

## ДИСКУССИЯ О СТРОЕНИИ АТОМНОГО ЯДРА.

*От редакции.* 7 февраля 1929 г. Лондонским королевским обществом была организована дискуссия под председательством Э. Резерфорда. Мы печатаем перевод стенографического отчета об этой дискуссии, опубликованного в „Proceedings of the Royal Society“ A. Vol. 123, p. 373.

*Э. Резерфорд.*

19 марта 1914 г. в Королевском обществе состоялась последняя дискуссия о строении атома, — это было ровно 15 лет тому назад. Я имел честь открыть эту дискуссию. Участвовали в ней: Мозели, Содди, Никольсон, Хикс, Стенли Аллен и С. П. Томпсон. В своем вступительном слове я изложил теорию нуклеарного атома и привел ряд доводов в пользу этой теории. Мозели рассказал о своих исследованиях с рентгеновскими лучами. Эти исследования дали возможность установить атомные номера элементов и показали, сколько еще имеется пустых мест между водородом (атомный номер 1) и ураном (номер 92). Содди указал на существование изотопов в радиоактивных семействах и обратил внимание на замечательные наблюдения сэра Дж. Томсона и д-ра Астона, получивших при исследовании неона масс-спектрографом две параболы. Содди высказал мысль, что, быть может, и обыкновенные элементы также являются смесью изотопов. Вы согласитесь, я полагаю, что эти замечания и предположения, высказанные во время дискуссии 15 лет тому назад, не потеряли своей актуальности и в настоящее время. Так, например, Хикс и Стенли Аллен указали на необходимость принимать во внимание магнитные поля ядра. А между

тем в то время мы еще очень мало знали по этому вопросу, о котором даже и сейчас наши сведения очень скудны. Что же было сделано за прошедший период? Оглядываясь назад, мы видим, что преодоление проблемы строения атомного ядра шло тремя новыми путями.

Первый, и в некоторых отношениях наиболее значительный, это было доказательство существования изотопов у обыкновенных элементов и точное определение масс или весов атомов отдельных изотопов, произведенное главным образом Ф. В. Астоном. Это повело к развитию оригинальных идей Мозели. Опыты Мозели позволили определить число возможных зарядов ядра. Астон же показал, что существует целый ряд атомов, обладающих одним и тем же атомным зарядом, в то время как массы их и строение их ядра могут быть различны.

Основным пунктом, выясненным в ранних работах Астона, было то, что массы всех элементов за исключением водорода приблизительно выражаются целыми числами, если принять массу кислорода равной 16. Но, как мы знаем теперь, самым интересным является не закон целочисленности масс элементов, а скорее исключения из этого закона. На этом пункте я подробнее остановлюсь ниже, а сейчас скажу по этому поводу только следующее: существование изотопов и опыты над искусственным разложением легких элементов довольно убедительно показывают, что частицы, входящие в состав ядра, обладают массой, примерно, равной 1. Эти частицы носят название протонов. Мы считаем, что протон идентичен со свободным ядром водорода. Во время дискуссии в 1914 г. я указывал, что ядро водорода почти наверное представляет собой положительный электрон, — по аналогии с обыкновенным отрицательным электроном.

Следующим открытием было доказательство искусственного распада элементов при бомбардировке их  $\alpha$ -частицами. В этих опытах я был лично заинтересован, так же как и д-р Чадвик, который доложил о полученных результатах и об отношении их к строению ядра. Эти опыты, насколько я знаю, впервые определенно показали, что мы

можем изменять строение самого ядра при помощи внешнего воздействия. Мы знаем, что во всех тех случаях, когда это нам удастся, вырывается протон, обладающий большой скоростью. Интересно отметить, что при распаде радиоактивных элементов всегда вылетают ядра гелия или электроны, а при искусственном распаде легких элементов, поскольку нам известно, ядер гелия не появляется, но зато освобождается протон. В общем опыты показывают, что „последние“ составные части ядра суть протоны и электроны и что в ядрах более тяжелых элементов присутствуют еще вторичные образования в форме ядер гелия. В дальнейшем я еще вернусь к этому важному вопросу.

Третьим путем к овладению проблемой о строении ядра было изучение длин волн проникающего  $\gamma$ -излучения, возникающего при распаде радиоактивного ядра.  $\gamma$ -лучи происходят из самого ядра, поэтому частота этих лучей, впервые определенная д-ром Эллисом, дает нам очень важные сведения о колебаниях частиц, составляющих ядро. Я надеюсь, что д-р Эллис остановится в своем докладе и на некоторых вопросах, касающихся соотношения компонентов ядра с внешними электронами, ибо им получен по этому поводу ряд интересных результатов.

Чадвик и я за последние годы были заняты главным образом вопросом о размерах ядра и о силовом поле в окрестностях ядра. Вопрос этот чрезвычайно важен, ибо мы, очевидно, не можем делать никаких количественных расчетов, пока мы не знаем природы и законов силового поля вблизи ядра. Судить об этом поле можно по рассеянию  $\alpha$ -частиц, и мы произвели большое количество опытов над различными элементами. Методы наши в принципе чрезвычайно просты. Интенсивный пучок  $\alpha$ -частиц определенной скорости падает на тонкую материальную пластинку, и по методу сцинтилляции сосчитывается число  $\alpha$ -частиц, рассеянных в пределах угла примерно в  $135^\circ$ . Наблюдаемое таким способом число  $\alpha$ -частиц обыкновенно находится в отношении  $1 : 10^5$  ко всему числу  $\alpha$ -частиц, падающих на рассеивающую фольгу. Скорость падающих на фольгу  $\alpha$ -частиц можно варьировать, помещая перед источником их

