

ПРОНИЦАЮЩЕЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ЛЕГКИХ ЭЛЕМЕНТОВ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ДОКАЗАТЕЛЬСТВО СУЩЕСТВО- ВАНИЯ НЕЙТРОНОВ

Э. В. Шпольский, Москва

В самое последнее время наши знания о природе и структуре атомного ядра обогатились двумя весьма существенными открытиями: во-первых, был открыт изотоп водорода с массой 2, т. е. доказана возможность тесной комбинации двух протонов и одного электрона¹; во-вторых, был обнаружен целый ряд фактов, весьма убедительно свидетельствующих в пользу реальности существования частиц, являющихся тесной комбинацией одного протона и одного электрона и потому обладающих массой 1 и зарядом нуль, — так называемых нейтронов.

Оба открытия сделаны в последние месяцы, но оба они были предсказаны с совершенной отчетливостью уже 12 лет назад. Именно в своей известной Бэкеровской лекции², обсуждая только что открытое тогда искусственное разложение атомов, Резерфорд писал: „Кажется весьма правдоподобным, что один электрон может связывать два Н-ядра, а возможно даже и одно Н-ядро. Если справедливо первое предположение, то оно указывает на возможность существования атома с массой около 2 и с одним зарядом. Такое вещество нужно рассматривать как изотоп водорода. Второе предположение заключает в себе мысль о возможности существования атома с массой 1 и нуклеарным зарядом, равным нулю. Подобное образование представляется вполне возможным. С современной точки зрения нейтральный атом водорода следует рассматривать как ядро с единичным нуклеарным зарядом, с которым связан электрон, находящийся от него на известном расстоянии, и спектр

водорода приписывается движению этого последнего электрона. Однако при таких условиях является вероятным, что один электрон может комбинироваться более тесно с Н-ядром, образуя нечто вроде нейтрального дублета. Подобный атом обладал бы совершенно фантастическими свойствами. Его внешнее поле практически должно равняться нулю, за исключением областей, весьма близко прилежащих к ядру; вследствие этого он должен бы обладать способностью свободно проходить через материю. Существование подобного атома, вероятно, трудно было бы обнаружить спектроскопом, и его нельзя было бы удержать в закрытом сосуде. С другой стороны, он должен бы легко входить в структуру атома и либо соединяться с его ядром, либо разрушаться интенсивным полем этого последнего, давая начало заряженному Н-атому или электрону, или тому и другому“.

Найденные недавно экспериментальные доказательства существования этих замечательных частиц связаны с исследованием природы и свойств протекающего излучения легких элементов—главным образом бериллия, открытого Боте и Беккером в 1930 г. Оба вопроса настолько тесно переплетаются, что излагать их отдельно невозможно; к тому же, открытие Боте и Беккера еще не было освещено на страницах „Успехов“.

При бомбардировке легких элементов α -лучами полония Боте и Беккер обнаружили, что некоторые элементы начинают испускать искусственно возбужденное проникающее излучение типа γ -лучей. Прибор, с помощью которого авторы производили свои наблюдения, изображен на рис. 1. Здесь Z —обыкновенный счетчик Гейгера диаметром 5 см, P —препарат полония, нанесенный на серебряном кружке. Препарат имел силу от 7 до 3 милликюри и был обращен активной стороной вверх, т. е. повернут от счетчика. Исследуемое вещество непосредственно налагалось на препарат; при этом, для того чтобы можно было удобно исследовать два вещества друг за другом, эти вещества составляли два сектора по 120° кружка S , который легко мог поворачиваться при помощи шлифа Sch .

Третий сектор оставлялся свободным для того, чтобы можно было исследовать нулевой эффект, обусловленный слабым γ -излучением полония, неожиданно открытым при этих опытах.⁴ Для защиты от окружающего радиоактивного излучения весь прибор был окружен свинцовым панцирем толщиной в 5 см.

