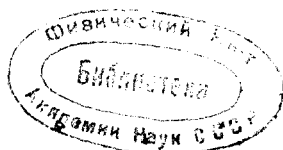


## УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК



### ДИСКУССИЯ О СТРУКТУРЕ АТОМНОГО ЯДРА \*

(Дискуссия состоялась 28 апреля 1932 г. в Лондонском королевском обществе)

*Лорд Резерфорд.* В моей речи сегодня я дам краткий обзор некоторых главных линий, в направлении которых шли успехи нашего знания атомного ядра, с тех пор как я имел честь открыть прошлую дискуссию \*\*. В промежутке между этими дискуссиями имело место значительное движение вперед во многих направлениях и были найдены новые и обещающие методы атаки этой трудной проблемы. Я могу только сослаться на ценные данные, полученные Астоном и другими в отношении изотопного состава элементов и относительной изобильности изотопов многих из элементов. Это сделало возможным определение со значительной точностью химических атомных весов посредством масс-спектрографа. Были сделаны новые опыты по точному определению относительных количеств изотопов свинца и в частности свинца, добытого из чистых урановых и ториевых минералов большого геологического возраста. Данные этого рода крайне важны и интересны не только с точки зрения радиоактивности, но также и в отношении фиксирования точной шкалы времени в геологии. Повидимому, достоверно, что конечный продукт актинового ряда — актиниевый свинец — имеет атомную массу 207 и что актиний происходит в результате превращения изотопа урана. Из относительной изобильности актинового и ториевого свинца, происходящих из старых радиоактивных минералов, можно вывести среднюю продолжительность

\* Отчет опубликован в Proc. Roy. Soc., перев. Д. Блохинцева.

\*\* См. „Успехи физич. наук“, X, 1, стр. 149, 1930.

жизни этого уранового изотопа. Некоторое время тому назад я отметил в „Nature“, что из соображений о средней жизни двух урановых изотопов могут быть выведены важные заключения об образовании элементов на солнце.

Оптические методы. Одним из наиболее интересных успехов последних лет является приложение оптических методов к определению наличия изотопов и к изучению движения ядер. Исследование полосатых спектров молекул легких элементов обнаружило наличие изотопов, существующих в малых количествах по сравнению с главным изотопом. Было показано, что кислород состоит из трех изотопов с массами 16, 17, 18, углерод — 12, 13, бериллий — 8, 9, бор — 11, 10 и недавние наблюдения Юрея, Брикведде и Мерфи, — можно верить, — указывают на присутствие небольших количеств в водороде нового изотопа с массой 2. В настоящее время делаются попытки концентрирования нового изотопа фракционированной перегонкой жидкого водорода.

Наряду с отождествлением линий, принадлежащих новым изотопам, значительное внимание было уделено относительной интенсивности линий в полосатых спектрах. Такое изучение дает не только сведения о спине ядра, но и также подготавливает метод для овладения одним из наиболее важных пунктов ядерной физики, — а именно вопросам об одинаковости членов данной изотопной системы.

В продолжение последних немногих лет было выполнено много исследований по определению сверхтонкой структуры в оптических спектрах. Это открывает другую линию для атаки трудной проблемы спина ядра. Я предоставляю проф. Р. Х. Фаулеру обсуждение полученных данных и выводов, которые могут быть сделаны из них.

Приложение волновой механики. На прошлой дискуссии обсуждалось применение Гамовым, а также Гернеем и Кондоном, тогда еще новых идей волновой механики к некоторым проблемам атомного ядра — и в частности к объяснению хорошо известного правила Гейгера-Неттола, связывающего скорость  $\alpha$ -частицы, вылетающей из радиоактив-

ного вещества с его константой распада. В этой теории предполагается, что ядро окружено высоким положительным потенциальным барьером и что  $\alpha$ -частицы или другие компоненты ядра удерживаются в состоянии равновесия внутри этого барьера значительными притягательными силами неизвестного типа. По такой модели существует конечная вероятность, что  $\alpha$ -частица в ядре сможет пройти через барьер без потери энергии, — вероятность, быстро увеличивающаяся с увеличением энергии  $\alpha$ -частицы. Эта общая концепция ядра оказалась очень ценной в ряде направлений и стала очень полезной рабочей гипотезой для экспериментаторов. К несчастью, до сих пор не было найдено возможности дать детальную теоретическую картину структуры ядра. Вообще предполагается, что ядро тяжелого элемента состоит, главным образом, из  $\alpha$ -частиц с примесью немногих свободных электронов и протонов, но неизвестно точное подразделение между этими составными частями. Для теории существует большая трудность во включении внутри маленького ядра частиц столь различных масс, как  $\alpha$ -частицы и электроны. В добавление к этому, ядро является столь концентрированной структурой и составляющие его частицы так близки друг к другу, что теория действия одной частицы на другую, приложимая при обычных условиях, не может быть приложена для столь маленьких расстояний.

Дело представляется так, как если бы электрон внутри ядра вел себя совсем отлично от электрона на периферии атома. Эта трудность может быть создана нами самими, так как мне кажется более вероятным, что электрон не может существовать в свободном состоянии в устойчивом ядре, но должен быть всегда соединенным с протоном или другой возможной массивной единицей. В этой связи замечательны указания на существование нейтронов в некоторых ядрах. Наблюдение Бека, что в построении тяжелых элементов из легких электроны прибавляются парами, представляет большой интерес и подсказывает, что для образования устойчивого ядра существенно нейтрализовать большой магнитный момент электрона прибавлением другого электрона.

Возможно также, что незаряженные единицы массы 2 и нейтроны массы 1 являются вторичными единицами в структуре ядра.

Хотя в настоящее время ни одна теория ядра не может считаться законченной, все же можно пойти далеко посредством аналогий, основанных на очерченной ранее общей модели ядра. Например, Гамов вывел важные заключения о дефекте массы легких атомов, образованных из  $\alpha$ -частиц, т. е. из элементов типа  $4n$ , исходя из аналогии, что силы внутри ядра похожи в общих чертах на силы, действующие в маленькой капле воды. В дополнение он разобрал с большою ясностью условия, которые должны быть выполнены для образования устойчивого ядра высокого атомного номера. К несчастью, для того чтобы продвинуться дальше в этом направлении, требуется знание масс изотопов многих элементов с гораздо большей точностью, нежели они известны сейчас.

В другом направлении также оказалось плодотворным приложение к ядру многих из общих идей об уровнях энергии, которые принесли столь большую пользу при обсуждении электронной структуры периферии атома. Давно предполагалось, что квантовые законы сохраняют свое значение и внутри ядра, и правильность этого допущения в недавние годы достаточно проверена. Представление об уровнях энергии и возбуждении ядра оказалось крайне полезным в весьма недавней работе над трудной проблемой о происхождении  $\gamma$ -лучей и в понимании результатов наблюдений над искусственным расщеплением элементов.

Происхождение  $\gamma$ -лучей. Давно было установлено, что  $\gamma$ -лучи возникают в ядре и представляют в некотором смысле характеристические собственные колебания ядерной структуры. Интерпретация сложных спектров  $\gamma$ -лучей, принадлежащих радиоактивным элементам, была, однако, затруднена нашим незнанием происхождения этой радиации — возникает ли она от составных частей ядра электрона, протона или  $\alpha$ -частицы, или от ядра, действующего как единое целое. В течение немногих последних лет эта проблема подверглась энергичной атаке и теперь кажется

ясным, что ядерные  $\gamma$ -лучи являются результатом перехода  $\alpha$ -частицы между уровнями энергии в возбужденном ядре. Были разработаны две различных линии нападения, опирающиеся на:

1. Изучение длинно-пробежных  $\alpha$ -частиц радия С и тория С.

2. Тонкую структуру в эмиссии  $\alpha$ -частиц из некоторых радиоактивных веществ.

Можно предположить, что испускание  $\beta$ -частицы в процессе превращения вызывает сильное возмущение в остающемся ядре, так что некоторые из составляющих ядро  $\alpha$ -частиц поднимаются на более высокий уровень энергии, чем нормальный. Эти  $\alpha$ -частицы неустойчивы и после очень короткого интервала времени падают назад на нормальный уровень, излучая излишек своей энергии в форме  $\gamma$ -лучей известной частоты, определяемой квантовыми условиями. В этот короткий интервал времени имеется небольшой шанс, что  $\alpha$ -частицы в высоких уровнях могут протечь сквозь потенциальный барьер ядра. С этой точки зрения убегающие с различных уровней  $\alpha$ -частицы и представляют наблюдаем е группы  $\alpha$ -частиц с большим пробегом. Энергия убегающих  $\alpha$ -частиц дает значение уровня энергии, занимаемого  $\alpha$ -частицей в возбуждаемом ядре перед ее освобождением.