тонкие слои слюды. Таким путем было определено число рассеянных  $\alpha$ -частиц при различных скоростях. Если бы между ядром и  $\alpha$ -частицами действовали обычные законы электростатики, число рассеянных частиц должно было бы меняться как  $1/E^2$ , где  $E$  — энергия  $\alpha$ -частицы. При исследовании всех элементов, от меди с атомным номером 29 до урана с номером 92, было найдено нормальное рассеяние, т. е. рассеяние, в пределах точности опыта согласующееся с тем, которое можно ожидать, если в той области атома, куда проникает  $\alpha$ -частица, существует обычное силовое поле. Так как можно ожидать, что если бы  $\alpha$ -частица проникла внутрь ядра, силовое поле изменилось бы, то можно заключить, что радиус ядра меди должен быть меньше нежели ближайшее расстояние  $\alpha$ -частицы от атома, равное в данном случае примерно  $10^{-12}$  см. Соответствующее расстояние для ядра урана равно приблизительно  $3 \cdot 10^{-12}$  см, при наиболее быстрых  $\alpha$ -частицах. Так как ни для одного из рассматриваемых атомов не было обнаружено отклонения от обычного силового поля, мы не можем с какой-либо уверенностью определить размеры ядра. Все, что мы можем сказать, это то, что размеры ядра должны быть меньше самого близкого расстояния между  $\alpha$ -частицей и соответственным ядром во время их столкновения. Если бы  $\alpha$ -частица проникла внутрь ядра, то, вероятно, изменилось бы силовое поле, а следовательно, и закон рассеяния.

Совсем иные результаты получаются при рассеянии более легкими элементами. Уже давно было показано, что при бомбардировке водорода  $\alpha$ -частицами рассеяние получается ненормальное. Такой же результат недавно был наблюден для гелия. Билер, а затем Чадвик и я подробно исследовали рассеяние  $\alpha$ -частиц магнием и алюминием (атомные номера 12 и 13). Я не буду останавливаться на деталях опытов, а только опишу тип наблюдаемой нами кривой рассеяния.

Предположим, прежде всего, что рассеяние нормальное, т. е. что число  $\alpha$ -частиц, рассеянных на угол  $\theta$  в пределах  $185^\circ$ , меняется как  $1/E^2$ , где  $E$  — энергия  $\alpha$ -частицы. Отношение наблюдаемого рассеяния к теоретическому для раз-

ных скоростей  $\alpha$ -частиц обозначено на чертеже (рис. 1) пунктиром. Такая прямая была найдена для золота и для всех исследованных промежуточных элементов вплоть до меди. Если же рассеивающим материалом является алюминий, то закон обратных квадратов приблизительно оправдывается для меденных  $\alpha$ -частиц. С увеличением скорости  $\alpha$ -частиц, кривая опускается ниже нормальной прямой, достигает минимума, и затем снова поднимается. По виду кривой можно заключить, что если бы можно было создать еще более быстрые  $\alpha$ -частицы, кривая круто поднялась бы выше нормальной линии. На чертеже (рис. 1) нанесена кривая рассеяния  $\alpha$ -частиц, алюминием на средний угол в  $135^\circ$ . Аналогичная кривая найдена для магния. Вероятно, еще более легкие элементы дали бы такой же тип кривой. В некоторых отношениях кривые рассеяния  $\alpha$ -частиц водородом и гелием вполне аналогичны данной кривой.

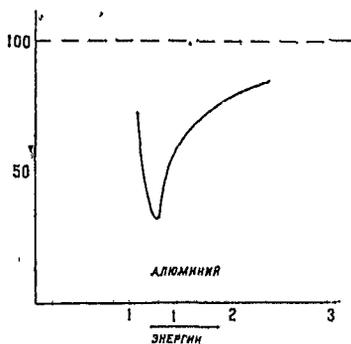


Рис. 1.

Мне кажется самым естественным и подходящим следующее объяснение: к обыкновенным электрическим силам отталкивания между ядром и  $\alpha$ -частицей, на очень близких расстояниях присоединяются еще силы притяжения, так что результирующая сила есть комбинация сил отталкивания и притяжения. Билер первый рассчитал рассеяние при этих условиях, предположив, что силы притяжения обратно пропорциональны четвертой степени расстояния.

Позже Дебай и Гардмейер исследовали рассеяние в предположении, что силы притяжения обратно пропорциональны пятой степени расстояния. Это предположение имеет известный физический смысл. Когда  $\alpha$ -частица сильно приближается к ядру, появляются силы, способные разделить или поляризовать заряженные составные части ядра, поэтому на  $\alpha$ -частицу начинает действовать притягивающаяся

сила, приблизительно обратно пропорциональная пятой степени расстояния от центра ядра.

Мне кажется, что эта точка зрения вполне обоснована, ибо под действием таких больших сил должна происходить поляризация ядра, а результирующее притяжение может стать очень большим при сильном приближении  $\alpha$ -частицы к ядру. Гардмейер показал, что расчеты, сделанные в этом предположении, находятся в согласии с наблюдениями над алюминием. Следует отметить, что предположения эти несколько искусственны, так как  $\alpha$ -частица полагается точечным зарядом, а ядро — сферой. Наблюдения над рассеянием  $\alpha$ -частиц водородом и гелием указывают, что и ядро водорода и ядро гелия, по видимому, окружены силовым полем неизвестного происхождения, не подчиняющимся обычным законам. Эта область ненормальных сил по размерам равна, примерно, ядру алюминия, и, насколько можно судить по полученным результатам, область эта не сферическая, а скорее похожа на плоский эллипсоид. Интересно отметить, что „размер“ водородного ядра или протона, определенный таким образом, оказывается даже большим нежели ядро гелия.