Испытывая при помощи этого прибора ряд веществ, Боте и Беккер обнаружили, что некоторые из них дают увеличение числа отклонений электрометра, далеко выходящее за пределы погрешностей. Из табл. 1 видно, что такими веществами вне всякого сомнения являются литий, бериллий и бор. Значительно меньший, однако, повидимому, также качественно несомненный эффект обнаруживают фтор (CaF_2), магний и алюминий. Таким образом все эти вещества под влиянием α -лучей полония начинают сами испускать проникающее излучение, причем особой интенсивностью отличается получение бериллия.

Далее оказалось, что новое излучение отличается очень сильной проникающей способностью. Именно, по измерениям Боте и Беккера, 1 см свинца ослабляет интенсивность лучей бериллия всего на 30%, а лучей бора — на 53%. Хотя эти измерения носили ориентировочный характер и были весьма неточны, они определенно указывают на то, что новое излучение относится к типу проникающих, вследствие чего Боте и Беккер вполне естественно признали его искусственно вызванными γ -лучами.

Открытие Боте и Беккера вскоре было подтверждено Иреной Кюри,⁵ Жолио и несколько позднее — Вебстером¹⁵ в Кэвендишевской лаборатории. Было показано, что элементы Li, Be, B, F, Na, Mg, Al при бомбардировке α -частицами полония начинают испускать

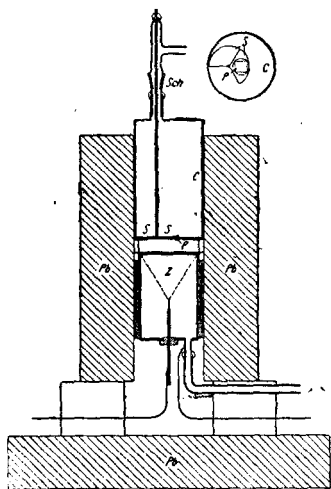


Рис. 1.

ТАБЛИЦА I

1	2	3
Вещество	Число откл. за 5 мин. в на 1 мил- ликюри P_0	$\gamma/\alpha \cdot 10^6$
Li_2CO_3	3,7 $\pm$ 1,1	1,0 $\pm$ 0,3
Li	17,2 $\pm$ 1,4	4,7 $\pm$ 0,4
Be	125,0 $\pm$ 2,5	34,0 $\pm$ 0,7
B	15,3 $\pm$ 1,0	4,2 $\pm$ 0,3
C	0,54 $\pm$ 0,74	0,15 $\pm$ 0,20
$(\text{CN})_x$	0,78 $\pm$ 0,82	0,21 $\pm$ 0,22
Сахар	— 0,12 $\pm$ 0,92	— 0,03 $\pm$ 0,20
CaF_2	7,5 $\pm$ 1,6	1,9 $\pm$ 0,4
Ne	0,1 $\pm$ 1,6	0,03 $\pm$ 0,42
Na_2CO_3	1,8 $\pm$ 1,5	0,45 $\pm$ 0,4
Mg	3,6 $\pm$ 0,7	1,0 $\pm$ 0,2
Al	4,7 $\pm$ 0,8	1,3 $\pm$ 0,2
Ca	0,37 $\pm$ 1,7	0,10 $\pm$ 0,48
Ag	0,11 $\pm$ 1,0	0,03 $\pm$ 0,27

сильно проникающее излучение, не поддающееся воздействию электрического и магнитного полей. Более точное измерение коэффициента абсорбции лучей бериллия, выполненное Кюри, показало, что для ослабления их интенсивности наполовину свинцовый экран должен иметь толщину 47 мм. Для сравнения можно указать, что наиболее проникающие γ -лучи ThC' , будучи предварительно профильтрованы через 20 мм Pb, ослабляются наполовину экраном в 16 мм свинца.