Для того чтобы проверить эту гипотезу, длиннопробежные  $\alpha$ -частицы радия С были тщательно анализированы при помощи новых методов счета группой работников: Вин Вильямсом (Wynn Williams), Уордом (Ward), Льюисом (Lewis) и автором, при этом было найдено, что они состоят из, по крайней мере, десяти различных групп.

Было найдено, что разница энергий между различными группами тесно связана с энергиями некоторых из наиболее заметных  $\gamma$ -лучей и в общем опыты дают сильное доказательство того, что  $\gamma$ -лучи обязаны своим происхождением переходам в возбужденных ядрах одной или более  $\alpha$ -частиц. В то же самое время эксперименты дают прямые сведения о величине некоторого числа возможных уровней энергии в этом ядре.

В преобладающем большинстве случаев  $\alpha$ -частицы испускаются в радиоактивном превращении с одинаковой скоростью. Розенблум (Rosenblum), однако, показал, что элемент торий С испускает не одну, а пять различных групп  $\alpha$ -частиц и с тех пор были получены доказательства тонкой структуры  $\alpha$ -лучей также и для других радиоактивных элементов. Гамов отметил, что  $\gamma$ -лучи должны бы возникать во всех случаях, где налицо имеется такая тонкая структура  $\alpha$ -лучей. Вследствие некоторых технических трудностей в случае тория С было трудно дать ясное доказательство правильности этой точки зрения. Эллис, а также Розенблум, пришли к заключению, что взгляд Гамова правилен, но Мейтнер пришла к противоположному выводу.

Я могу только упомянуть вскользь некоторые эксперименты Мр. Боудена и мои для доказательства испускания  $\gamma$ -лучей актиниевой эманацией, относительно которой Льюис и Вин-Вильямс нашли, что она излучает две различных группы  $\alpha$ -лучей. Результаты, как мне кажется, подкрепляют общую правильность теории, согласно которой тонкая структура в эмиссии  $\alpha$ -лучей всегда сопровождается появлением  $\gamma$ -лучей. Я предоставляю одному из следующих ораторов, др. Эллису, — возможность изложения более адекватного настоящему положению этой важной проблемы.

Раз происхождение лучей определено установлено, имеется разумная перспектива успешной атаки проблемы интерпретации спектра  $\gamma$ -лучей, — проблемы, разрешение которой только начато. Очевидно, можно ожидать, что разрешение этой проблемы бросит много света на детальную структуру ядра. Для этой цели весьма важно исследовать спектр  $\gamma$ -лучей с наибольшей возможной точностью, а это требует многих лет работы.

Прежде чем оставить эту часть предмета, мне хотелось бы подчеркнуть замечательное различие в возмущении ядра при эмиссии  $\alpha$ -частицы и  $\beta$ -частицы. Странно сказать, освобождение  $\alpha$ -частицы либо не возбуждает ядра вовсе, или поднимает одну или более составляющих  $\alpha$ -частиц на сравнительно низкий уровень энергии выше нормального. Однако, во многих случаях освобождение  $\beta$ -частицы создает сильное

возбуждение остаточного ядра, в результате которого некоторые  $\alpha$ -частицы поднимаются на очень высокий уровень энергии и вызываются  $\gamma$ -лучей большой энергии. Это различие между действиями двух типов частиц очень поразительно и может быть интимно связано с процессами, которые вызывают эмиссию  $\beta$ -частицы из радиоактивности элемента.

Всякий раз, когда мы имеем дело с поведением электрона в ядре, мы встречаем большие трудности в приложении наших теоретических идей. Наиболее поразительный пример может быть тот, что радиоактивные ядра типа  $\beta$ -лучей излучают электроны со сплошным спектром энергии, и что, кажется, здесь нет компенсирующих процессов, которые бы позволили установить определенный баланс энергии, ожидаемый по квантовой динамике. Без сомнения, это одна из наиболее фундаментальных проблем сегодняшнего дня, но, вероятно, мы не будем иметь достаточно времени, чтобы дискутировать ее во всей ее теоретической сложности.

Возбуждение ядра  $\gamma$ -лучами. До недавнего времени вообще предполагалось, что абсорбция рентгеновых лучей и  $\gamma$ -лучей является следствием взаимодействия радиации только с внеядерными электронами и что самое ядро не участвует в этом процессе. Теперь ясно, что если квантовая энергия  $\gamma$ -лучей превосходит 2 млн. вольт, появляется дополнительный тип абсорбции обычным ядром, сопровождаемый эмиссией характеристической радиации с частотами, отличными от первичной. Этот эффект абсорбции ядра был выявлен работой Чао, Мейтнер и Гупфильда, Тарранта и других, применявших проникающую  $\gamma$ -радиацию тория С с энергией около  $2,65 \cdot 10^6$  вольт-электронов.

В статье, находящейся сейчас в стадии публикации, Грэй и Таррант\* дают результаты детального изучения ядерного возбуждения различных элементов. Применялись не только  $\gamma$ -лучи тория С, но также и высокочастотные компоненты радиации радия С. Грэй и Таррант пришли к заключению, что это ядерное возбуждение есть общее

\* Proc. Roy. Soc., A. 186, 662 (см. статью М. Кронштейна в настоящем выпуске „Успехов“, стр. 649). *Ред.*

свойство элементов, во всяком случае между кислородом и свинцом. Характеристическая радиация сходного типа, кажется, излучается всеми элементами, причем интенсивность излучения от различных элементов варьирует приблизительно как квадрат атомного номера. Эта характеристическая радиация ядра, которая испускается равномерно по всем направлениям, может быть разложена в две компоненты с квантовыми энергиями около 500 000 и 1 000 000 вольт-электронов. В объяснении Грэй и Таррант указывают, что  $\gamma$ -радиация не возбуждает ядра как целого, но только некоторые составные части, подобные  $\alpha$ -частицам, которые общи всем элементам. Может быть, наблюдаемые характеристические радиации представляют некоторые способы вибраций самой структуры  $\alpha$ -частицы. Представляет большой интерес провести эти важные исследования дальше, но успеху препятствует трудность получения интенсивных источников радиации высокой частоты с широким спектром квантовых энергий. Возбуждение ядра посредством радиации высокой частоты без сомнения тесно связано с процессом, который освобождает  $\gamma$ -лучи из радиоактивных ядер, и может помочь пролить дальнейший свет на эту проблему.

Искусственное преобразование. В самые последние годы увеличились наши знания об искусственном преобразовании легких элементов посредством бомбардировки  $\alpha$ -частицами. Это увеличение явилось следствием развития новых электрических методов счета  $\alpha$ -частиц и протонов, сменивших затруднительный метод сцинтилляций. Позе первый указал, что некоторые из протонов, выбрасываемые из алюминия, появляются в группах определенных скоростей. Наше знание было расширено работами Позе Мейтнер, Боте, де-Бройля и Ринге и Чадвика и Констэбля. Например, Чадвик и Констэбль разложили протоны, освобожденные из алюминия  $\alpha$ -частицами полония на восемь различных групп, соединенных в пары. В объяснение они предположили, что протоны или  $\alpha$ -частицы в бомбардируемом ядре занимают определенные уровни энергии. Предполагается, следуя Гернею, что благодаря резонансу имеется гораздо больше шансов прохождения сквозь по-



тенциальный барьер ядра, если бомбардирующие  $\alpha$ -частицы имеют почти ту же энергию, как протон или  $\alpha$ -частица в уровне ядра. Для данной энергии  $\alpha$ -частиц испускаются две группы протонов, соответствующие, как полагают, двум различным процессам захватывания  $\alpha$ -частицы ядром. Сходные результаты наблюдались во фторе и других легких элементах.

Было найдено, что эти резонансные уровни для избранного захватывания  $\alpha$ -частицы довольно широки, соответствуя приблизительно 5% уровня энергии. Результаты в пределах того, что сделано, дают важные сведения о значениях уровней энергии легких ядер и, путем, применения еще более быстрых частиц, чем полониевые, мы сможем ожидать еще дальнейшего расширения наших знаний об этих уровнях.

