовало ожидать, что закон обратной пропорциональности квадратам расстояний должен бы нарушаться, когда α -частица подходит совсем близко или даже отчасти проникает в структуру ядра. Изменение закона силы в свою очередь должно бы сказаться в расхождении вычисленного и наблюдаемого числа частиц, рассеянных на большие углы. Между тем Гейгер и Марсден не наблюдали таких расхождений даже для случаев, когда α -частицы с пробегом около 4 см рассеивались ядром золота на 100° . При таких столкновениях расстояние наибольшего приближения α -частицы к центру ядра составляет приблизительно $5 \cdot 10^{-12}$ см, откуда следует, что радиус ядра золота, если его считать сферическим, не может существенно превышать эту величину.

Существует еще один способ примерного подсчета. Этот способ покоится на радиоактивных данных и приводит к значению радиуса ядра тяжелого атома, близкому к предыдущему. Альфа-частица, покидая ядро, увеличивает свою энергию, пробегая отталкивающее поле ядра. Чтобы установить минимальный предел, предположим, что α -частица урана получает всю свою энергию за счет электростатического поля. Исходя из этих данных, можно подсчитать, что радиус ядра урана не может быть меньше $6 \cdot 10^{-12}$ см. Этот подсчет основан на предположении, что силы вне ядра отталкивательные и чисто электростатические. Если — а это вовсе не является неправдоподобным — вблизи от ядра существуют также интенсивные притягательные силы, изменяющиеся быстрее, нежели обратно пропорционально квадрату расстояния, то истинные размеры ядра могут быть меньше вычисленной выше величины.

При современном положении наших знаний в высшей степени важно проверить, действительно ли простой закон действия силы нарушается при наибольших приближениях α -частицы к ядру. Такую проверку можно осуществить, сравнивая наблюдаемое и вычисленное число α -частиц, рассеянных на углы, близкие к 180° . Представляется несомненным, что закон обратной пропорциональности квадрату расстояния должен нарушаться, если производить опыты с быстрыми α -частицами. Это можно видеть из следующего простого рассуждения.

Если α -частицу той самой скорости, с какою испускаются α -частицы урана, направить прямо в ядро урана, то она должна проникнуть внутрь самого ядра.

Если взять значительно более быструю α -частицу, например, α -частицу радия *C*, энергия которой приблизительно вдвое больше энергии α -частицы урана, то ясно, что она должна проникнуть гораздо дальше вглубь ядра. Такой вывод основан на допущении, что поле ядра приблизительно симметрично во всех направлениях. Если последнее не верно, то может случиться, что только часть центральных ударов поведет к проникновению в глубь ядра. Мы надеемся в ближайшее время экспериментально подойти к этой трудной проблеме.

До сих пор мы имеем дело со столкновениями α -частицы с тяжелыми атомами. Мы знаем, однако, из опытов Резерфорда, Чадвика и Билера (Bieler), что при столкновении α -частицы с наиболее легким атомом, — с атомом водорода, закон обратной пропорциональности квадратам расстояний совершенно нарушается, если производить опыты с быстрыми α -частицами. Не только число Н-ядер, приведенных в быстрое движение, гораздо больше того, какое можно было ожидать по простой теории точечных ядер, но и изменение числа Н-ядер в зависимости от скорости α -частиц происходит в сторону, противоположную предсказываемой простой теорией. Такое значительное расхождение теории и эксперимента можно объяснить, лишь допуская либо, что ядра имеют заметные размеры, либо, что закон изменения отталкивания обратно пропорционально квадрату расстояния совершенно нарушается при таких тесных столкновениях. Положим, что сложность структуры и закона действия силы должна быть приписана α -частице, а не ядру водорода. Чадвик и Билер в результате серии тщательных опытов заключили, что в таком случае α -частица должна вести себя, как идеально упругое тело сфероидальной формы с малой осью $4 \cdot 10^{-13}$ см, направленной по движению, и большой осью в $8 \cdot 10^{-13}$ см. Вне этой области силы изменяются по обычному закону — обратно пропорционально квадрату расстояния; внутри нее силы возрастают настолько быстро, что частица отталкивается, как от идеально упругого тела.