Особенность опытов Кюри состояла в том, что она воспользовалась исключительно сильным препаратом полония (до 100 милликюри) и вследствие этого имела возможность перейти от счетчика Гейгера к ионизационной камере, расположенной на чувствительном электрометре Гофмана. Это, на первый взгляд, не очень существенное изменение методики, отнюдь не вызванное какими бы то ни было теоретическими соображениями, сыграло, однако, в последующем решающую роль. Пользуясь своей установкой, Кюри и Жолио показали, что при прохождении лучей бериллия сквозь вещество наблюдаются совершенно неожиданные

явления. А именно оказалось, что ионизационный ток в камере сильно возрастает, когда отверстие ее закрыто веществом, содержащим водород (парафин, целлофан, вода), между тем как экраны из других веществ (Al, Cu, Ag) не дают никакого специфического эффекта. При этом лучи, возбуждающие дополнительную ионизацию в случае водород содержащих экранов, оказались, в противоположность самим лучам бериллия, очень слабо проникающими: листок алюминия в 0,2 мм толщиной уже поглощает их полностью. На этом основании, а также на основании ряда других признаков, Кюри и Жолио сделали заключение, что дополнительная ионизация вызывается потоком Н-частиц, вырванных из вещества лучами бериллия. Это заключение было очень скоро подтверждено непосредственно при помощи наблюдения путей ионизирующих частиц в камере Вильсона сначала самими Кюри и Жолио,⁸ а затем Разетти,⁹ которому удалось эти пути сфотографировать. На рис. 2 мы приводим одну из фотографий Разетти. Следы α -частиц, видные на фотографии снизу, принадлежат слабому препарату полония и служат для контроля правильности работы камеры Вильсона. Препарат полония, бериллий и парафин находятся в центре камеры; резкая длинная полоска, отмеченная стрелкой, несомненно принадлежит Н-частице.

Каково происхождение этих быстрых ионизирующих частиц? Кюри и Жолио первоначально⁷ считали их ядрами отдачи, возникающими при комптоновском рассеянии квантов бериллиевых лучей на Н-ядрах. В таком случае, для сообщения протонам достаточной скорости, чтобы они имели наблюдаемые на опыте пробеги, величина кванта бериллиевых лучей должна бы быть 50×10^6 вольт. Совершенно непонятно, какие процессы при взаимодействии α -частицы с ядром бериллия могут освободить такие огромные кванты излучения. Наиболее „жесткие“ кванты могли бы получиться при захвате α -частицы ядром Be⁹ с образованием ядра C¹³. Дефект массы этого последнего известен достаточно точно, и при его помощи можно вычислить, что величина кванта бериллиевых лучей не

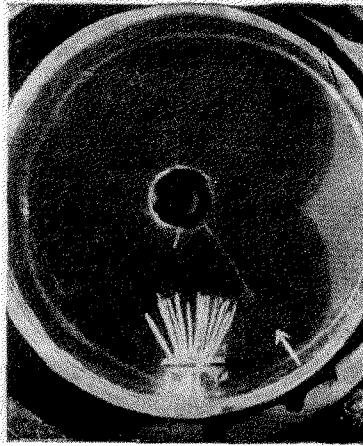


Рис. 2.

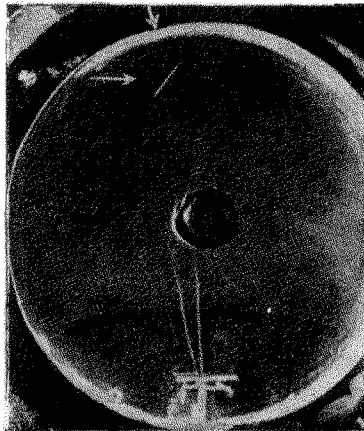


Рис. 3.