В интерпретации этих экспериментов неявно принималась приложимость закона сохранения энергии и количества движения. Таким путем можно было вычислить со значительной точностью атомную массу, получающуюся в результате захвата  $\alpha$ -частицы ядром и испускания протона. В тех случаях, когда с одним резонансным уровнем связаны две группы протонов различных скоростей, было найдено появление  $\gamma$ -лучей, квантовая энергия которых приблизительно соответствует разности энергии протонов в двух группах. Изучение  $\gamma$ -радиации, испускаемой в процессе искусственного превращения, привело в последние месяцы к новым и интересным результатам. Боте и Беккер в 1930 г. нашли, что бериллий, бомбардируемый  $\alpha$ -частицами, не испускает протонов, но дает нечто такое, что кажется  $\gamma$ -радиацией большей проникающей силы, нежели  $\gamma$ -лучи радия С.

Поглощение этой радиации материей изучалось И. Кюри-Жолио и М. Жолио, а также Вебстером. В текущем году И. Кюри-Жолио и М. Жолио наблюдали ионизационным методом, что эта радиация вырывает протоны большой скорости из водородсодержащих веществ. Сперва предполагалось, что эти быстрые протоны могут быть результатом взаимодействия между квантом  $\gamma$ -лучей и протоном, но

оказалось, что это требует очень высокой квантовой энергии излучения порядка 50 млн. вольт. Как результат дальнейших опытов электрическим методом, Чадвик нашел, что аналогичный эффект отдачи наблюдается для всех легких атомов и пришел к заключению, что эффект может быть объяснен при допущении, что из ядра бериллия освобождается поток быстрых нейтронов. Нелегко сделать выбор между этими двумя предположениями, но накопилось достаточно доказательств, что этот новый тип радиации обладает удивительными свойствами и способен производить разложение азота, вероятно, каким-то новым путем.

Я предоставляю д-ру Чадвику дать вам более полный отчет о работе по искусственному превращению и о свойствах этого нового типа радиации. Идея о возможности существования „нейтронов“, т. е. тесной комбинации протона и электрона с массой около 1 и с нулевым зарядом не нова. В бэкеровской лекции перед этим Обществом в 1920 г. я дискутировал вероятные свойства нейтрона, в то время как д-р Глассон и И. Робертс делали опыты в Кэвендишской лаборатории с целью обнаружить образование нейтронов в сильном электрическом разряде через водород, но без успеха. Если гипотеза о нейтронах будет подтверждена опытом, она будет, очевидно, иметь большое влияние на наше понимание образования ядра и его состава. Много лет тому назад в лекции перед Королевским институтом я обсуждал возможность образования тяжелых ядер из водорода через посредничество нейтрона. Не кажется невероятным, что нейтроны благодаря их взаимодействиям могут собираться в массивные агрегаты, которые с течением времени в процессах разложения и соединения перестраиваются в ядра устойчивых элементов. Я просто напомнил эту старую идею, как, может быть, достойную дальнейших размышлений в свете новых знаний.

Рассеяние  $\alpha$ -частиц. В предыдущих дискуссиях внимание было направлено на аномальное рассеяние  $\alpha$ -частиц легкими элементами и на трудности интерпретации полученных результатов. Многие из этих трудностей были устранены применением идей волновой механики к этой про-

блеме. Например, Х. М. Тэйлор мог объяснить со значительными деталями аномальное рассеяние  $\alpha$ -частиц, наблюдаемое в водороде и гелии, простыми соображениями, основанными на волновой механике. Мотт направил внимание на ожидаемые аномалии в рассеянии  $\alpha$ -частиц малой скорости атомами гелия, и его заключения были подтверждены работой Чадвика и Блэккетта и Чампиона. По теории Мотта сходные аномалии должны ожидаться при столкновении между двумя одинаковыми ядрами любого сорта.

Заключение. Я старался в этом обзоре привлечь ваше внимание к тем линиям экспериментальной атаки проблемы структуры атомного ядра, которые мне кажутся наиболее важными. Я не входил в спекулятивные вопросы, подобные вопросу о возможности аннигиляции материи и ее превращения в излучение, не касался и догадок о численном соотношении между единицей заряда и постоянной Планка  $h$  или соотношения между массой протона и электрона; я не входил в трудные вопросы образования и превращений ядра под влиянием условий, существующих в горячих звездах, — вопросы, о которых много писалось.

Делая это обозрение, я был поражен сравнительно быстрым прогрессом, который произошел со времени нашей последней дискуссии в овладении этой центральной проблемой физики. Прогресс был бы много ускорен, если бы мы могли получить в лаборатории мощные, но контролируемые источники быстрых атомов и радиации высокой частоты для бомбардировки материи. В экспериментах Тюва, Хофстеда и Дэля в Отделении земного магнетизма в Вашингтоне и Кокрофта и Уолтона в Кэвендишевской лаборатории было найдено возможным посредством высоких потенциалов создать искусственный поток протонов с индивидуальной энергией около 1 млн. вольт-электронов и изучить их свойства. Некоторые другие методы получения быстрых атомов испытываются другими исследователями, я мог бы особенно сослаться на исключительно остроумный метод, развитый Лауренсом и Ливингстоном в Калифорнском университете, где посредством многократных ускорений были получены протоны с энер-

гией, отвечающей примерно 1 млн. вольт. В недавно опубликованной статье они приходят к заключению, что этим методом возможно получить поток быстрых атомов еще большей энергии. Таким образом здесь открывается полная надежд перспектива на то, что в близком будущем мы сможем получить источники быстрых атомов и высокочастотной радиации и вместе с тем расширить наши знания о структуре ядра.

### Д О В А В Л Е Н И Е

Пока этот доклад обсуждался среди членов Общества, Кокрофтом и Уолтоном в Кэвендишевской лаборатории были сделаны новые опыты. Была собрана установка, дающая постоянное напряжение в 600—800 тысяч вольт. Посредством вспомогательной разрядной трубки создавались протоны и затем ускорялись в вакууме высоким потенциалом. Этим путем можно было получить постоянный поток быстрых протонов с энергией до 600 тысяч вольт и применить их для бомбардировки некоторых элементов. Материал, подлежащий бомбардировке этими быстрыми ионами, помещался внутри трубки под  $45^\circ$  к направлению луча. На стенке трубки было закреплено тонкое слюдяное окошко так, что существование быстрых частиц можно было исследовать методом сцинтилляций вне трубки.

Первый элемент, подвергнутый изучению, был литий, причем при ускоряющем потенциале около 125 тысяч вольт наблюдалось немного ярких сцинтилляций. Их число быстро увеличивалось с увеличением напряжения до 400 тысяч вольт, когда уже наблюдалось много сотен сцинтилляций в минуту при токе протонов в немного микроампер. Эти частицы имели максимальный пробег в воздухе около 8 см. Яркость частиц указывает, что они, вероятно, являются  $\alpha$ -частицами, и это было подтверждено наблюдениями следов, производимых этими частицами в камере Вильсона. Кажется ясным, что некоторые из ядер лития разлагаются. Простейшее допущение заключается в том, что ядро лития массы захватывает протон и затем результирующая масса 8 ломается на две  $\alpha$ -частицы. По этому взгляду излучаемая

энергия отвечает 16 млн. вольт-электронов, значение, находящееся в хорошем согласии с сохранением энергии, если принять во внимание разницу между начальной и конечной массой ядра. Если этот взгляд правилен, то разложение ядра лития должно бы создавать две  $\alpha$ -частицы, выброшенные в противоположных направлениях, и это можно испытать на опыте. Можно оценить, что при 200 тысячах вольт число разложений есть 1 на  $10^9$  протонов.

Опыты были сделаны и с другими элементами. Бор, фтор и алюминий все дают частицы, похожие на  $\alpha$ -частицы с характеристичным пробегом для каждого элемента. Наблюдались также сцинтилляции от бериллия и углерода, некоторые яркие, другие — слабые, и есть указания, что азот дает немного ярких сцинтилляций. Кислород и медь не дают сцинтилляций для протонов с энергией до 400 тысяч вольт.

Очевидно, что изучение этим методом всех элементов и определение природы быстрых частиц, которые могут испускаться, требует большей работы. В некоторых случаях выбрасываемые частицы кажутся  $\alpha$ -частицами, но мы должны всегда иметь в виду возможность эмиссии частиц различных типов и масс.