Разумеется, такое представление несколько искусственно; однако оно в существенных чертах передает картину столкновения и в частности тот факт, что, когда ядра подходят друг к другу ближе некоторого предельного расстояния, развиваются силы, изменяющиеся гораздо быстрее, нежели обратно пропорционально квадрату расстояния. Трудно приписать это нарушение закона действия силы только конечности размеров или сложности структуры ядра, или ее искажению; опыты указывают скорее на появление новых и неожиданных сил, которые развиваются на таких малых расстояниях. Это представление подтверждается некоторыми новыми опытами Билера, выполненными

в Кавендишевской лаборатории. Билер произвел методом рассеяния детальное изучение закона действия силы вблизи легкого ядра, а именно вблизи ядра алюминия. С этой целью он сравнил относительное число α -частиц, рассеянных внутри одного и того же телесного угла от алюминия и от золота. Для исследованного интервала углов (до 100°) предполагалось, что рассеяние золотом следует закону обратной пропорциональности квадрату расстояния. Билер нашел, что отношение рассеяния в алюминии к рассеянию в золоте зависит от скорости α -частицы. Так, например, для α -частицы с пробегом 3,4 см было получено теоретическое отношение для углов меньших 40° , но оказалось, что отношение для среднего угла рассеяния в 80° лишь на 7% меньше. С другой стороны, для более быстрых α -частиц с пробегом 6,6 см отклонения от теоретического отношения выражены значительно резче и достигают 29% для угла в 80° . Чтобы объяснить эти результаты Билер предположил, что вблизи ядра алюминия, на обычную отталкивательную силу налагается притягательная сила. Результаты хорошо согласуются с допущением, что притягательная сила изменяется обратно пропорционально четвертой степени расстояния и что силы отталкивания и притяжения уравниваются на расстоянии $3,4 \cdot 10^{-13}$ см от центра ядра. Внутри этого критического радиуса силы становятся исключительно притягательными; вне — исключительно отталкивательными.

Хотя мы и не можем предъявлять особенных требований к точности полученной цифры или к строгости предположенного закона притягательной силы, мы, вероятно, не слишком ошибемся, если положим, что радиус ядра алюминия не превосходит $4 \cdot 10^{-13}$ см. Интересно отметить, что силы взаимодействия между α -частицей и ядром водорода претерпевают быстрое изменение, начиная приблизительно с этого же расстояния.

Таким образом ясно, что размеры ядра у легких элементов малы, а в случае алюминия можно даже сказать — неожиданно малы, если мы вспомним, что в этом ничтожном объеме помещаются 27 протонов и 14 электронов. Предположение о том, что силы взаимодействия между ядрами изменяются от отталкивания к притяжению при очень тесном сближении, представляется весьма правдоподобным; иначе в высшей степени трудно себе представить, каким образом тяжелое ядро с большим избытком положительного заряда могло бы сдерживаться в ограниченном пространстве. Мы увидим, что целый ряд других фактов подкрепляет это представление; однако мало правдоподобно, чтобы притягательные силы вблизи сложного ядра могли быть выражены каким-либо простым степенным законом.

ФАКТЫ ИЗ ОБЛАСТИ РАДИОАКТИВНОСТИ.

Изучение длинного ряда превращений, которым подвергаются уран и торий, дает нам огромное количество сведений о способах распада атомов; к сожалению, наши теории строения ядра еще недоста-

точно разработаны для того, чтобы истолковать эти факты в каких-либо деталях. Испускание α - и β -частиц большой скорости дает некоторое понятие о мощных силах, разыгрывающихся в ядре, ибо энергия испускания α -частицы в некоторых случаях превосходит ту, которую приобрела бы эта частица, свободно пробегая разность потенциалов примерно в четыре миллиона вольт. Энергии β - и γ -лучей — того же порядка величины.

Несмотря на то, что мы детально изучали последовательные превращения радио элементов, мы еще совсем не в состоянии нарисовать определенную картину строения ядра радиоактивных веществ, а причины их распада являются для нас загадочными. Сравнивая ряды превращений урана, тория и актиния, нельзя не поразиться сходством этих превращений. Во всех случаях не только излучения аналогичны по своему характеру и энергии, но и конечными продуктами распада всюду являются изотопы свинца. Эта замечательная аналогия превращений особенно резко выражена в случае « C -продуктов», каждый из которых распадается по крайней мере двумя различными путями, давая начало разветвлению ряда. Например, торий C испускает два типа α -лучей — 65% с пробегом 8,6 см и 35% — с пробегом 4,8 см — и, кроме того, еще β -лучи.

Для объяснения этого факта было предположено, что часть атомов тория C распадается, сначала испуская α -частицу, а получившийся продукт затем уже испускает β -частицу. Другая часть — распадается обратным путем, сначала испуская β -частицу и затем уже — α -частицу. Аналогичное двойное превращение происходит у радия C , и актиния C , хотя относительное число атомов в каждой ветви резко варьирует для различных элементов.