может превосходить 14×10^6 . Вопрос о происхождении вторичных протонов, наблюдаемых при прохождении бериллиевых лучей, был детально исследован Чадвиком¹⁰ в лаборатории Рёзерфорда. Пользуясь малой ионизационной камерой, соединенной с осциллографом, Чадвик показал, что не только водород, но и другие легкие элементы при прохождении бериллиевых лучей дают быстро движущиеся частицы с большой ионизирующей способностью. Эти частицы, по всем признакам, являются ядрами отдачи соответствующих элементов. Путь одного из подобных ядер отдачи виден, например, и на фотографии Разетти, приведенной на рис. 2, где короткий след слева от протона, отмеченного стрелкой, очевидно принадлежит быстро движущемуся ядру С вырванному из парафина.

Если считать, что эти ядра отдачи приобрели свою скорость при комптоновском рассеянии каких-то квантов излучения, то вычисление величины этих квантов из пробегов ядер отдачи различных элементов дает совершенно противоречивые результаты. Так, величина кванта одного и того же бериллиевого излучения из пробега водородных ядер получается $50 \times 10^6 \text{V}$, из пробега ядер азота — $100 \times 10^6 \text{V}$, а из пробега ядер аргона — $150 \times 10^6 \text{V}$. Противоречие исчезает, и наблюдаемые соотношения пробегов хорошо согласуются с вычисленными, если предположить, что излучение бериллия имеет не электромагнитный характер, но является потоком быстро несущихся корпускул, с зарядом 0 (огромная проникающая сила и отсутствие влияния электрического и магнитного полей!) и массой 1.

Вполне естественно предположить, что α -частица, захватываясь ядром Be^9 , выбрасывает нейтрон и превращается в C^{12} . В таком случае из точных определений атомных масс Be^9 , He^4 , C^{12} по кривой Астона можно найти дефект массы, а отсюда скорость выбрасываемых нейтронов. Получающаяся скорость равна $3 \times 10^9 \text{ см/сек}$, т. е. имеет порядок величины скорости быстрых α -частиц.

Правильность этой гипотезы Чадвика была доказана самим Чадвиком и другими сотрудниками Кэвендишев-

ской лаборатории, длинным рядом весьма интересных наблюдений, из которых мы приведем только наиболее яркие.

1. Можно ожидать, что при прохождении через вещество нейтрон сталкивается не только с ядрами атомов, но иногда и с электронами. Если мы применим к этому столкновению обычные законы механики, т. е. закон сохранения количества движения и закон сохранения энергии, то для скорости электрона, приведенного в движение, легко получим:

$$u = 2v \frac{m}{m + \mu} \cos \Theta,$$

где v — скорость налетающего нейтрона, m и μ — массы нейтрона и электрона. Так как $m \gg \mu$, то для случая центрального удара, — а только о таких случаях здесь может идти речь ввиду отсутствия внешнего поля у нейтрона, — мы получим, что скорость электрона равна удвоенной скорости нейтрона. Так как последняя имеет порядок величины скорости α -частиц, то этот случай соударения нейтрона с электроном совершенно аналогичен возникновению так называемых δ -лучей, т. е. медленных электронов малого пробега, образующихся при прохождении α -частиц в газе.* Такие короткие траектории электронов были обнаружены Ди (Dee) на вильсоновских фотографиях при прохождении

* Нетрудно убедиться в том, что это должны быть действительно медленные электроны. Согласно сказанному в тексте, скорость электронов, образующихся при соударении с нейтроном, должна быть $6,6 \times 10^9$ см/сек. Если ускоряющий потенциал V выражен в вольтах, то между v в см/сек и V имеется соотношение:

$$v^2 = 2 \cdot V \cdot 10^8 \cdot \frac{e}{\mu} = 2V \cdot 10^8 \cdot 1,76 \cdot 10^7 = 3,52 \cdot 10^{15} V.$$

Отсюда, для скорости $v = 3 \cdot 10^9$ соответствующий потенциал будет всего

$$V = \frac{36 \cdot 10^{18}}{3,52 \cdot 10^{15}} = 11\,000 \text{ вольт.}$$

Из работы Виллиамса и Неттола (Phil. Mag. 2, 1109, 1926) известно, что электроны с такими скоростями должны иметь пробег в воздухе около 3,4 мм.