Нетрудно сделать предположения о возможных способах разложения некоторых из отмеченных элементов, предположения, согласные с законом сохранения энергии. Например, возможно, что ядро фтора с массой 19 после захватывания протона ломается на  $\alpha$ -частицу и кислородное ядро. Сходным образом алюминий может превращаться в магний. Мы должны, однако, ожидать дальнейших доказательств, прежде чем какое-нибудь определенное решение может быть принято в таких вопросах. Ясно, что успешное приложение этих новых методов открывает новое и широкое поле исследования, в котором может изучаться эффект бомбардировки материи быстрыми ионами разных сортов. Д-ра Кокрофта и Д-ра Уолтона можно поздравить с успехом в этих новых экспериментах, которые потребовали нескольких лет упорной подготовительной работы.

*Дж. Чадвик.* Опыты, в которых элементы бомбардируются  $\alpha$ -частицами, оказались плодотворными в отношении сведений о структуре ядра. Успехи со времени последней дискуссии являются частично следствием усовершенствования экспериментальной техники, частично — результатом приложения новой механики к этим проблемам.

Чтобы показать, как было достигнуто это расширение знаний, я возьму как пример случай ядра алюминия. Когда пучок  $\alpha$ -частиц падает на тонкую алюминиевую фольгу, некоторые из частиц рассеиваются при столкновении с ядром алюминия. Если падающие  $\alpha$ -частицы медленны, рассеяние вполне описывается Резерфордской теорией рассеяния, и мы можем сделать заключение, что сила между  $\alpha$ -частицей и ядром подчиняется закону Кулона. По мере увеличения скорости падающих частиц, рассеяние начинает отклоняться от нормального закона, например, величина рассеяния при  $135^\circ$  сперва уменьшается ниже нормальной и затем быстро возрастает вместе с дальнейшим увеличением скорости  $\alpha$ -частиц.

Средствами классической механики трудно объяснить это аномальное рассеяние, но оно легко доступно истолкованию на основе волновой механики.

Предположим, что  $\alpha$ -частица испытывает очень тесный удар с ядром и подходит к точке потенциального барьера, где толщина барьера сравнима с длиной волны  $\alpha$ -частицы. Тогда имеется некоторая вероятность, что  $\alpha$ -частица проникнет через барьер. Рассеянная волна, которая представляет такую частичку, будет иметь некоторое отклонение в фазе и будет нарушать классическое распределение рассеянных частиц. Опыты Риджера показывают, что рассеяние становится аномальным, когда  $\alpha$ -частица подходит на расстояние  $6 \cdot 10^{-13}$  см к ядру алюминия. На основе некоторых вероятных допущений следует, что радиус, отвечающий вершине потенциального барьера, должен лежать между 3 и  $6 \cdot 10^{-13}$  см. Беря средние  $4,5 \cdot 10^{-13}$  см, получаем для высоты барьера Al (для  $\alpha$ -частицы) около  $8 \cdot 10^6$  вольт-электронов.

Я обращаюсь теперь к наблюдениям над искусственным

разложением алюминия. Когда алюминий бомбардируется  $\alpha$ -частицами, мы наблюдаем, в добавление к рассеянным  $\alpha$ -частицам, эмиссию протонов высокой энергии, которая приблизительно одинакова по всем направлениям:  $\alpha$ -частица, проникающая в ядро  $\text{Al}^{27}$ , может быть захвачена; испускается один протон и образуется ядро  $\text{Si}^{30}$ . Мы принимаем, что  $\alpha$ -частицы и протоны в ядре находятся на определенных уровнях энергии. Захваченная  $\alpha$ -частица с кинетической энергией  $W$  падает, скажем, на уровень  $E_\alpha$ , а протон испускается с уровня  $E_p$  (оба ниже основного уровня). Кинетическая энергия выброшенного протона, пренебрегая небольшой энергией остаточного ядра, будет  $W + E_\alpha - E_p$ . По этому взгляду, однородный пучок  $\alpha$ -частиц, падающих на очень тонкую  $\text{Al}$ -фольгу, будет давать эмиссию протонов одинаковой энергии (в определенном направлении). Наблюдения, однако, показывают, что в этом случае испускаются две группы протонов. Это можно объяснить, предполагая, что в некоторых (большинстве) случаях окончательное ядро  $\text{Si}^{30}$  образуется в две стадии;  $\alpha$ -частица захватывается (может быть, в промежуточный уровень), и испускается протон с образованием возбужденного ядра  $\text{Si}^{30}$ , которое переходит в основное состояние с эмиссией кванта излучения. Это объяснение подтверждается тем наблюдением, что  $\text{Al}$ , бомбардируемый  $\alpha$ -частицами, действительно испускает  $\gamma$ -лучи надлежащей энергии.

Наблюдения протонов, испускаемых из толстой фольги  $\text{Al}$ , подвергнутой действию  $\alpha$ -лучей полония, показывает, что протоны состоят из восьми групп, соединенных в пары. Хотя столкновения между ядром  $\text{Al}$  и  $\alpha$ -частицами имеют место для всех скоростей от нуля до начальной скорости  $\alpha$ -частиц, все же разложения кажутся результатом действия  $\alpha$ -частиц только некоторой определенной скорости. Такая возможность впервые была отмечена Гернеем, который указал на возможность резонансного эффекта между падающими  $\alpha$ -частицами и атомным ядром. Если  $\alpha$ -частица имеет энергию, соответствующую резонансному уровню ядра, то ее шансы проникновения сквозь потенциальный барьер будут значительно больше, чем тогда, когда ее энергия больше

или меньше этой. Первое доказательство резонансного эффекта было найдено Позе при разложении алюминия. Более поздние, только что отмеченные наблюдения, показывают, что имеется четыре резонансных уровня ядра алюминия между 4 и  $5,3 \cdot 10^6$  вольт-электронов. Проникновение  $\alpha$ -частицы через каждый уровень и ее захватывание дает эмиссию двух групп протонов.

Существует еще большая область потенциального барьера алюминия, которая пока не исследована этим путем. Может быть дальнейшие эксперименты откроют некоторые соотношения между уровнями того же самого элемента и соответствие между уровнями одного элемента и уровнями других.

Недавно было обнаружено, что разложение элементов бериллия и бора представляет особый интерес. Боте и Беккером было найдено, что эти элементы, бомбардируемые  $\alpha$ -частицами полония, испускают проникающую радиацию, повидимому  $\gamma$ -типа. Несколько месяцев тому назад И. Кюри-Жолио и М. Жолио сделали поразительные наблюдения, показывающие, что это излучение имеет свойство выбрасывать протоны с большими скоростями из вещества, содержащего водород. Ими было найдено, что выбрасываемые радиацией бериллия протоны имеют скорости до  $3 \cdot 10^9$  см/сек. Кюри и Жолио предположили, что это выбрасывание протона происходит благодаря процессу, аналогичному эффекту Комптона, и пришли к заключению, что радиация бериллия имеет квант с энергией около 50 млн. вольт-электронов. Принятие этого допущения вызывает две серьезных трудности. Во-первых, известно, что рассеяние кванта электроном хорошо описывается формулой Клейна-Нишина, и нет оснований предполагать, что сходные отношения не будут правильными для рассеяния протона. Наблюдаемое рассеяние, однако, слишком велико по сравнению с тем, какое дается формулой Клейна-Нишины. Во-вторых, трудно понять испускание кванта столь высокой энергии при превращении  $\text{Be}^9 + \text{He}^4 \rightarrow \text{C}^{13} + \text{квант}$ . Поэтому я изучил свойства этой радиации, пользуясь особым счетчиком\*. Было найдено, что

---

\* См. печатаемую ниже статью Чадвика „Нейтроны“. *Ред.*



радиация выбрасывает частицы не только из водорода, но из гелия, лития, бериллия и т. п. и предположительно из всех элементов. Во всех случаях частицы, повидимому, являются атомами отдачи элемента. Повидимому невозможно приписывать выбрасывание этих частиц отдаче столкновению с квантом радиации, если энергия и импульс сохраняются при ударе.