Как бы мы ни интерпретировали экспериментальные результаты, ясно, что ядра нельзя рассматривать как точки и что им следует приписать определенный объем или структуру. Существует предположение, и быть может оно правильно, что это своеобразное распределение сил вокруг  $\alpha$ -частиц и протонов вызвано магнитными силами, которые согласно современным воззрениям могут возникать благодаря собственному магнитному моменту, приписываемому протону, а, может быть, и электрону и не имеющему ничего общего с истинными движениями составных частей ядра.

Теперь я подхожу к очень важному пункту в развитии этого рассуждения. Наблюдения над рассеянием  $\alpha$ -частиц ураном показывают, что в пределах ошибок опыта — которые, к сожалению были достаточно велики — рассеяние вполне нормально, когда кратчайшее расстояние равно, примерно,  $3,5 \cdot 10^{-12}$  см, — а это показывает, что радиус ядра еще меньше этой величины. В то же время, рассматривая

скорость, с которой из ядра урана спонтанно вылетают самые медленные  $\alpha$ -частицы, мы приходим к выводу, что размеры ядра достигают  $6,5 \cdot 10^{-12}$  см, т. е. величины, примерно, вдвое большей, чем это следует из опытов над рассеянием  $\alpha$ -частиц. Таким образом мы стоим здесь перед большой трудностью: два, казалось бы, не противоречащих друг другу метода оценки величины ядра дают сильно расходящиеся значения. Если строить ядро на основе классических идей и стараться сделать эту модель вполне законченной, мы приходим к заключению, что при любом предположении относительно системы сил, силовое поле вокруг ядра урана должно состоять из силы притяжения на малых расстояниях и силы отталкивания на больших. Изменение

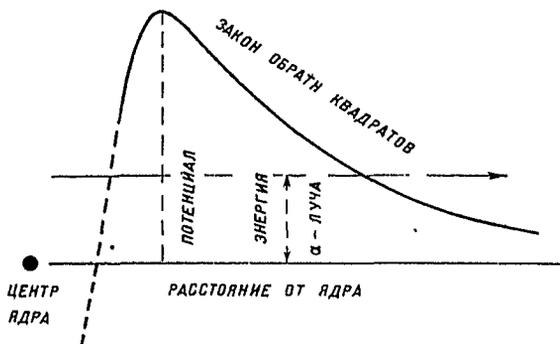


Рис. 2.

потенциала этих сил дано на рис. 2. Максимум этой кривой соответствует расстоянию, на котором силы притяжения и отталкивания уравниваются друг друга. В пределах этого расстояния преобладают силы притяжения, и потенциал может принимать отрицательные значения. На больших расстояниях потенциал электростатических сил обратно пропорционален расстоянию. Я думаю, все согласятся с тем, что потенциалы в окрестности ядра должны примерно таким образом зависеть от расстояния. По классической электродинамике потенциал должен достигать примерно 4 или 5 миллионов вольт на расстоянии в 4 или  $5 \cdot 10^{-12}$  см, независимо от наших предположений о природе господствующих там сил. Эти соображения заставляют нас думать,

что быстрые  $\alpha$ -частицы могут проникать глубоко внутрь уранового ядра, в то время как опыты над рассеянием  $\alpha$ -частиц противоречат такому заключению.

За последний год появились попытки обойти эту трудность с помощью идей волновой механики. За эту задачу взялись Г. Гамов, которого мы очень рады приветствовать здесь, а также и Герней и Кондон. Гамов полагает изменение потенциала вблизи ядра весьма схожим с показанным на рис. 2, но при помощи вычислений он показывает, что максимум кривой лежит гораздо ближе к ядру, примерно на расстоянии в  $0,7 \cdot 10^{-12}$  см, вместо 4 или  $5 \cdot 10^{-12}$  см. Соответственно этому и максимальный потенциал оказывается более высоким, равным около 30 миллионов вольт и весьма резко спадающим вблизи ядра. Таким образом ядро — по предположению сферическое — окружено очень высоким силовым барьером. Ни одна  $\alpha$ -частица, вылетевшая из урана, не может взять этого барьера; если бы какая-либо  $\alpha$ -частица перепрыгнула через этот барьер, она вылетела бы с энергией, далеко превосходящей наблюдаемую энергию  $\alpha$ -частиц. Но, по волновой механике, частицы могут совершать подвиги, казущиеся совершенно невозможными по классической механике. По волновой механике  $\alpha$ -частица вовсе и не должна перепрыгнуть через силовой барьер, чтобы вылететь из ядра. Эта  $\alpha$ -частица или, вернее, волновая система, которую мы идентифицируем с  $\alpha$ -частицей, просачивается сквозь барьер и, наконец, вылетает с кинетической энергией, равной общей энергии частицы внутри барьера. Я не буду дальше останавливаться на этой новой, интересной точке зрения, которую далее разовьют Фаулер и Гамов. Мы увидим, что по этой теории радиус ядра урана оказывается очень малым, равным около  $7 \cdot 10^{-13}$  см, и в этом маленьком объеме должны поместиться 238 протонов и 146 электронов.

Это звучит неправдоподобно, но, быть может, это невозможно.

Теперь я перейду к обсуждению некоторых результатов д-ра Астоны на счет строения ядра. Всем вам известен основной полученный им результат, а именно, что

единица массы в структуре ядра есть протон с массой, приблизительно равной единицей, в то время как протон (ядро водорода) в свободном состоянии имеет массу 1,0073, считая массу кислорода  $O=16$ . Эта разница в массе свободного протона и протона внутри ядра объясняется взаимодействием электромагнитных полей протонов и электронов в сильно сконцентрированном ядре.