бериллиевых лучей во влажных газах различной природы, и очень трудно придумать для них какое-либо иное объяснение, кроме указанного выше.

Если бы лучи бериллия имели квантовую природу, то величина их кванта, как мы видели, должна бы быть не менее 50×10^6 вольт. Комптоновские электроны, возникающие под действием таких огромных квантов, имели бы весьма длинные траектории. На самом деле такие электроны длинного пробега хотя и наблюдаются, но весьма редко — значительно реже электронов короткого пробега. Этот факт свидетельствует тем не менее о том, что лучи бериллия имеют неоднородную структуру. Мы еще вернемся к этому вопросу в конце статьи.

2. Изучение вильсоновских фотографий при прохождении лучей бериллия в различных газах дает и дальнейшие интересные доказательства существования нейтронов. Так как сами нейтроны обладают весьма малой ионизирующей способностью, то пути их на вильсоновских фотографиях не видны, но зато видны пути тех атомов отдачи, которые возникают при центральном соударении нейтрона с соответствующим ядром. При этом нейтрон до этого благоприятного соударения мог испытать ряд других, менее благоприятных соударений, изменивших, однако, направление полета нейтронов. Вследствие этого направление ядер отдачи может быть никак не связано с положением источника нейтронов. Это очень хорошо можно усмотреть на рис. 3 (фотограмма Разетти), представляющем собою вильсоновскую фотографию при прохождении лучей бериллия в гелий (расположение источника то же, что и на рис. 2), где стрелкой отмечено пришедшее в движение под влиянием удара нейтрона ядро гелия — своего рода искусственно созданная α -частица.

Фезер получил аналогичные ясные фотографии в азоте. Из сопоставления пробегов обнаруженных таким путем ядер отдачи азота с пробегами протонов отдачи, получающихся при прохождении нейтронов в водороде, Чадвик мог даже вычислить массу и скорость нейтронов.

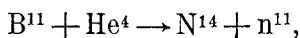
В самом деле

$$u_H = \frac{2m}{m+1}v,$$

$$u_N = \frac{2m}{m+14}v.$$

Отсюда, подставляя для u_H и u_N экспериментальные значения из соответствующих пробегов, Чадвик получил для m величину несколько большую единицы, а для v — около 3×10^9 см/сек.

Более точную величину массы нейтрона Чадвик получил из рассмотрения возникновения нейтронов из бора. В этом случае процесс происходит, повидимому, по уравнению:



где n^{11} означает нейтрон. Точные значения масс бора, гелия и азота известны непосредственно (для бериллия приходится массу интерполировать по кривой Астона) из измерений Астона. Если еще принять во внимание кинетическую энергию α -частицы, то из соображений, основанных на балансе энергии, можно заключить, что нейтрон должен иметь массу, лежащую между 1,005 и 1,007. Так как масса свободного атома водорода равна 1,0078, то на основании соотношения Эйнштейна можно легко подсчитать, что энергия связи электрона с протоном в нейтроне равна около миллиона вольт. Этот в высшей степени интересный результат показывает, что нейтрон, как и α -частица, представляет собою весьма устойчивое образование, повидимому, играющее большую роль в структуре ядер более тяжелых элементов.

Вся совокупность перечисленных, а также и других неприводимых здесь доказательств с полной убедительностью свидетельствует в пользу реальности существования нейтронов.