Удовлетворительное объяснение экспериментальных результатов может быть получено, если предположить, что радиация состоит не из квантов, но из частиц с массой 1 и зарядом 0, — нейтронов. В случае двух элементов, водорода и азота, пробег атомов отдачи был измерен с большой степенью точности, и отсюда были выведены их максимальные скорости. Они оказались соответственно  $3,3 \cdot 10^9$  см/сек и  $4,7 \cdot 10^8$  см/сек. Пусть  $M$ ,  $V$  будет масса и скорость частицы, из которых состоит радиация. Тогда максимальная скорость, которая может быть сообщена при столкновении ядру водорода, будет:

$$U_H = \frac{2M}{M+1} \cdot V,$$

а ядру азота:

$$U_N = \frac{2M}{M+14} \cdot V,$$

отсюда:

$$\frac{M+14}{M+1} = \frac{U_H}{U_N} = \frac{3,3 \cdot 10^9}{4,7 \cdot 10^8}$$

и

$$M = 1,15.$$

В пределах ошибок опыта  $M$  может быть принято за 1 и поэтому:

$$V = 3,3 \cdot 10^9 \text{ см/сек.}$$

Так как радиация обладает крайне большой проникающей силой, то частицы должны иметь заряд очень малый по сравнению с зарядом электрона. Предполагается, что этот заряд равен 0, и мы можем допустить, что нейтрон состоит из протона и электрона в очень тесной комбинации.

Имеющиеся факты сильно поддерживают гипотезу о нейтронах. В случае бериллия, процесс превращения, который дает эмиссию нейтрона, есть  $\text{Be}^9 + \text{He}^4 \rightarrow \text{C}^{12} + \text{нейтрон}$ . Можно показать, что наблюдения совместимы с энергетическими соотношениями в этом процессе. В случае бора, процесс превращения, вероятно, есть  $\text{B}^{11} + \text{He}^4 \rightarrow \text{N}^{14} + \text{n}^1$ ; в этом случае массы  $\text{B}^{11}$ ,  $\text{He}^4$  и  $\text{N}^{14}$  известны из измерений Астона, кинетическая энергия частиц может быть найдена экспериментально, и поэтому возможно получить более близкую оценку массы нейтрона. Выведенная таким образом масса равна 1,0067. Принимая во внимание ошибку в измерении массы, следует думать, что масса нейтрона, вероятно, лежит между 1,005 и 1,008. Эти значения поддерживают тот взгляд, что нейтрон есть комбинация протона и электрона и дает для энергии связи частиц около  $1 - 2 \cdot 10^6$  вольт-электронов.

Нейтрон может быть изображен как маленький диполь, или, может быть лучше, как протон, погруженный в электрон. Так или иначе „радиус“ нейтрона будет между  $10^{-13}$  см и  $10^{-12}$  см. Поле нейтрона должно быть очень мало, за исключением очень близких расстояний, и нейтроны при прохождении через вещество не будут подвергаться воздействию, за исключением тех случаев, когда они прямо попадают в атомное ядро. Измерения, сделанные над прохождением нейтронов через материю, дают результаты, находящиеся в общем согласии с этими взглядами. Столкновение нейтронов с ядрами азота изучалось доктором Фезером, применявшим автоматическую камеру Вильсона. Он нашел, что в добавление к нормальным следам атомов отдачи азота, имеется еще некоторое число разветвляющихся путей. Это — следствие разложения ядра азота. В некоторых случаях нейтрон захватывается, испускается  $\alpha$ -частица и образуется ядро  $\text{B}^{11}$ . В других случаях механизм еще неизвестен с определенностью.

Ч. Д. Эллис. Уже много лет было известно, что  $\gamma$ -лучи образуют характеристический спектр радиоактивного ядра, но только совсем недавно получены факты, дающие указания на способ их возникновения. Сперва источником

$\gamma$ -лучей считали ядерные электроны, но эта точка зрения, столь естественная из нашего опыта о внеядерной структуре, начала подвергаться подозрениям по мере накопления сведений о том, что поведение ядерных электронов сильно отличается от поведения электронов вне ядра. Быстрый прогресс — как экспериментальный, так и теоретический — в нашем знании  $\alpha$ -частиц дал возможность удовлетворительным образом избежать этой трудности, и теперь вообще полагают, что  $\gamma$ -лучи связаны с переходами между стационарными состояниями  $\alpha$ -частиц внутри ядра. Это заключение имеет важное значение в том отношении, что стимулирует и дает руководящую точку зрения для дальнейшего исследования  $\gamma$ -лучей и указывает возможности получения подробных и точных сведений об  $\alpha$ -частицах.

Лорд Рёзерфорд уже отметил, что работа последнего времени выявила сложность в эмиссии  $\alpha$ -лучей, сложность не замеченную в более ранних экспериментах. Во-первых, было обнаружено явление  $\alpha$ -частиц с длинным пробегом, наиболее типичный пример которого дает радий С. При разложении этого тела из миллиона атомов около 99 978 испускают  $\alpha$ -частицы, энергия которых есть  $7,8 \cdot 10^6$  V, в то время как остающиеся 22 испускают частицы с большей энергией, распределенной по крайней мере по девяти группам. Быстрейшая из этих групп имеет излишек 3 000 000 V покрывая как раз интервал известных  $\gamma$ -лучей. Более близкое изучение показывает, что разница энергии между быстрыми группами и главной ( $7,8 \cdot 10^6$  V) группой согласуется с  $h\nu$  для  $\gamma$ -лучей. Далее, в то время как число частиц этих групп крайне мало, совокупное число квантов лучей достигает одного кванта на атом. Как приблизительное согласие частот с энергиями, так и согласие относительных интенсивностей  $\alpha$ -частиц с большим пробегом и числа квантов, совместимы с тем взглядом, что ядро радия С образуется первоначально в возбужденном состоянии. Тогда для ядра открыты две возможности, которыми оно может освобождать свою энергию. Первая и наименее вероятная есть разложение сразу, в этом

случае  $\alpha$ -частица уносит всю энергию возбуждения; такие  $\alpha$ -частицы образуют одну из групп высокой энергии. Другая возможность заключается в том, что ядро будет сперва испускать часть своей энергии возбуждения в форме  $\gamma$ -лучей, и затем останется с энергией как раз достаточной, чтобы испускать нормальные  $\alpha$ -частицы с энергией  $7,8 \cdot 10^6$  V. Это объяснение было рассмотрено детально лордом Рёзерфордом и автором \* и также впоследствии Гамовым и Дельбрюком \*\* и, хотя имеющиеся данные еще недостаточны, чтобы испытать этот взгляд во всех деталях, можно все же, по крайней мере, сказать, что отношения в энергии и интенсивностях с ним совместимы.

Торий С также обнаруживает серию групп  $\alpha$ -лучей, которые распределены по другой схеме. Они обычно относятся к тонкой структуре групп  $\alpha$ -частиц, главным образом потому, что разности энергий в этом случае составляют только около 300 000 V. Имеется и другое отличие: в этом случае наименее интенсивные группы являются и группами с наименьшей энергией. Сразу ясно, что объяснение для радия С не может быть здесь приложено, но Гамовым была указана простая точка зрения, которая, кажется, пригодна в этом случае. Его взгляд заключается в том, что ядра тория С первоначально все находятся в одном и том же состоянии. Каждое ядро имеет некоторое, способное освободиться, количество энергии. Ядро может освободить эту энергию или испуская  $\alpha$ -частицу с этой полной энергией или оно может испустить  $\alpha$ -частицу в одной из серии групп более низкой энергии, а оставшая энергия сохранится в ядре как энергия возбуждения. Существенное различие этого взгляда о связи  $\alpha$ -частиц и  $\gamma$ -лучей в сравнении с первой схемой заключается в том, что эмиссия  $\gamma$ -лучей есть процесс, следующий за эмиссией  $\alpha$ -частицы. Этот отличный взгляд недвусмысленно подсказывается в этом случае относительными интенсивностями  $\gamma$ -лучей и  $\alpha$ -частиц в группах. Следует заметить, что принимается, что эмиссия

\* Rutherford and Ellis, Proc. Roy. Soc., A. 122, 667 (1931).

\*\* Gamow und Delbrück, Z. Physik 72 492, 1931.

$\gamma$ -лучей происходит после разложения, в то время как с точки зрения энергетических отношений, было бы также легко принять что  $\alpha$ -частица в нормальном состоянии сперва совершает переход в состояние меньшей энергии с испусканием  $\gamma$ -лучей и тогда выбрасывается из ядра с этого уровня.