Эта замечательная аналогия между C -продуктами еще больше подчеркнута недавним открытием Бэтса и Роджерса (Bates and Rogers), которые показали, что как радий C , так и торий C дают — кроме отмеченных — еще группы α -частиц, которые движутся с весьма значительными скоростями.

Часто отмечалось, что радиоактивные свойства C -продуктов зависят скорее от атомного номера, т.-е. от нуклеарного заряда, нежели от атомного веса. Сосредоточим наше внимание на радии C и тории C , которые известны лучше всего. То и другое вещество имеет нуклеарный заряд 83, но атомная масса радия C есть 214, а тория C — 212. Таким образом ядро радия C содержит на два протона и два электрона больше тория C . Если бы предположить, что ядра этих элементов состоят из большого числа заряженных единиц, находящихся в непрестанном и беспорядочном движении, то надо было бы ожидать, что прибавление протонов и электронов к сложной структуре должно бы совершенно менять ее конструкцию, а следовательно, и устойчивость и характер превращения. На самом же деле, в резком

противоречии с этим предположением, мы находим, что оба ядра превращаются поразительно аналогичным образом. Мы можем, однако, дать некоторое объяснение такой аномалии, если предположим, что α - и β -частицы, которые выделяются из этих элементов, не входят глубоко в структуру ядра, но существуют в качестве спутников в некоторой «сердцевине», общей для обоих элементов. Если эти спутники находятся в движении, то они могут поддерживаться в равновесии притягательными силами, исходящими от «сердцевины», и эти силы должны быть одинаковыми в обоих случаях. С этой точки зрения, проявления радиоактивности следует приписать не сердцевине ядра, но распределению спутников, которое может несколько отличаться у двух элементов, хотя бы в общем обнаруживая значительное сходство. Разумеется, подобная теория является в высшей степени спекулятивной. Однако она может служить полезной рабочей гипотезой, не только позволяющей понять аналогию в характере превращения наших двух элементов, но и непосредственно дающей вероятное объяснение испусканию α -частиц различной скорости одним и тем же элементом. Существует два пути подхода к этому вопросу. Мы можем, прежде всего, предположить, что при распаде освобождается некоторое количество избыточной энергии и что эта энергия может сообщаться любому из спутников. Имеется определенная вероятность того, что каждая данная частица получит эту энергию, и от этого зависит число частиц в различных группах α -лучей. Энергия α -частицы, в конце концов, зависит от ее положения в поле сил, окружающем «сердцевину» ядра в момент испускания этой α -частицы. С другой стороны, мы можем допустить, что всегда испускается одна и та же α -частица, но что эта частица может занимать в атоме ряд «стационарных» положений, аналогичных «стационарным состояниям» электрона в теории Бора. Это приводит к допущению, что атомы не идентичны в отношении спутников, но что существует ряд «возбужденных» состояний атома, как следствие ранее происшедших превращений. Теория «спутников» полезна еще и в другом отношении. Возможно, что γ -лучи высокой частоты возникают не вследствие движения электронов, как это обычно предполагается, но вследствие переноса α -частиц с одного уровня энергии на другой. В таком случае разница в энергиях различных групп α -частиц радия C и тория C должна быть связана квантовым соотношением с частотой γ -лучей. Доказательства, имеющиеся в настоящее время, недостаточно определены для того, чтобы можно было окончательно разрешить эту проблему; во всяком случае необходимо иметь весьма точные измерения энергии различных групп α -частиц. Вследствие относительно малого числа частиц в некоторых группах такие измерения осуществить трудно.

При обсуждении теории спутников в связи с радиоактивными веществами на первый взгляд естественно сделать следующее предположение: так как конечными продуктами рядов урана и тория являются

изотопы свинца, то один из этих изотопов мог бы образовать «сердцевину» ядра. Однако же вполне возможно, что радиоактивный процесс кончается при наличии известного числа еще остающихся спутников. Если это так, то «сердцевина» может иметь меньший нуклеарный заряд и массу, нежели свинец. Из некоторых рассуждений, приводимых ниже, видно, что эта сердцевина может соответствовать элементу, близкому к платине с атомным номером 77 и массой 192.

Частота колебания ядра.