Новейшие теории учат нас, что между массой и энергией существует тесная связь, и что уменьшение массы равносильно потере энергии. Свободный протон обладает массой 1,0073, масса же протона внутри ядра очень близка к 1. Эта, казалась бы, небольшая потеря в массе говорит

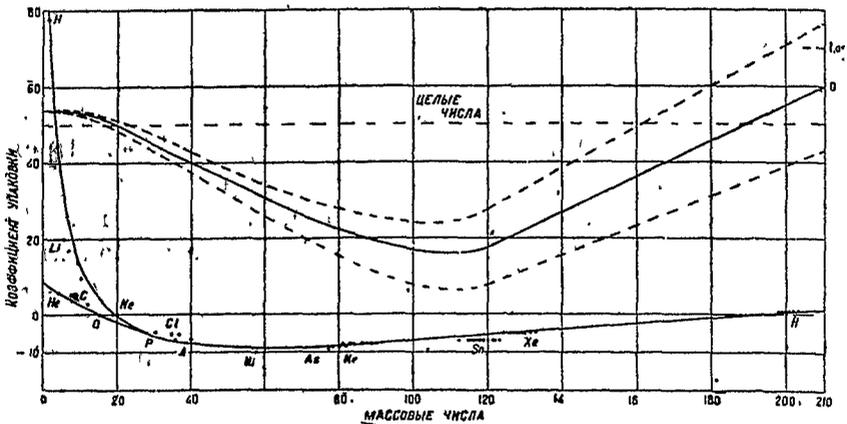


Рис. 3.

о том, что при превращении свободного протона в составную часть ядра было излучено большое количество энергии, соответствующее примерно 7 миллионам вольт.

Взгляните теперь на кривую рис. 3, начерченную А ст о н о м и показывающую в большом масштабе отклонения масс изотопов от целых чисел. Кривая, начинающаяся с водорода, пересекает линию целых чисел и достигает минимума для атомного веса около 120. Затем она снова поднимается и опять пересекает линию целых чисел около атомного веса равного 200. Предположите теперь, что ядро было построено первоначально из свободных ядер водорода и электронов (я не говорю, что согласен с таким предположением). Приобра-

зовании атома с массой, равной 120, содержащего 120 протонов, была потеряна энергия, соответствующая 840 миллионам вольт, и эта энергия, вероятно, была излучена в пространство. С этой точки зрения ясно, что в противоположность обычным воззрениям, атом не только не является кладовой энергии, а как раз наоборот: чтобы разобрать, например, ядро ртути на составные части, на отдельные протоны, нам понадобилось бы произвести колоссальную работу, равную минимум 1400 миллионам вольт.

Все это безусловно правильно, если предположить, что все атомы построены из свободных ядер водорода и электронов. Вы, конечно, можете задать вопрос: как примирить эту точку зрения с тем фактом, что при превращении урана в свинец спонтанно освобождается огромное количество энергии — свыше 40 миллионов вольт?

Если однако придерживаться другой точки зрения, результаты получаются более удовлетворительные. Предположим, что основной единицей в построении ядер более тяжелых элементов является не протон, а ядро гелия. Положим, что это ядро построено из 4 протонов и 2 электронов. При образовании его уже выделилось огромное количество энергии, и масса этого ядра в свободном состоянии равна 4,0018. Заметьте, что кривая отклонения масс от целых чисел достигает минимума для массы, равной примерно 120, и снова пересекает линию целых чисел для массы, равной 200. Если мы, для простоты, положим, что, начиная с массы 120 ядра построены путем постепенного добавления  $\alpha$ -частиц, то легко показать, что масса каждой  $\alpha$ -частицы в этом интервале атомных весов должна быть равна приблизительно 4,005; мы видим, что эта масса превосходит массу  $\alpha$ -частицы в свободном состоянии. Несомненно также, что увеличение массы не одинаково для всех атомов, вероятно, оно больше для масс вблизи 200, чем для масс вблизи 120. Если экстраполировать кривую Астона до урана, то можно показать, что имеющееся там увеличение массы хорошо объясняет, во всяком случае, приблизительно большое количество энергии, излучаемое радиоактивными телами.

Теперь мы уже можем составить себе картину постепенного построения атомных ядер. Вероятно, у легких элементов ядро состоит из комбинации  $\alpha$ -частиц, протонов и электронов, причем отдельные части ядра сильно притягивают друг друга, отчасти вследствие возмущающих, отчасти вследствие магнитных сил. О природе этих сил мы пока что можем только строить то или иное предположение. Прежде всего образуется сильно сконцентрированное и крепко связанное ядро, причем процесс этот сопровождается излучением энергии. Для атомного веса, примерно равного 120, мы имеем наименьшую массу, что означает наиболее тесную связь. При дальнейшем возрастании атомных номеров, добавляемые частицы оказываются связанными все менее и менее плотно.

Таким образом можно предположить, что ядро имеет очень плотную структуру около центра, причем плотность постепенно убывает с удалением от центра. Вся эта система окружена силовым барьером, обычно мешающим вылету  $\alpha$ -частиц. Может быть, эта статическая точка зрения не нравится моим друзьям-теоретикам, которые хотели бы предоставить  $\alpha$ -частице полную свободу передвижения внутри ядра. Тем не менее эта точка зрения вполне законна и находится в полном согласии с изложенными мною идеями. Другими словами, если бы мы могли сделать моментальный снимок с ядра — с выдержкой около  $10^{-23}$  секунды, — мы увидели бы в центре как бы плотно упакованные, крепко связанные  $\alpha$ -частицы, причем плотность убывала бы с увеличением расстояния от центра. Без сомнения, все  $\alpha$ -частицы находятся в движении, и волны их отражаются от силовых барьеров, а иногда и проникают за пределы системы. Мне кажется, что развитая мною точка зрения вполне обоснована, и я надеюсь, что наши друзья-теоретики смогут описать более детально всю картину. Мы должны не только объяснить построение ядра из  $\alpha$ -частиц, — нам приходится найти еще место и для электронов, а запереть электроны в одну клетку с  $\alpha$ -частицей не так-то легко. Однако я настолько уверен в изобретательности наших друзей-теоретиков, что я твердо верю, что они

превзойдут каким-нибудь образом и эту трудность. Я надеюсь услышать сегодня их соображения по этому поводу.