Такой взгляд приводил бы, однако, к чрезвычайной трудности: в то время как мы имеем убедительное объяснение для большого промежутка времени, в течение которого может существовать радиоактивный атом, обладая все же потенциальной возможностью разложения, все другие доказательства показывают, что какая-нибудь система, обладающая возможностью испускания радиации, не может существовать как таковая более, чем маленькую долю секунды. Период тория С для  $\alpha$ -разложения равен приблизительно 3 час., и какой-нибудь взгляд, отличный от взгляда Гамова, должен был бы исходить из возможности излучения с полупериодом в 3 час., что явно невозможно. Я исследовал приложимость гамовской теории к случаю тория С. Подробности тонкой структуры  $\alpha$ -частиц были найдены Розенблумом из его опытов с парижским электромагнитом, и первый шаг состоял в том, чтобы показать, что торий С фактически испускает  $\gamma$ -лучи. Этого никогда не думали до тех пор, пока это не было предсказано Гамовым. Действительно,  $\gamma$ -лучи были исследованы посредством спектра  $\beta$ -лучей, и я измерил спектры  $\beta$ -лучей как соединенной эмиссии тория  $C + C''$ , так и одного тория  $C''$ . Опыты описаны детально в статье, находящейся в печати; результаты таковы, что некоторые группы, найденные в соединенном спектре, определенно не встречаются в спектре одного тория  $C''$ . Следующим пунктом аргументации было бы доказательство того, что частоты  $\gamma$ -лучей приблизительно отвечают разностям энергий  $\alpha$ -частиц групп, найденных Розенблумом. Это кажется и оправдывается на самом деле в пределах, правда, довольно больших погрешностей данных. И наконец, последним пунктом аргументации является рассмотрение относительных интенсивностей с целью показать, что относительное число  $\alpha$ -частиц в различных подгруппах отвечает

относительному числу квантов, выведенному из спектра  $\gamma$ -лучей. Невозможно дать определенный ответ на этот вопрос. Все, что можно сказать, сводится к тому, что относительные интенсивности совместимы с этим взглядом. С тех пор как писалась статья, на которую я ссылался, я сделал некоторые дальнейшие опыты. Хотя я и не получил каких-нибудь сильных доказательств, я все же подтвердил ранее сделанные заключения, пользуясь другой аппаратурой. Этот вопрос заслуживает дальнейших исследований,— в частности, в направлении исследования совпадения  $h\nu$  для  $\gamma$ -лучей с разницей энергий различных групп  $\alpha$ -частиц, но это требует большей точности в обоих рядах измерений. В настоящее время можно, однако, без опасений сказать, что имеются сильные доказательства в пользу общей связи  $\alpha$ -частиц и  $\gamma$ -лучей, и это кажется разумной гипотезой, которой нужно следовать.

Уместно рассмотреть точное значение этой гипотезы и привести ее к простейшей формулировке. В этом смысле она прежде всего означает приложимость закона сохранения энергии к ядру или лучше к той части ядра, которая связана с эмиссией  $\alpha$ -частиц и  $\gamma$ -лучей. Следует заметить, что в обоих этих случаях была установлена эквивалентность полного количества энергии, когда эта энергия может разделяться двумя путями. Или  $\alpha$ -частица уносит всю имеющуюся энергию, или, если она берет только часть, то оставшаяся испускается в форме  $\gamma$ -лучей. Ядро представляет целую систему и содержит большое число частиц, и поэтому сомнительна правомерность говорить об одной из них в отдельности. Поэтому еще неизвестно имеет ли смысл утверждать, что  $\gamma$ -лучи испускаются  $\alpha$ -частицами. Едва ли бы это имело смысл, если бы закон сохранения энергии был приложим к ядру в целом, но в действительности, как мы знаем из явления непрерывного спектра  $\beta$ -лучей, это не имеет места. Мы видели, что имеющиеся доказательства показывают, что закон сохранения энергии приложим как к эмиссии  $\alpha$ -частиц, так и к эмиссии  $\gamma$ -лучей, в то время как он, повидимому, определенно неприменим к эмиссии  $\beta$ -частиц. В таком случае представляется правомерным

сделать различие между  $\alpha$ -частицами в ядре и электронами и с той степенью определенности, с какою существует это отличие, мы можем сказать, что  $\gamma$ -лучи связаны с долей  $\alpha$ -частиц ядра. Следует не забывать, что в ядре имеются другие частицы наравне с  $\alpha$ -частицами и электронами. Фаулер указал, что за некоторые особенности спектра, может быть ответственно присутствие протонов и недавние работы показывают, что мы, повидимому, должны также считаться с нейтронами одного или многих сортов. Изучение детальной связи  $\gamma$ -лучей с  $\alpha$ -частицами и протонами и, возможно, другими телами является задачей будущего, но в настоящее время, как чисто рабочую гипотезу, удбно принять тот узкий взгляд, согласно которому  $\gamma$ -лучи также связаны с состояниями  $\alpha$ -частиц в ядре, как рентгеновы лучи и оптические спектры связаны с электронной структурой. Исследование этих состояний  $\alpha$ -част. ц радиоактивного ядра требует совместной разработки, — по крайней мере, двух линий исследования: с одной стороны, прямого исследования энергий и интенсивностей различных групп  $\alpha$ -частиц, с другой стороны — измерений спектра  $\gamma$ -лучей. Нет необходимости говорить о первой линии исследования, но оценка важности последней естественно ведет к тому пункту, который я хочу специально подчеркнуть. Это — настоятельная нужда в увеличении точности в области нашего знания спектра  $\gamma$ -лучей.

Существует несколько методов исследований спектра  $\gamma$ -лучей: метод интерференции в кристаллах, абсорбционный метод и метод наблюдения электронов отдачи в камере Вильсона. Но для установления некоторых пунктов является также необходимой, как это ясно в настоящее время, забота об изучении спектра  $\beta$ -лучей с целью получения наиболее точных и детальных сведений. Первый пункт, с которым я хотел бы поторопиться, есть рекогносцировка типа нужной работы. Мы оставили позади, как пионерскую стадию, то время, когда исследование  $\beta$ -лучей некоторого тела стремилось к тому, чтобы дать общее обозрение линий. Мы теперь нуждаемся в точном и детальном измерении. Большинство спектров так богато линиями, что опу-

бликование было бы незаслуженным образом задержано, если бы какой-нибудь из исследователей пытался заботливо сразу охватить всю полноту спектра. Поэтому я надеюсь, что тщательное исследование малых групп линий или даже однородности одной линии будет рассматриваться как достаточный предмет для исследования.

Второй пункт заключается в необходимости увеличения точности. Определение отношения  $H\rho$ , т. е. моментов  $\beta$ -лучей в двух линиях с точностью, по крайней мере, до  $1/3000$  не представляет каких-либо фундаментальных трудностей, но нужно уделить значительно больше внимания механической конструкции аппарата, чем это делалось прежде. Так как результаты измерений должны сравниваться с измерениями из другой области — с измерением  $\alpha$ -лучей, то относительные измерения мало пригодны, — нам нужны измерения абсолютные. Здесь положение далеко от удовлетворительного, и вся шкала измерений  $\beta$ -лучей ненадежна, хотя, возможно, что она обладает точностью до полпроцента. Крайне нужны определения независимыми наблюдателями абсолютных энергий некоторых стандартных линий по всему спектру.

Точность в одну пятисотую была бы достижима с нашей настоящей техникой, но дальнейший сколько-нибудь значительный шаг вперед, кажется, требует пересмотра всей проблемы и, возможно, привлечения новых методов. По праву можно думать, что дела более могущественны, чем слова, и что последовать этим предписаниям самому было бы наилучшей рекомендацией их для других. Но только в последний год стало ясным положение в отношении  $\gamma$ -лучей и вместе с этим появилась необходимость и оправдания для этого типа исследования. Здесь многое должно быть сделано, и достижение заслуживающих веры результатов требует сравнения результатов нескольких независимых экспериментаторов.