Один из наиболее интересных и важных методов познания структуры ядра есть изучение сильно проникающих γ -лучей, испускаемых некоторыми радиоактивными веществами. Гамма-лучи тождественны по своей природе с рентгеновскими лучами, но обладают гораздо большей проникающей способностью и состоят из волн со значительно большей частотой, нежели те, какие могут быть получены в обычной рентгеновской трубке. Работы последних нескольких лет весьма ясно указывают на то, что большая часть γ -лучей таких веществ, как радий B и C , возникает в ядре. Таким образом определение частот γ -лучей дает нам непосредственно сведения о характере колебания компонентов структуры ядра. Частота некоторых из более мягких γ -лучей, возбуждаемых радием B и C , была непосредственно измерена Резерфордом и Андраде по методу отражения от кристалла; однако же трудно, если не невозможно вообще, определить этим методом частоты сильно проникающих лучей. К счастью, для этой цели был разработан новый мощный метод, главным образом работами Эллиса и г-жи Мейтнер (Lise Meitner). Хорошо известно, что лучи радия B и радия C в магнитном поле дают целый спектр, обнаруживая присутствие ряда групп β -лучей, каждая из которых испускается с определенной скоростью. Ясно, что каждая из этих групп β -лучей возникает при превращении энергии γ -луча определенной частоты в β -луч на том или ином из электронных уровней внешней части атома. Энергия ω , требуемая для того, чтобы перевести электрон с одного из этих уровней за пределы атома, известна из изучения рентгеновских спектров поглощения. Таким образом частота γ -луча определяется квантовым соотношением

$$h\nu = E + \omega,$$

где E — есть измеренная энергия β -частицы.

Так как каждый луч может испытать превращение на любом из известных уровней энергии внешней части атома, то единичный γ -луч может обусловить появление известного числа групп β -лучей, соответствующих превращению на K , L , M и т. д. уровнях. Таким образом анализ спектра β -лучей позволяет нам фиксировать частоты более интенсивных лучей, которые испускаются ядром. Энергия наиболее

коротких волн, измеренная таким способом Эллисом, соответствует более чем двум миллионам вольт, а ряд других фактов указывает на то, что, вероятно, существуют гораздо более короткие волны, в незначительном количестве испускаемые радием *C*.

ИСКУССТВЕННОЕ РАЗЛОЖЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ.

Как мы видели, предполагают, что ядра всех атомов построены из протонов и электронов, при чем о числе тех и других можно заключить, зная массу ядра и его заряд. На первый взгляд представляется неожиданным, что изучение превращений радиоактивных элементов не дает возможности обнаружить индивидуальное существование протонов. Наши наблюдения показывают, что в длинном ряду превращений урана, тория и актиния выбрасываются только электроны и ядра гелия, но не протоны. Один из наиболее очевидных методов изучения структуры ядра состоит в нахождении способа его разложения на компоненты. Такое разложение выполняет для нас постоянно сама природа в случае тяжелых радиоактивных элементов, но подобное самопроизвольное разложение неизвестно для обычных, более легких элементов. Так как быстрые α -частицы радиоактивных веществ суть наиболее мощные из всех известных нам снарядов, то сразу же представляется вполне возможным, что ядро легкого атома может быть разрушено в результате тесного столкновения с α -частицей. Вследствие же ничтожно малых размеров ядра нужно ожидать, что вероятность центрального столкновения будет весьма мала и что, следовательно, если вообще и будет наблюдаться разложение, то в ничтожном масштабе. За последние несколько лет Чадвик и я определенно показали, что путем бомбардировки α -частицами могут быть вырваны ядра водорода из элементов: бора, азота, фтора, натрия, алюминия и фосфора. В этих опытах присутствие Н-ядер открывалось методом спинцилляций, а их максимальная скорость выбрасывания оценивалась по толщине слоя материи, сквозь который могут проходить эти частицы. Число выброшенных Н-ядер даже в наиболее благоприятном случае весьма мало по сравнению с числом бомбардирующих α -частиц: примерно одно Н-ядро на миллион α -частиц.

В этих опытах материал, подвергающийся бомбардировке, располагался непосредственно перед источником α -частиц, и наблюдение выброшенных частиц производилось на сернисто-цинковом экране, расположенном по прямой линии на расстоянии нескольких сантиметров. Когда источником α -частиц служил радий *C*, то пробеги Н-ядер, освобожденных из элементов, выраженные в см воздуха, во всех этих случаях были больше пробега свободных ядер (30 см в воздухе), приведенных в движение α -частицами в водороде. Если поместить перед сернисто-цинковым экраном поглощающий экран, эквивалентный 30 см

воздуха, то результаты не будут совершенно зависеть от присутствия свободного или связанного водорода, загрязняющего бомбардируемый материал. Некоторые легкие элементы исследовались при абсорбциях, меньших этой; однако количество Н-частиц, вызванных водородным загрязнением источника и испытываемого материала, было так велико, что эти результаты никакого доверия не заслуживают.