Очень интересны также наблюдения над искусственным превращением элементов под влиянием нейтронов. Любопытно отметить прежде всего, что здесь мы имеем дело с совершенно своеобразным случаем искусственного пре-

вращения элементов, ибо если при столкновении с ядром нейтрон захватывается им, а протон вслед за этим выбрасывается, то получающееся ядро будет иметь массу ту же, что и исходное, но атомный номер на единицу меньше, так что, например, ядро азота N^{14} должно превращаться в изотоп углерода C^{14} и т. д. Особенность нейтрона состоит в том, что его внешнее поле практически равно нулю. Поэтому нейтрон может оказывать какое-либо воздействие лишь при центральном ударе, но в этом случае он имеет большую вероятность проникнуть в ядро и, следовательно, вызвать его распад. Этим объясняется тот факт, что вероятность искусственного превращения под действием нейтронов значительно выше, нежели под действием α -частиц. И действительно, из 180 вильсоновских „треков“, полученных Фэзером в азоте, 30 было вызвано искусственным распадом.

В заключение мы еще вернемся к вопросу о природе проникающего излучения легких элементов. То, что это излучение в своей значительной части представляет собой поток нейтронов, согласно сказанному, в настоящий момент едва ли может вызывать сомнение. Однако мы уже указывали вскользь, что появление на некоторых фотографиях длинных электронных путей свидетельствует о том, что эти лучи неоднородны и наряду с корпускулярными компонентами состоят также из квантового излучения типа γ -лучей. К тому же самому заключению пришел и Разетти ⁹ на основании своих наблюдений над совпадающими отбросами двух счетчиков Гейгера. И наконец Боте и Беккер ¹⁷ указали, что счетчик вообще регистрирует лишь в γ -излучении, так что, если бы Кюри и Жолио не перешли к ионизационной камере, нейтроны едва ли были бы открыты.

С теоретической точки зрения одновременное возникновение корпускулярного и квантового излучения при воздействии α -частицы на ядро не представляет особых затруднений. Некоторой аналогией здесь может служить возникновение рентгеновых лучей, которое начинается с выбрасывания электрона с одного из внутренних уровней.

Не подлежит сомнению, что изучение свойств нейтронов обогатит нас важными сведениями о природе и структуре атомного ядра. И хотя возможность такой тесной комбинации электрона с протоном представляется загадочной с точки зрения нынешней квантовой механики, превосходно оправдавшей себя, поскольку речь идет об электронной оболочке атома, — самый факт реального существования нейтронов несомненно послужит для теоретической физики мощным стимулом к разработке релятивистской формы квантовой механики и электродинамики, которой должны подчиняться и внутриядерные процессы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ср. Г. С. Ландсберг, Успехи физич. наук, XII.
 2. E. Rutherford, Proc. Roy. Soc. A, 97, 374, 1920. Русский перевод в сборнике: Э. Рёзерфорд, Строение атома и искусственное разложение элементов. Подготовил к печати Э. В. Шпольский, Москва—Ленинград 1923 г.
 3. W. Bothe und H. Becker, Z. Physik 66, 282, 1930; Naturwiss. 19, 753, 1931.
 4. W. Bothe und H. Becker, Z. Physik 66, 307, 1930.
 5. Irene Curie, C. r. 193, 1412, 1931.
 6. См. Handb. d. Physik von Geiger und Scheel Bd. XVI, S. 245.
 7. I. Curie et F. Joliot, G. r. 194, 273, 1932.
 8. I. Curie et F. Joliot, C. r. 194, 708, 1932.
 9. F. Rasetti, Naturwiss. 20, 252, 1932 (Heft 14, 1 April 1932).
 10. J. Chadwick, Nature, 129, 212, 1932.
 11. E. Rutherford, Nature 129, 457, 1932 (от 26 марта 1932).
 12. Ср. статью Гамова в след. выпуске успехов физич. наук.
 13. Ср. например, E. Rutherford, J. Chadwick and C. Ellis, Variations from Radioactive Substances, Cambridge 1930, p. 148.
 14. Ср. особенно ⁹.
 15. Webster, Proc. Roy. Soc. A 136, 428, 1932.
 16. C. D. Ellis, Natur, 1932, p. 674—676.
 17. Bothe und Becker, Naturwiss.
-