*Р. Х. Фаулер.* Существуют две главных линии фактов, которые говорят нам более или менее недвусмысленно о том, каково должно быть значение спина ядра. Обе они весьма привычны и могут быть вкратце подытожены. Первое и наи-



лучшее доказательство дают перемежающиеся интенсивности в полосатых спектрах двухатомных молекул, в которых два атома идентичны — например молекулы  $\text{H}-\text{N}$ ,  $\text{N}_{14}-\text{N}_{14}$  или  $\text{O}_{16}-\text{O}_{16}$  (но не  $\text{O}_{16}-\text{O}_{17}$ , и т. п.). Линейные молекулы, такие как ацетилен  $\text{H}-\text{C}_{12}=\text{C}_{12}-\text{H}$ , также дают доказательства такого же рода, но, конечно, здесь мы не получаем чего-либо нового, но только дальнейшее доказательство существования спина протона. Если спин ядра в таких молекулах есть  $n \cdot \frac{h}{2\pi}$ , то интенсивности линий в полосах чередуются в отношении  $(n+1):n$ . Этим путем мы находим с уверенностью следующие спины (список не исчерпывающий):

$$\text{H } 1/2; \text{He } 0; \text{N}_{14} 1; \text{C}_{12} 0; \text{O}_{16} 0.$$

Более того, этим путем, мы находим наиболее недвусмысленные показания о типе статистики, которой удовлетворяют ядра; в частности  $\text{N}_{14}$  удовлетворяет статистике Бозе-Эйнштейна, что вынуждает нас (вместе с другими сведениями) к глубокому и нарушающему обычное понимание заключению о том, что электроны в ядре не вносят ничего в спин или в статистический тип.

Второй тип данных исходит из деталей сверхтонкой структуры атомных спектров. Здесь мы имеем дело со всеми возмущениями, которые производит ядро в оптическом спектре, и не всегда легко отделить эффект спина от других, — как например, изотопный эффект. Тем не менее, оказалось возможным, особенно применением эффекта Зеемана, измененного эффектом Пашена-Бака для сверхтонкой структуры, определить с уверенностью спины для некоторых сортов атомов, в частности для  $\text{Bi } 9/2$ . Это определение имеет дело только с качественными данными. При употреблении количественных данных из ширины сверхтонкой структуры можно определить величину магнитного момента ядра, связанного со спином ядра. Этим путем было показано, что ядерные магнитные моменты по порядку величины являются протонными магнетонами Бора, т. е.

составляют  $1/2000$  обычного магнетона Бора. Но более точное определение еще встречается с большими трудностями.

Вспомогательная группа спектроскопических данных, которая в будущем может оказаться очень полезной, связана с изучением деполяризации резонансного излучения способом Эллетта.

Пока эти пути являются главными путями, которыми может быть определен спин ядра; они не имеют близкого отношения к радиоактивным ядрам, и в настоящее время мы имеем небольшие надежды на прямое определение для таких ядер спина оптическими методами. Но тем не менее спин может иметь весьма существенное отношение к этим ядрам, как это было недавно показано Гамовым в письме в „Nature“\*. Он сравнивает там правильные последовательности радиусов для урана — радиевого и ториевого рядов радиоактивных элементов, вычисленные по теории из наблюдаемой скорости распада, с неправильными последовательностями радиусов, выведенными для актинового ряда. Он указывает, что это может быть следствием изменений спина ядра актинового ряда. Если спин меняется,  $\alpha$ -частица должна унести соответствующий момент вращения, и формула для жизни ядра будет модифицирована. Наблюдаемые нерегулярности будут понятны, если в актиниевом ряду (атомные веса  $4n + 3$ ) могут встречаться изменения в спине на 3 единицы, в то время как они не встречаются в других рядах (веса  $4n$  и  $4n + 2$ ). Это кажется вполне возможным, но в настоящее время является еще, конечно, чистым умозрением.

*Дж. Мак-Леннан* Данные, выводимые из изучения тонкой структуры спектральных линий, имеются теперь для многих элементов. Это дает нам возможность оценить механический момент и соответствующий множитель  $g(I)$  — отношение магнитного к механическому моменту для некоторых атомных ядер.

До сих пор наблюдаемые значения —  $I$  (квантовые числа спина) ядра объяснялись допущением, что только протоны

\* „Nature“, 129, 470, 1932.

внутри атомного ядра своим спином обуславливают результирующий момент ядра. Простое допущение, по которому каждый протон дает  $1/2 (\hbar/2\pi)$ , до недавнего времени рассматривалось как достаточное для объяснения известных фактов. Однако недавно были выявлены некоторые аномалии. Например, известно, что в то время как относительные расстояния в сверхтонкой структуре компонент гомологичных спектральных линий спектров Tl II и Pb<sub>(207)</sub> III сходны, действительная величина расщеплений, включенных в структуру спектральных линий, значительно меньше, чем расстояния в соответствующих линиях Tl II. Величины расщеплений позволяют сделать прямое сравнение и выходит, что множитель  $g(I)$  для ядра Tl примерно в четыре раза больше, чем для ядра Pb<sub>(207)</sub>. Этот результат имеет специальное значение, так как по простой выше рассказанной теории результирующий момент ядер атомов Tl и Pb<sub>(207)</sub>, для которых  $I = 1/2$  должен бы быть следствием одного не нейтрализованного вращающегося протона. Множители  $g(I)$  для этих двух ядер должны бы тогда быть одинаковыми, так как нет никаких данных, которые бы указывали, что различные вращающиеся протоны с тем же самым механическим моментом могут иметь различные, в широких пределах, магнитные моменты.

Очевидно заключение, что момент, по крайней мере одного из ядер, — сложный и не является просто следствием вращающегося протона. Это заключение обесценивает простое правило, по которому каждый протон дает долю  $\pm 1/2 (\hbar/2\pi)$  в результирующем моменте. Более того, оно потребовало бы от нас наделения, по крайней мере одного протона, тем же свойством в добавление к спину либо в одном, либо в обоих из ядер Tl и Pb<sub>(207)</sub>.

Дальнейшее свидетельство в пользу этого заключения получается из отношения множителей  $g(I)$  для талия и висмута. Хотя значение „ $I$ “ для ядра Bi есть  $9/2$ , значение  $g(I)$  должно бы быть то же самое, что и для Tl, если только результирующий момент обоих ядер является следствием только вращающихся протонов. Однако наблюдающееся отношение равно 4 к 1. Это приблизительное равенство

множителей  $g(I)$  для  $\text{Pb}_{(207)}$  и  $\text{Bi}$  указывает, что результирующий момент ядра  $\text{Tl}$  более сложен по своему происхождению, чем это до сих пор думалось. Хотя имеющиеся данные не дают определенных указаний на природу этого дополнительного свойства, Мак-Леннан, Мак-Лэй и Крауфорд\* и также Бартлет\*\* предполагают, как возможность, орбитальное движение протонов внутри ядра. Эта идея была развита Уайтом\*\*\* и Брайденом\*\*\*\*, но кажется непозволительным приписывать орбитальное движение, как это они делают, всем без различия протонам внутри атомного ядра.

Далее, я могу добавить, что с некоторых пор стало известным, что математическая теория вычисления взаимодействия электронов, другого типа, нежели  $s$ -электроны, с ядерным спином, была неправильна. Это было показано опытами Вульфа\*\*\*\*\* , опытами Фишера и Гаудсмита\*\*\*\*\* и Мак-Леннана, Мак-Лэя и Крауфорда (loc. cit). Недавно теория была расширена Брейтом, который ввел поправку,  $\left(\frac{1}{\gamma^3}\right)$ , обусловленную релятивистским изменением массы взаимодействующего электрона. Эта поправка, которая изменяет свое значение в различных состояниях дублета, происходящего от взаимодействия одного не- $s$ -электрона с ядром, дает лучшее согласие с опытом. Однако теория даже и с этим улучшением неудовлетворительна. Например, теория предсказывает для

$$A_{(I, 1/2)}^2 P_{1/2} / A_{(I, 3/2)}^2 P_{3/2} = 5/1,$$

где  $A_{(ij)}$  постоянная связи в уравнении энергии:

$$E_{(ij)} = A_{(ij)} IJ \cos(IJ).$$

Наблюдаемое значение было 30/1. Релятивистская поправка, которая изменяется от элемента к элементу, дает отноше-

\* McLennan, McLay, Proc. Roy. Soc. A, 133, 652, 1931.

\*\* Bartlet, Phys. Rev. 37, 327, 1931.

\*\*\* White, Phys. Rev. 38, 2078, 1931.

\*\*\*\* Bryden, Phys. Rev. 38, 1989, 1931.

\*\*\*\*\* Wulff, Z. Physik, 69, 70, 1931.

\*\*\*\*\* Fisher and Goudsmit, Phys. Rev. 37, 1057, 1931.

ние около 10/1. Это показывает, что даже с этим усовершенствованием в теории наблюдаемые значения отличаются от теоретических множителей 2 или 3. Роках\* дал трактовку, сходную с данной Брейтом, и приложил ее к наблюдениям на спектре Тl. Его сравнения опять-таки показывают, что теория все же еще неудовлетворительна.