Еще один пункт. Изложенная мною точка зрения объясняет, мне кажется, почему не могут существовать атомы тяжелого урана. С увеличением массы ядро получало бы все больше и больше энергии и стало бы настолько радиоактивным, что исчезло бы. Повидимому, чем больше был бы у ядер запас энергии, тем скорее они исчезали бы, и, вероятно, уран и торий не случайно являются единственными выжившими представителями тяжелых ядер. Здесь не место затрагивать в высшей степени спекулятивный вопрос о том, как образовались ядра элементов. Прежде чем браться за решение этого вопроса, нам нужно узнать гораздо больше о деталях структуры самого ядра.

*Ф. В. Астон.*

Помимо основного „правила целых чисел“, еще целый ряд результатов, полученных с масс-спектрографом, относится к предмету настоящей дискуссии. Почему не существует атомов с атомной массой, равной 2, 3, 5, 8 и т. д.? Почему в ядре никогда не бывает меньше двух протонов на один электрон? У элементов с четными атомными номерами число изотопов имеет тенденцию возрастать с атомным номером, однако же разница в массах крайних изотопов почему-то ограничена примерно 10%. У элементов с нечетными атомными номерами ограничение это выступает еще яснее. У них никогда не бывает свыше двух изотопов, и, начиная с атомного номера 9, массы этих изотопов всегда отличны на 2 единицы, причем превалирует более легкий изотоп. Здесь мы имеем фундаментальное различие между элементами с четными и нечетными атомными номерами. „В обоих классах число электронов в ядре по большей части четное; действительно, единственные исключения из этого правила составляют бериллий и азот. Как уже давно было указано Гаркинсом, в природе сильно преобладают элементы с четными атомными номерами. Если начертить кривую, выражающую изобилие существующих в природе элементов в зависимости от их атомных весов,

мы заметим ясно выраженные максимумы для атомных весов типа  $8n$ .

Одним из очень немногочисленных непосредственных методов исследования структуры ядер является измерение их относительных масс. Поэтому были приложены все старания, чтобы повысить точность этих измерений. Предел, которого при этом удалось достигнуть с новым масс-спектрографом был в наиболее благоприятных случаях равен  $1/10000$ . Измерялся процентный избыток или недостаток по сравнению с целым числом, считая массу кислорода равной 16. Эта величина была названа „коэффициентом упаковки“ („packing fraction“) и выражается в десятитысячных долях.

На рисунке 3 коэффициенты упаковки нанесены как функции атомных весов, так что ошибки наблюдения одинаковы во всех точках кривой. Точки обозначают результат непосредственных измерений. Начиная с номера 20, они примерно лежат на одной кривой, имеющей минимум около — 10, вблизи железа и никеля. Легкие атомы с нечетными порядковыми номерами лежат на кривой, поднимающейся для водорода до  $+17,8$ ; атомы с четными номерами лежат значительно ниже. В этом проявляется основное различие этих двух классов атомов. Отсюда можно заключить, что легкие атомы с нечетными порядковыми номерами связаны менее крепко и поэтому имеют тяжелую внешнюю структуру, которой не наблюдается в более плотных и устойчивых ядрах гелия, углерода и кислорода.

Если рассчитать массы атомов из коэффициентов упаковки и затем отложить их арифметические разности от целых чисел, мы получим кривую, намеченную в верхней части рисунка. Здесь минимум лежит примерно посередине ряда всех известных атомных весов. У этой кривой ошибки не одинаковы во всех ее точках, но, как показано пунктирными кривыми, сильно возрастают для атомов с большой атомной массой.

*Дж. Чадвик.*

При бомбардировке некоторых элементов  $\alpha$ -частицами, из них выбиваются ядра водорода, или протоны, которые

можно обнаружить по сцинтилляции, вызываемой ими на экране из сернистого цинка. Эти протоны появляются вследствие искусственного разложения ядер этих элементов. Мы полагаем, что разложение ядра происходит когда  $\alpha$ -частица проникает внутрь ядра и задерживается там, в результате чего вылетает протон. Вероятность разложения мала; так, например, в благоприятном случае, когда бомбардируется азот, разлагается 20 ядер на каждый  $10^6$   $\alpha$ -частиц. Вследствие редкости этого эффекта, а также из-за различных экспериментальных трудностей, сведения, добытые нами по сих пор, еще довольно скудны. За исключением углерода и кислорода, все элементы от бора до калия включительно разлагаются при бомбардировке их  $\alpha$ -частицами и испускают при этом протон, обладающий значительной энергией. Это значит, что ядра всех этих элементов содержат протоны. Углерод и кислород, если они вообще разлагаются, не испускают частиц с энергией, превышающей энергию рассеянных  $\alpha$ -частиц. Возможно, что они разлагаются на ядра гелия, но доказательств для этого пока нет.

Некоторые протоны, освободившиеся при искусственном разложении, имеют очень большие энергии, например, энергия протонов, выбитых из алюминия  $\alpha$ -частицами радия C, на 40% превышает энергию ударяющих  $\alpha$ -частиц. Таким образом в некоторых случаях при разложении освобождается энергия. Существует резкая разница в поведении элементов с четным и нечетным атомным номером. Протоны, вылетающие из нечетных элементов, имеют гораздо большую максимальную энергию, нежели протоны из четных элементов. При разложении, состоящем только в уловлении  $\alpha$ -частицы и испускании протона, элемент с нечетным номером переходит в элемент с четным номером, и наоборот. Рассматривая различное поведение четных и нечетных элементов, а также их сравнительное изобилие в природе и их атомные массы, можно сделать заключение, что четные элементы более устойчивы, чем нечетные.