В этих опытах можно наблюдать большое число сцинтилляций, но очень трудно решить, действительно ли они частью могут быть приписаны разложению исследуемого вещества. Присутствие частиц с большим пробегом типа α -частиц радия *C* еще более осложняет вопрос, так как число таких частиц, вообще говоря, велико по сравнению с обычно наблюдаемым эффектом разложения.

Для того, чтобы избежать эти затруднения, Чадвик и я разработали простой метод, который с определенностью позволяет наблюдать разложение элемента, когда выбрасываемые при этом частицы имеют пробег всего лишь в 7 см воздуха. Этот метод основан на предположении — подтвержденном нашими прежними опытами — о том, что частицы, продукты разложения, испускаются по всем направлениям относительно падающих лучей. Мощный пучок α -лучей падал на исследуемое вещество, а освобожденные частицы наблюдались в среднем под углом 90° к направлению падающих α -частиц. При помощи экранов можно расположить опыт так, чтобы α -частицы совсем не попадали на сернисто-цинковый экран.

Этот метод имеет много преимуществ. Мы можем теперь открывать частицы с пробегом в 7 см с такою же уверенностью, как частицы с пробегом в 30 см в наших прежних опытах, так как присутствие водорода в бомбардируемом веществе не сказывалось. Это последнее обстоятельство можно было показать, бомбардируя экран из парафина, при чем никаких частиц на сернисто-цинковом экране не наблюдалось. Так как число Н-ядер или α -частиц весьма сильно уменьшается при рассеянии на 90° , то результаты совершенно не зависели от присутствия Н-ядер из источника или α -частиц большого пробега. Последние еще можно было заметить при нашем расположении опыта, когда рассеивающим веществом служил тяжелый элемент вроде золота, но они были совершенно неощутимы при легких элементах. Небольшое изменение установки позволяло нам исследовать наравне с твердыми телами и газы.

Работая таким образом, мы нашли, что, кроме элементов бора, азота, фтора, натрия, алюминия и фосфора, которые дают частицы с максимальным пробегом в прямом направлении между 40 и 90 см, следующие элементы дают частицы с пробегом большим 7 см: неон, магний, кремний, сера, хлор, аргон и калий. Число частиц, испускаемых этими элементами, мало по сравнению с тем, какое дает алюминий, и варьирует между $\frac{1}{3}$ и $\frac{1}{20}$ последнего. Пробеги частиц не были опре-

делены с точностью. Неон, повидимому, дает частицы с наименьшим пробегом — около 16 см — при наших условиях; пробеги частиц из других элементов лежат между 18 и 30 см. Благодаря любезности д-ра Розенгайна (Rosenhain), мы могли проделать опыты с металлическим бериллием. Последний дал слабый эффект: около $\frac{1}{30}$ эффекта, даваемого алюминием; однако мы не уверены в том, что и этот эффект не вызван фтором, присутствующим в виде загрязнения. Остальные элементы — водород, гелий, литий, углерод и кислород — не дали заметного эффекта за пределами 7 см. Интересно отметить, что, в то время как углерод и кислород не дали никакого эффекта, сера, т.-е., по всей вероятности, «чистый» элемент с атомной массой 4n, дает эффект, приблизительно составляющий $\frac{1}{3}$ эффекта в алюминии. Это ясно показывает, что ядро серы не построено из одних только гелиевых ядер, как об этом можно было заключить по атомному весу серы 32,07.

Мы произвели предварительное испытание элементов от кальция до железа, но без определенных результатов, ввиду трудности получения этих элементов свободными от «активных» элементов, в особенности от азота. Например, в то время как электролитическое железо не дало частиц за пределами 7 см, шведское железо дало значительный эффект, который, без сомнения, вызван присутствием азота, ибо после продолжительного нагревания в вакууме большая часть эффекта исчезала. Подобные же результаты были получены и с другими элементами в этой области.

Мы не наблюдали никакого эффекта вообще у следующих элементов: никель, медь, цинк, селен, криптон, молибден, палладий, серебро, олово, ксенон, золото и уран. Криптон и ксенон были любезно предоставлены нам Ф. В. Астоном.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛЕГКИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ЧАСТИЦЫ С ПРОБЕГОМ, МЕНЬШИМ 3 см ВОЗДУХА.

Простая теория показывает, что когда α -частицы рассеиваются легкими элементами, скорость рассеянных частиц зависит от угла рассеяния. Например, когда бомбардирующие α -частицы имеют пробег 7 см, то пробег α -частиц, рассеянных на угол, больший 90° , не может превосходить: для лития (7) — 1,0 см, для бериллия (10) — 2,0 см, для углерода — 2,5 см, для кислорода — 3,2 см, для алюминия — 4,3 см и для золота — 6,8 см.