Недавно испытание теории сверхтонкой структуры было сделано Бэчером и Кэмпбеллом\*\*. Изучением резонансной спектральной линии индия I была найдена полная сверхтонкая структура расщепления двух членов дублета, происходящего от единственного 5р-электрона. Трудности, представляемые изучением спектральных линий таллия с получающимися в структуре спектральных линий сложностями, благодаря изотопному смещению, не встречаются в случае индия, так как этот элемент простой и имеет только один тип ядра. Бэчер и Кэмпбелл нашли для случая линий индия, что спектральное расщепление  $\Delta^2 P_{1/2}$  было  $0,390 \text{ см}^{-1}$ , в то время как расщепление, даваемое  $\Delta^2 P_{3/2}$ , было  $0,133 \text{ см}^{-1}$ ; так что отношение равно 2,9/2. Ясно, что это не находится в согласии с нерелятивистской теорией, дающей отношение 1,67. Оно, однако, находится в лучшем согласии с 2,05, значением, исправленным согласно Раках и в еще лучшем согласии в 2,7 — значением, исправленным Брейтом.

Н. Ф. Мотт. Приложение квантовой механики к проблеме аномального рассеяния  $\alpha$ -частиц привело к объяснению экспериментальных результатов и к предсказанию некоторых новых явлений.

До той поры, пока принимается, что закон силы между  $\alpha$ -частицами и ядром есть закон обратных квадратов, классическая и квантовая механика\*\*\* ведут в общем к одинаковым формулам рассеяния, именно, в случае бесконечно тяжелого ядра к формуле  $(2Ze^2/2mv^2)^2 \operatorname{cosec}^4 \frac{\theta}{2}$  для

\* Racah, Z. Phys., 71, 431, 1931.

\*\* Bacher a. Campbell, Bull. Amer. Phys. Soc., апрель 28, 1932.

\*\*\* Gordon, A. f. Phys. 48, 180, 1928.

числа частиц, рассеянных на единицу телесного угла на угол  $\theta$ . Единственный случай, когда классическая и квантовая механика делают различные предсказания, есть тот, когда ударяемая частица принадлежит к тому же сорту, как и падающие, например, рассеяние  $\alpha$ -частиц гелием \*. Число рассеянных частиц тогда зависит от статистики, которой повинуются частица, и от числа квантов спина, которыми она обладает. Рассеяние на  $45^\circ$ , например, больше, чем предсказывается классической теорией на множитель.

$$\frac{2(s+1)}{(2s+1)}; \text{ (статистика Бозе-Эйнштейна)}$$

$$\frac{2s}{(2s+1)}; \text{ (статистика Ферми-Дирака),}$$

где  $s + \frac{h}{2\pi}$  есть угловой момент „спина“-частицы. Спин и статистика могут быть определены из полосатых спектров двухатомных молекул, в которых рассматриваемые частицы образуют ядро \*\*. Рассеяние дает, таким образом, метод проверки результатов, полученных из полосатых спектров. Данные из полосатого спектра  $\text{Ne}_2$  показывают, что  $\alpha$ -частицы не имеют спина и повинуются статистике Бозе-Эйнштейна. Поэтому следовало ожидать, что рассеяние на  $45^\circ$  в гелии будет вдвое больше классического. Это было проверено экспериментально Чадвиком \*\*\*, и другие результаты теории были подтверждены Блэкеттом и Чампионом \*\*\*\*. Применялись медленные  $\alpha$ -частицы (скорости  $1-8,5 \cdot 10^8$  см/сек), чтобы избежать эффектов, зависящих от непригодности закона обратных квадратов на близких расстояниях.

Чтобы объяснить аномальное рассеяние быстрых частиц в водороде и гелии, а также аномальное рассеяние в таких элементах, как Al, Mg, В, нужно принять, что закон обратных квадратов теряет силу на расстояниях, меньших некоторого расстояния  $r$ . Естественно принять, что для меньших расстояний силы становятся притягательными. Поэтому для потенциальной энергии  $\alpha$ -частиц в поле ядра

\* Mott, Proc. Roy. Soc., A. 126, 159, 1930.

\*\* Cp. Kronig, Band Spectra and Molecular Structure, Cambridge, стр. 94. 1930.

\*\*\* Proc. Roy. Soc., A. 128, 114, 1930.

\*\*\*\* Proc. Roy. Soc., A. 130, 380, 1931.

принимают функцию формы, показанной на рис. 1. Теперь обсудим рассеяние, которое следует ожидать в таком поле. Если классическое расстояние наибольшего сближения для центрального соударения, именно,  $2Ze^2/1/2 mv^2$ , больше, чем  $r$ , то отклонения от классического рассеяния будут, вообще, очень малы. Возможно, однако, что будут существовать интервалы энергии шириной в  $0,5 \cdot 10^6$  вольт-электронов или меньше (резонансные уровни),  $\nu$  такие, что  $\alpha$ -частица с этой энергией может легко проникнуть через потенциальный барьер. Для таких энергий рассеяние будет аномальным и может произойти искусственное разложение. Существование и положение резонансных уровней зависит от формы поля внутри ядра; их ширина зависит от толщины потенциального барьера. Возможность их существования по волновой механике была впервые отмечена Гёрнеем \*, и они обсуждались в нескольких теоретических статьях \*\*.

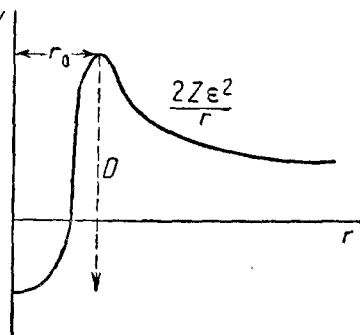


Рис. 1.

Если классическое расстояние наибольшего сближения меньше, чем  $r$ , то будут происходить отклонения от классической формулы даже для тех углов, для которых классическая частица движется только в кулоновом поле. Поэтому нет больше необходимости в не-сферическом поле ядра для объяснения того факта, что аномальное рассеяние в гелии начинается приблизительно при одинаковой энергии как для больших, так и для малых углов.

Если поле для  $r_0 < r$  притягательное, то отношение наблюдаемого рассеяния к классическому сперва бы уменьшалось, а затем увеличивалось с увеличением энергии. Из наблюдаемого рассеяния \*\*\* можно оценить поле для

\* Gurney, Nature 123, 568, 1929.

\*\* Atkinson, Z. Phys. 64 507, 1930; Beck, Z. Phys., 64, 32, 1930; Mott, Proc. Roy. Soc. A. 133, 228 1931.

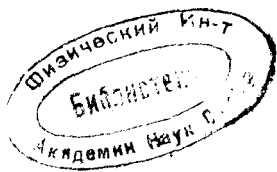
\*\*\* Rutherford a. Chadwick, Phil Mag. 4, 605, 1927,

$r_0 < r$ . Это было сделано Тэйлором\* для водорода и гелия. В случае гелия, если сделать допущение, что  $r$  меньше, чем  $4 \cdot 10^{-23}$  см, формула рассеяния, выведенная из поля, показанного на рис. 1, есть:

$$R = 2 \left| 1 + \frac{1}{2\alpha} \cdot e^{i(\frac{1}{2}\pi - \alpha \lg 2)} \left( e^{2i\alpha} - 1 \right) \right|^2, \quad \alpha = \frac{2\pi\varepsilon^2}{h\nu},$$

где  $R$  есть отношение рассеяния к предсказываемому из закона обратных квадратов. Параметр  $K$  зависит от поля и есть функция энергии, но не угла. Поэтому это не тот случай, когда наблюдаемое рассеяние можно объяснить выбором подходящего поля, так как из наблюдаемого рассеяния при данном угле можно вывести величину  $K$  и отсюда вычислить рассеяние для всех углов при той же энергии. Было получено хорошее согласие с опытом, показывающее, что проблема принадлежит к числу проблем, которые могут трактоваться волновой механикой. Сходные же результаты получены для водорода.

Из наблюдаемых значений  $K$  и его изменений с энергией можно оценить глубину  $D$  всего потенциального барьера. Однако не было найдено возможным употребить это значение для того, чтобы делать предсказания о каких-нибудь других явлениях; например, притягательная сила между двумя  $\alpha$ -частицами, найденная из рассеяния, больше, чем та, которая требуется, чтобы объяснить энергию их связи в ядре.



\* Proc. Roy. A. 134, 103, 1931, 136, 605, 1932.