Далее интересно сравнить опыты над искусственным разложением элементов с опытами над рассеянием  $\alpha$ -частиц. Первые показывают, что частицы с пробегом от 3 —

3,5 см способны разложить алюминий, так как могут проникать в ядро алюминия и быть им захваченными. С другой стороны, опыты с рассеянием показывают, что громадное большинство этих  $\alpha$ -частиц рассеивается по обычным законам. Эти опыты говорят, что даже  $\alpha$ -частицы с пробегом в 7 см не в состоянии проникнуть в ядро алюминия. Объяснение этого кажущегося противоречия между двумя сериями опытов было недавно дано Гамовым, на основе волновой механики.

Если предположить, что при разложении улавливается  $\alpha$ -частица и что в столкновении участвуют только  $\alpha$ -частица, ядро и протоны, — тогда следует ожидать, что протон появится под определенным углом с определенной энергией. Опыты с алюминием показывают, что это не имеет места и что вылетают протоны с весьма разнообразными энергиями. Например, протоны, вылетевшие под углом в  $90^\circ$  к направлению ударяющих  $\alpha$ -частиц радия С, имели энергии, лежащие в интервале от 0,3 до 1,1 энергии  $\alpha$ -частиц с пробегом в 7 см. Повидимому, наиболее правильное объяснение этого факта можно дать, предположив, что не все ядра одного и того же типа имеют одинаковые массы или одинаковые общие энергии, так что и разложение ядер и образование новых ядер может происходить с различной энергией. Предположенные здесь колебания массы малы; наибольшее различие масс ядер алюминия достигает около 0,006 единиц массы.

*К. Эллис.*

При многих радиоактивных распадах замечено, что непосредственно после вылета частицы из ядра происходит испускание характеристического излучения высокой частоты. Эти  $\gamma$ -лучи большей частью связаны с превращениями, при которых испускаются  $\beta$ -лучи.  $\gamma$ -лучи можно рассматривать как характеристический спектр ядра, и испускание их происходит вследствие возмущения, вызванного вылетом  $\alpha$ - или  $\beta$ -частицы.

$\gamma$ -лучи однородны с точностью до 1/1000, и отсюда можно сделать некоторые интересные выводы о природе

частицы, испускающей их. Кун показал, что по всей вероятности электроны не могли бы испускать такое однородное излучение высокой частоты и что с достаточной уверенностью то же можно сказать и о протонах. Поэтому нам приходится приписывать происхождение  $\gamma$ -лучей или  $\alpha$ -частицам или всему ядру, как целому, находящемуся например, в процессе вращения. Для выяснения этого вопроса было бы очень интересно, если бы удалось вывести ряд уровней энергии соответствующих  $\gamma$ -лучам. Без сомнения, какая-то система уровней существует, ибо во всех спектрах найдено много соотношений типа  $\nu_1 + \nu_2 = \nu_3$ . Однако для установления некоторой единой системы уровней на основании одних разностей частот требуется более детальное знание этих частот, чем имеем мы в настоящее время. Преодолеть эту трудность можно двумя путями.

Первый путь — это определение абсолютных интенсивностей  $\gamma$ -лучей, т. е. определение вероятности того, что при каждом разложении будет излучен 1 квант  $\gamma$ -лучей. Естественно сделать предположение, что при каждом разложении происходит только одно возбуждение системы уровней, так что, например,  $\gamma$ -лучи, соответствующие определенному изменению уровня, не могут иметь интенсивности, превышающей единицу. Существуют и более точные критерии, могущие дать хорошую проверку предложенных систем разности частот.

Второй путь решения этой проблемы заключается, по видимому, в опытах Астона и Эллиса. Они нашли указания на связь ядра с системой электронов. Поясним это подробнее. Когда  $\gamma$ -лучи какого-нибудь радиоактивного тела падают на тонкий листок свинца, интенсивность фотоэлектронов находится в тесной связи с интенсивностью  $\gamma$ -лучей и с коэффициентами абсорбции. Аналогичные фотоэлектрические группы испускаются и радиоактивными атомами. Их можно трактовать как результат частичного внутреннего поглощения  $\gamma$ -лучей. Если бы ядро и система электронов были так же независимы друг от друга, как ядро и листок свинца, — можно было бы ожидать полного параллелизма между интенсивностью фотоэлектрических групп от

свинца и от радиоактивного атома. На самом же деле обнаружено как раз обратное, и хотя в этом отношении опыты еще недостаточно полны, можно с уверенностью сказать, что с увеличением частоты  $\gamma$ -лучей происходят удивительные колебания отношения внутреннего поглощения к внешнему, что указывает на существование связи ядра с электронами, — это явление само собой уже интересно для изучения строения ядра. Кроме того, мы надеемся, что оно даст нам в руки новый метод для решения вопроса о системе уровней, а именно — позволит различать между собой разные  $\gamma$ -лучи.

*Г. А. Гамов.*

Я хотел бы сделать несколько замечаний, касающихся заключительных слов председателя, трактующих ядро, как собрание  $\alpha$ -частиц.

Существует довольно много указаний на то, что все  $\alpha$ -частицы, составляющие ядро (у тяжелых элементов в ядре имеется до 90  $\alpha$ -частиц), находятся в одном и том же квантовом состоянии с квантовым числом равным единице. Это не противоречит принципу Паули, так как  $\alpha$ -частицы, обладающие четным зарядом, подчиняются статистике Бозе-Эйнштейна. Такое собрание  $\alpha$ -частиц, между коими действуют силы притяжения, быстро изменяющиеся с расстоянием, можно трактовать как небольшую каплю воды, в которой частички сдерживаются поверхностным натяжением.