Если мы введем поглощающий экран достаточной толщины так, чтобы задержать частицы, рассеянные на 90° , то мы сможем исследовать продукты разложения при пробегах, для углерода, например, превосходящих 2,5 см. При этих опытах возникают некоторые специаль-

ные трудности, которые отсутствуют, когда толщина поглотителя превосходит 7 см: любой тяжелый элемент, присутствующий в исследуемом веществе в форме загрязнения, может дать рассеянные α -частицы с пробегом, большим тех, которые рассеиваются углеродом, и, таким образом, осложнить наблюдения. Кроме того, серьезные осложнения может внести «возгонка» или улетучивание активного вещества источника. Это особенно сказывается, если сосуд, заключающий радиоактивный источник, откачан. Чтобы избежать этих затруднений, мы нашли желательным покрывать источник тонким слоем целлулоида с поглощающей способностью для α -лучей, эквивалентной 2—3 мм. Таким образом мы могли избежать серьезных загрязнений и исследовать этим методом легкие элементы. Мы не обнаружили заметного числа частиц ни от лития, ни от углерода — для пробегов, больших 3 см. Что касается углерода, то если он вообще и обнаруживает какой-либо эффект, то число частиц во всяком случае должно составлять меньше одной десятой числа частиц из алюминия при тех же условиях. Это совершенно противоречит результатам работы Кирша и Петерсона, которые нашли большое число частиц из углерода при пробеге в 6 см. Они наблюдали также слабый эффект в бериллии, в согласии с нашими опытами. Не было обнаружено эффекта в газообразном кислороде. Начиная с бериллии, не было обнаружено эффекта в элементах легче бора.

При условиях наших опытов было ясно, что ни Н-частицы, ни другие частицы с пробегом, большим 3 см, не освобождаются в заметном числе из этих элементов в направлении, перпендикулярном к полету бомбардирующих α -частиц. Это — очень обескураживающий результат, ибо если только эти элементы не являются в высшей степени прочными структурами, следовало бы ожидать, что бомбардирующие α -частицы должны разрушить их на слагающие их компоненты.

Мы надеемся исследовать этот вопрос гораздо более обстоятельно, ибо для теории строения ядра в высшей степени важно знать определенно: разлагаются ли легкие элементы быстрыми α -частицами, или нет.

При обсуждении результатов наших новых и старых наблюдений бросаются в глаза некоторые в высшей степени интересные пункты. Прежде всего, все элементы от фтора до калия включительно разрушаются под влиянием бомбардировки α -лучами. Насколько позволяют судить наши наблюдения, едва ли может быть сомнение в том, что частицы, выброшенные из этих элементов, суть Н-ядра. Элементы с нечетным порядковым номером В, N, F, Na, Al, P — дают частицы с большим пробегом, варьирующим от 40 до 90 см в прямом направлении; элементы нечетного порядкового номера C, O, Ne, Mg, Si, S — либо вовсе не дают частиц, либо дают их в ничтожном количестве, как C и O, либо, наконец, дают частицы гораздо меньшего пробега, нежели соответствующие элементы нечетных номеров. Разница между пробе-

гами частиц из четных и нечетных элементов выражена менее резко для элементов тяжелее фосфора.

Эта очевидная разница в скорости выбрасывания H -ядер из элементов четных и нечетных порядковых номеров в высокой степени интересна. Это различие может быть поставлено в параллель с другими наблюдениями из совершенно иной области. Гаркинс (Harkins) показал, что элементами четных атомных номеров земная кора гораздо богаче, нежели элементами нечетных атомных номеров.

Астон при изучении изотопов показал, что нечетные элементы имеют обычно два изотопа, различающиеся по массе на две единицы, в то время как четные элементы в большинстве случаев имеют большое количество изотопов. Это замечательное различие между элементами четных и нечетных номеров не может быть простым курьезом, но в настоящее время мы можем лишь строить догадки об его причинах.

Скорость вылета водородных ядер.

Как мы уже видели, опыты Билера над рассеянием α -лучей в алюминии и магнии указывают на то, что в непосредственной близости ядра действуют весьма большие притягательные силы. Если это на самом деле так, то силы притяжения и отталкивания должны уравновешиваться на некотором расстоянии от ядра. За пределами этого критического расстояния силы, действующие на положительно-заряженное тело, чисто отталкивательные. Из этого общего представления о нуклеарных силах вытекают некоторые важные следствия. Предположим, например, что вследствие столкновения с быстрой α -частицей из ядра некоторого атома освобождается водородное ядро. Пройдя критическую сферу оно приобретает энергию под действием отталкивающего поля. С этой точки зрения ясно, что энергия заряженной частицы после освобождения из атома не может быть меньше энергии, приобретаемой в отталкивающем поле. Поэтому мы должны ожидать, что имеется минимальная скорость освобождения частиц из разрушающего ядра, при чем существование такой скорости можно обнаружить на опыте. Мы получили определенное доказательство существования такого эффекта в алюминии и в сере, исследуя поглощение H -ядер, освобождаемых из этих элементов. Число сцинлляций для тонкой пленки было найдено почти постоянным при поглощениях между 7 и 12 см, но оно быстро падало для больших толщин. Это как раз и есть то, что можно было ожидать с очерченной точки зрения. Несомненно, что эта предельная скорость варьирует у различных элементов, однако требуется большое число опытов для того, чтобы с точностью фиксировать этот предел. На основании этих результатов можно произвести грубую оценку потенциала поля на критической поверхности, и такая оценка дает

около трех миллионов вольт для алюминия. Для серы получается несколько большее число.

Результаты эти с поразительной наглядностью показывают, насколько мало ядро, ибо можно подсчитать, что критическая поверхность не может отстоять дальше $6 \cdot 10^{-13}$ см от центра ядра. Этот вывод относительно критического расстояния находится в прекрасном согласии с результатами, полученными Билером из наблюдений над рассеянием α -частиц.

Далее — еще один важный вывод. Ясно, что α -частица, направленная в ядро, не может проникнуть за пределы этой критической поверхности, а следовательно, и вызвать разрушение ядра, если ее скорость не превышает этого критического потенциала. В опытах, сделанных несколько лет назад, мы нашли, что число Н-ядер, освобождаемых из алюминия, быстро падает с убыванием скорости α -частиц и при скорости последних, соответствующей пробегу в 4,9 см воздуха, становится настолько малым, что частиц вообще нельзя обнаружить. Это соответствует энергии α -частицы, пробегающей ускоряющее поле приблизительно в три миллиона вольт, что хорошо согласуется с приведенной выше величиной.

Нужны еще дальнейшие опыты с другими элементами для того, чтобы проверить, выполняется ли вообще это соотношение между минимальной скоростью Н-ядер и минимальной скоростью α -частиц, требуемой для разрушения ядра элемента; те результаты, которые уже имеются, внушают большую надежду на то, что это соотношение окажется справедливым вообще.

Интересно отметить, что полученные результаты дают определенное подтверждение нуклеарной теории атома и внушают надежду на то, что мы сможем определить величину критического потенциала для некоторых легких элементов.

Эволюция ядер.

В заключение я хочу сделать несколько замечаний более спекулятивного характера — замечаний, касающихся вопроса о происхождении и эволюции элементов из двух основных единиц, — положительного и отрицательного электрона. Нужно сознаться, что данных, которыми можно было бы руководствоваться, — за исключением атомной массы и нуклеарного заряда, — у нас мало. В высшей степени трудно представить себе уже то, каким образом могут возникать более сложные ядра путем последовательного прибавления протонов и электронов, ибо протон должен обладать огромной скоростью для того, чтобы близко подойти к заряженному ядру. Я уже рассматривал в этой статье факты, свидетельствующие о том, что в непосредственной близости ядра действуют огромные притягательные силы, весьма быстро изменяющиеся

в зависимости от расстояния.— Эти силы, вероятно, следует приписать протонам, образующим ядро. В таком случае, представляется возможным, что протон и электрон будут образовывать весьма тесные пары, нейтроны, как я их назвал. Вероятное расстояние между центрами таких дублетов — порядка $3 \cdot 10^{-13}$ см. Силы между двумя нейтронами должны быть очень малыми, за исключением тех случаев, когда нейтроны сближаются на расстояние указанного порядка величины; возможно что нейтроны удерживают друг друга подобно тому, как группа малых подвижных магнитов образует связанное целое, сдерживаясь силами взаимодействия.