Точное решение задачи с такой моделью, конечно, чрезвычайно сложно. Однако первое, грубое приближение, которое я сейчас приведу, указывает на ряд интересных свойств такой модели.

Напишем два уравнения:

1) уравнение, связывающее энергию  $\alpha$ -частиц с поверхностным натяжением воображаемой „капли воды“, и

2) квантовые условия обыкновенной квантовой механики.

Тогда мы получим соотношение между „энергией капли“ и числом  $\alpha$ -частиц, находящихся в капле, т. е. атомным весом ядра. Общий вид кривой, иллюстрирующей это соотношение, хорошо согласуется с Астеновской кривой

для дефекта масс, где сперва получается отрицательная энергия, спонтанно меняющаяся для больших значений  $N$ .

По волновой механике задачу эту приходится решать по методу Гартри с самоудовлетворенным полем.

Для ядра, состоящего из  $\alpha$ -частиц, приходится решать уравнение (написанное для одной частицы):

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} + \frac{8\pi^2 m}{h} \left[ E - (N-1) \int \psi \bar{\psi} U(r) dv \right] \psi = 0;$$

здесь второй член в квадратных скобках изображает воздействие остальных  $(N-1)$   $\alpha$ -частиц,  $U(r)$  — энергию взаимодействия двух  $\alpha$ -частиц на расстоянии  $r$  друг от друга.

Решение этого уравнения, при сильно упрощающих предположениях относительно силового поля, было дано д-ром Гартри. Он полагает второй член в скобках просто равным  $(N-1) K \bar{\psi} \psi$  ( $K$  — постоянной). Это предположение, часто употребляемое в теории капиллярности, сводится к пренебрежению Кулоновскими силами отталкивания между  $\alpha$ -частицами и к предположению, что „радиус действия“ сил притяжения мал по сравнению с размерами ядра.

Уравнение это имеет дискретные характеристические числа, дающие правильный порядок величин для энергии и радиуса ядра (путем соответствующего выбора  $K$ ).

Я надеюсь, что дальнейшие вычисления на основе этой модели и при более точном знании сил взаимодействия между  $\alpha$ -частицами, полученном хотя бы из опытов рассеяния  $\alpha$ -частиц гелием, дадут точное соответствие с опытом, во всяком случае для легких элементов. Дальнейшие трудности возникают для элементов тяжелее аргона, где начинают играть роль свободные ядерные электроны, — а мы до сих пор ничего не знаем о поведении ядерных электронов.

*Р. Фаулер.*

Я хотел бы изложить вам, в чем может нам в дискуссии о строении и свойствах ядра помочь новая квантовая теория. Этот вопрос уже был намечен председателем в его вступительном слове. Я хотел бы несколько развить его. Первое, что надо иметь в виду, это то, что новая кван-

товая механика развилась логическим путем, основываясь на свойствах электронов в атомах. Мы должны предположить, что частицы имеют много свойств, присущих волнам. Назовем ли мы их частицами или волнами, это дело вкуса. Выбор названия скорее всего зависит в каждом отдельном случае от их состояния. Раз частицы похожи на волны, мы должны ожидать, например, что они не всегда отразятся от барьеров определенной высоты. Они могут пройти сквозь барьер, конечно, только в некоторых случаях. Вы можете сказать, что существует конечная вероятность для каждого из нас покинуть эту комнату, не открывая дверей и не будучи, конечно, выброшенным через окно. (Затем была детально объяснена сущность отражения частиц от силового барьера и выяснена тесная аналогия такого отражения с оптическим явлением — прохождением света через тонкие слои, когда угол падения больше предельного угла полного внутреннего отражения).

То, что частицы могут проходить через такого рода барьеры, очень важно для объяснения явления испускания  $\alpha$ -частиц тяжелыми ядрами.

Если представить себе ядро так, как мы уже говорили здесь сегодня, в виде некоторого небольшого ящичка, окруженного со всех сторон (в трех измерениях) силовым барьером (рис. 2), то можно положить, что внутри него находится  $\alpha$ -частица, которую надо представлять себе в виде волны, энергия которой меньше потенциальной энергии в верхней части барьера. По классической теории,  $\alpha$ -частица навеки останется внутри барьера. Но по квантовой теории существует конечная вероятность того, что волна пройдет через тонкую стенку и уйдет в бесконечность. Эта мысль и лежит в основе квантовой теории испускания  $\alpha$ -частиц. Идея эта была высказана независимо друг от друга Гамовым — с одной стороны и Герней и Кондоном — с другой. Все они, и в особенности Гамов, разработали ее довольно детально.

Когда  $\alpha$ -частица проходит сквозь барьер, ее, конечно, нельзя уже отождествлять со стоячей волной. Правильно будет изображать  $\alpha$ -частицу затухающим колебанием. Мы

будем внутри барьера иметь затухающее колебание, т. е. гармоническое колебание с обыкновенным коэффициентом затухания, а снаружи очень слабую волну, соответствующую испусканию  $\alpha$ -частицы. На самом деле задачу эту можно решить очень хорошо, причем коэффициент затухания получается в виде мнимой части энергии. Это было с большим успехом сделано Гамовым.

Он нашел, что для этих вычислений не имеет большого значения, какой именно вид вы предположите у внутренней части барьера. Главная же наружная часть его хорошо известна из опытов над рассеянием  $\alpha$ -частиц.