При рассмотрении вопроса об эволюции элементов мы можем, для простоты, предполагать, что первоначально существовала рассеянная масса водорода, которая постепенно нагревалась вследствие сжатия под действием гравитационных сил. При высоких температурах газ состоял главным образом из свободных водородных ядер и электронов; с течением времени некоторые из них могли комбинироваться, образуя нейтроны, при чем этот процесс сопровождался выделением теплоты. Эти нейтроны собирались затем в ядра различной степени сложности. Далее, группы нейтронов обнаруживали тенденцию образовывать более устойчивые комбинации, как ядра гелия с массой четыре, и — возможно — промежуточные ядра с массами два и три. Энергия освобождалась при этих процессах, по всей вероятности, в виде быстро несущихся излишних электронов, которые оказались ненужными для устойчивости ядра. Вероятно, все эти ядра были радиоактивны, но некоторые из них, при своих превращениях могли достигать устойчивых конфигураций, представляющих собою ядра каких-либо из выживших элементов.

Если мы предположим, что ядра гелия являются основными компонентами, освобождающими при своем образовании наибольшее количество энергии, то мы должны, в конце концов, ожидать, что некоторые из нейтронов в тяжелом ядре будут комбинироваться в гелиевые ядра. Эти гелиевые ядра, далее, собираются и образуют определенные системы, при чем вполне возможно, что группировка эта имеет упорядоченный характер, так что образующиеся структуры в некоторых отношениях аналогичны кристаллам, только расстояния между отдельными компонентами у них гораздо меньше, нежели у кристаллов. В таком случае некоторые из элементов могут состоять из «сердцевины», построенной из гелиевых ядер по типу кристалла и окруженной положительно и отрицательно-заряженными спутниками, которые обращаются вокруг этой «сердцевины». Допустим, что подобные упорядоченные расположения гелиевых ядер возможны; интересно отметить, что в таком случае, исходя из простого допущения, можно получить наблюдаемое в действительности соотношение между атомными зарядами и атомными массами. Предположим, что ядра гелия образуют пространственно центрированную кубическую решетку, располагаясь по

вершинам элементарного куба, в центре которого помещается электрон. В следующей таблице даны некоторые возможные типы группировок и соответствующие им атомные массы и нуклеарные заряды. Структура «4.3.2» означает прямоугольное расположение, при котором ребра параллелепипеда содержат соответственно 4, 3 и 2 ядра гелия. Таким образом все ядро будет содержать двадцать четыре ядра гелия, и его масса будет 96; в то же время в нем будет заключаться шесть внутри-ядерных электронов, вследствие чего заряд его ядра будет $48 - 6 = 42$.

| Расположение гелиевых ядер. | Вычисленный нуклеарный заряд. | Вычисленная масса. | Известный элемент равного заряда. |
|--------------------------------|----------------------------------|-----------------------|--------------------------------------|
| 3.2.2 | 22 | 48 | Ti 48 |
| 3.3.2 | 32 | 72 | Ge 74, 72, 70 |
| 3.3.3 | 46 | 108 | Ra 106, 7 |
| 4.2.2 | 29 | 64 | Cu 63, 35 |
| 4.3.2 | 42 | 96 | Mo 96 |
| 4.3.3 | 60 | 144 | Nd 144 |
| 4.4.3 | 78 | 192 | Pt 195 |

Хотя совпадение далеко от совершенства, однако мы несомненно наблюдаем согласие между вычисленными и наблюдаемыми величинами. Если мы примем, что некоторые из этих структур могут быть увеличены путем прибавления спутников, то у нас останется известная свобода в смысле подыскания масс, соответствующих действительным элементам. Подобная теория, конечно, носит чисто спекулятивный характер, и возможно представить себе на-ряду с гелием и другие основные структурные компоненты, которые принимают участие в построении более тяжелых ядер. Нарушение правила целых чисел для масс изотопов, наблюдавшееся в некоторых случаях Астоном, — например, между цинком и ксеноном — подкрепляет эту мысль. Из изучения искусственного разложения элементов мы убедились, что углерод и кислород обладают весьма устойчивой структурой и, вероятно, построены из гелиевых ядер. Возможно, что и ядра кислорода, например, в свою очередь, служат структурными компонентами некоторых элементов, следующих за кислородом, но наши сведения сейчас еще слишком скудны для того, чтобы с полной определенностью разобраться в этом вопросе.

Я думаю, однако, что из этой лекции ясно видно, насколько трудна и увлекательна проблема строения ядра. Для того, чтобы можно было надеяться на большие успехи в этой области, существенно лучше узнать силы, действующие в непосредственной близости протонов и электронов; путь к этому — детальное изучение рассеяния α - и β -лучей ядрами. К счастью, имеется несколько определенных путей, ведущих к разрешению проблемы строения ядра. Комбинируя результаты, полученные на этих путях, мы можем надеяться на непрерывное, хотя и довольно медленное, движение вперед — на пути к разрешению одной из величайших проблем физики.