Вероятность для  $\alpha$ -частицы проникнуть через барьер, в сильной мере зависит от энергии  $\alpha$ -частицы. Чем больше ее энергия, тем тоньше барьер, который ей надо пройти, и тем меньше его высота. Поэтому, очевидно, существует очень тесная связь между энергией  $\alpha$ -частицы, о которой мы судим по энергии вылетевшей  $\alpha$ -частицы, и между вероятностью для этой  $\alpha$ -частицы пробраться наружу, о которой мы судим по продолжительности жизни атома. Это и есть закон Гейгера-Нуталла.

В заключение скажу, что это очень красивая теория, и что мы можем быть абсолютно уверены в том, что в общих чертах она правильна. Большая заслуга этой теории в том, что она дает закон Гейгера-Нуталла совершенно независимо от деталей строения ядра.

*О. Ричардсон.*

Я хотел бы сказать несколько слов относительно вращения ядра.

Мне кажется, что априорные аргументы показывают, что в некоторых случаях ядро вращается. Я представляю себе систему, состоящую из одного протона и одного электрона, и позволяю им соединиться. Они образуют атом водорода, находящийся на самом низком из возможных уровней, и при этом произойдет излучение. Из спектроскопических наблюдений ясно, что в нормальном атоме электрон имеет момент вращения, равный половине. Следова-

вательно, при соединении протона с электроном электрон приобретает момент вращения равный половине.

Но если при этом больше ничего не изменится, — закон сохранения моментов окажется нарушенным. Поэтому я говорю, что ядро невозбужденного атома водорода имеет момент вращения, равный половине и противоположный по знаку моменту электрона. Можно возразить, что испущенное излучение может сохранить в неприкосновенности закон моментов, если оно достаточно сильно поляризовано эллиптически. Однако эта возможность чрезвычайно маловероятна.

Спектроскопические данные дают нам два рода доказательств вращения ядра. Первое — это сверх-тонкая структура. Бак и Гаудсмит показали, что каждая „линия“ в спектре висмута на самом деле представляет собой целый ряд очень тонких линий. Они изучили различные переходы, возможные среди этих линий, и нашли, что там существует новый род внутреннего квантового числа, имеющего значение  $4\frac{1}{2}$ . Сверх-тонкое расщепление линий, а также и общая структура спектра тоже находятся в согласии с этим числом —  $4\frac{1}{2}$ . Этот эффект должен быть вызван вращением ядра, ибо магнитный момент электрона уже использован для объяснения обыкновенной мультиплетной структуры спектров. Наконец в сильном магнитном поле каждая Зеемановская компонента расщепляется на 10 одинаково расположенных и одинаково интенсивных линий, соответствующих пространственному квантованию ядра при этом вращении.

По сверх-тонкой структуре спектра цезия Джексоу удалось сравнить вращение ядра с вращением электрона. Оказалось, что величина их одного порядка.

Другое спектроскопическое доказательство вращения ядра основано на чередовании интенсивности линий в полосах спектров двухатомных молекул, как напр.  $H_2$ ,  $He_2$ ,  $N_2$  и  $O_2$ . Существует теорема Гунда о том, что характеристические функции молекул должны быть или все симметричны, или все антисимметричны относительно ядерных координат. Эти функции содержат в виде множителей характеристические функции движения электронов и

вращения молекулы. Характеристические функции вращения молекул симметричны относительно ядерных координат, когда вращательное квантовое число  $p$  четное, и антисимметричны, когда  $p$  нечетное. Значит, если  $p$  — нечетное, электронные функции должны быть симметричны относительно ядерных координат, для того чтобы вся характеристическая функция молекулы была антисимметричной, и наоборот.

Когда  $p$  — четное, условия будут обратные. Отсюда следует, что в таких полосах чередующиеся линии характеризуют состояния, не комбинирующиеся друг с другом. Если ядро ничем себя не проявляет, — часть функций отсутствует, и в каждой полосе не существует чередующихся линий. Это напр., имеет место в случае  $\text{He}_2$ ; отсюда можно заключить, что ядро гелия не имеет вращения. В спектре же  $\text{H}_2$ , напротив, линии имеют чередующуюся интенсивность, соответствующую отношению масс 3:1.

Это и следовало ожидать, если считать, что одна серия линий происходит от молекул, у которых момент ядра равен  $1/2 + 1/2 = 1$  кванту, а другая — от молекул с моментом ядра равным  $1/2 - 1/2 = 0$ .

При пространственном квантовании, в первом случае получаются три различных комбинации (1,0 — 1), а во втором — только одна. Молекула азота, в которую тоже входит атом с нечетным числом электронов, похожа в этом отношении на  $\text{H}_2$ , в то время как  $\text{O}_2$  скорее напоминает  $\text{He}_2$ .

#### *Д. Гартри.*

Есть одна неувязка в этой модели ядра, с плотной серединой и менее плотными краями. Трудно объяснить, почему ядра, повидимому, становятся менее радиоактивными с возрастанием атомного номера, вместо того чтобы, наоборот, стать более радиоактивными. Можно ли объяснить это без каких-либо добавочных предположений?

#### *Э. Резерфорд.*

К несчастью, мы не знаем, из какой части ядра берутся  $\alpha$ -частицы. Они могут происходить или из внутрен-

ней или из внешней части ядра. Весьма вероятно, что в такой тесно связанной системе, как ядро, энергия может очень быстро переходить от одной частицы к другой. Возрастание радиоактивности с уменьшением атомного номера есть, конечно, весьма замечательное явление, и пока что для него не существует никакого объяснения.

Я хотел бы поблагодарить ораторов за их участие в дискуссии и выразить сожаление, что время не позволяет нам устроить обмен мнений по ряду различных вопросов. Наши знания относительно ядра до сих пор находятся еще в очень элементарном состоянии, хотя успехи, достигнутые в этой области, больше, чем я мог ожидать 15 лет тому назад.

---