

НЕЙТРОНЫ *

Дж. Чадвик, Кембридж

Введение. § 1. Боте и Беккер** показали, что некоторые легкие элементы под влиянием бомбардировки α -частицами полония испускают излучение, повидимому, имеющее характер γ -лучей. Элемент бериллий дает особенно заметный эффект этого рода, и последующие наблюдения Боте, Ирэнны Кюри-Жолио*** и Вебстера**** показали, что излучение, возбуждаемое в бериллии, обладает проникающей способностью значительно большей, нежели какое бы то ни было из известных до сих пор γ -излучений радиоактивных элементов. В опытах Вебстера интенсивность излучения измерялась счетчиком Гейгера-Мюллера и ионизационной камерой высокого давления. Вебстер нашел, что излучение бериллия при тех условиях, в которых производились его опыты, имеет коэффициент абсорбции в свинце около $0,22 \text{ см}^{-1}$. Вводя необходимые поправки на эти экспериментальные условия и пользуясь результатами Грея и Тарранта для оценки относительной доли рассеяния фотоэлектрической абсорбции и абсорбции ядрами в абсорбции этого проникающего излучения, Вебстер заключил, что излучение бериллия должно иметь квант с энергией приблизительно $7 \cdot 10^6$ вольт-электронов. Равным образом он нашел, что излучение бора бомбардируемого α -частицами полония частично состоит из излучения значительно более проникающего, нежели излучение бериллия, и оценил энергию

* The Existence of a Neutron, — by J. Chadwick. Proc. Roy. Soc., A. 136, 692 (June 1932).

** Bothe und Becker, Z. Physik 66, 289, 1930.

*** J. Curie, C. R. 193, 1312, 1931.

**** Webster, Proc. Roy. Soc., A. 136, 428, 1932.

кванта этого компонента излучения приблизительно в $10 \cdot 10^6$ вольт-электронов. Эти заключения хорошо согласуются с предположением о том, что излучение возникает путем захвата α -частицы ядром бериллия или бора и испускания избытка энергии в виде кванта излучения.

Однако излучение легких элементов обнаруживает некоторые своеобразные особенности и, по моей просьбе, было сделано несколько вильсоновских фотографий при прохождении этого излучения через вильсоновскую камеру. Никаких неожиданных явлений при этом не было наблюде-но, хотя, как мы увидим впоследствии, подобные опыты в настоящее время обнаружили некоторые замечательные факты. Неудача этих ранних опытов отчасти была обусловлена слабостью источника полония, частью же — расположением опыта, которое, как теперь выяснилось, было не вполне подходящим.

Совсем недавно И. Кюри-Жолио и М. Жолио * сделали поразительное наблюдение, состоящее в том, что эти излучения бериллия и бора оказываются способными выбрасывать со значительной скоростью протоны из веществ, содержащих водород. В их опытах излучение бериллия проходило сквозь тонкое окошко в ионизационную камеру, содержащую воздух при атмосферном давлении. Если перед окошком была расположена пластинка из твердого парафина или какого-либо другого вещества, содержащего водород, то ионизация в камере возрастала, — в некоторых случаях удваивалась. Было ясно, что этот эффект обусловлен выбрасыванием протонов, и дальнейшими опытами теми же исследователями было показано, что протоны имеют пробег в воздухе до 26 см, что соответствует скорости около $3 \cdot 10^9$ см/сек. Они предположили, что энергия передается от излучения бериллия протону путем процесса, аналогичного эффекту Комптона в случае электронов, и оценили величину кванта излучения бериллия приблизительно в $50 \cdot 10^6$ вольт-электронов. **

* J. Curie and F. Joliot C. R. 194. 273, 1932.

** Многие из аргументов в последующем обсуждении одинаково относятся к обоим излучениям, и под термином „излучение бериллия“ часто разумеется также и излучение бора.

Существует, однако, два больших затруднения в подобном объяснении. Во-первых, в настоящее время прочно установлено, что частота * рассеяния квантов большой энергии электронами с значительной точностью дается формулой Клейна-Нишины и что эта формула должна быть также применима к рассеянию квантов протонами. Между тем, наблюдаемая частота рассеяния протонов в несколько тысяч раз больше предсказанной по этой формуле. Во-вторых, трудно понять, каким образом может получиться квант в $50 \cdot 10^6$ вольт-электронов в результате взаимодействия ядра бериллия и α -частицы с кинетической энергией в $5 \cdot 10^6$ вольт-электронов. Процесс, способный дать наибольшее количество энергии для излучения, состоит в захвате α -частицы ядром бериллия, Be^9 , и вхождении ее в состав этого ядра с образованием ядра C^{13} . Дефект массы C^{13} известен как из измерений искусственного разрушения бора B^{10} , так и из изучения полосатого спектра углерода; он равен приблизительно $10 \cdot 10^6$ вольт-электронов. Дефект массы Be^9 неизвестен, но предположение, что он равен нулю, дает максимальное значение для возможного изменения энергии в реакции $\text{Be}^9 + \alpha \rightarrow \text{C}^{13} + \text{квант}$. Из этого предположения следует, что энергия кванта, испускаемого при этой реакции, не может быть больше $14 \cdot 10^6$ вольт-электронов. Конечно, можно возразить, что эта аргументация к дефекту массы основана на гипотезе, что ядра построены, насколько возможно, из α -частиц, т. е. что ядро Be^9 состоит из двух α -частиц + 1 протон + 1 электрон, а ядро C^{13} — из 3 α -частиц + 1 протон + 1 электрон. Поскольку речь идет о легких ядрах, это допущение подтверждается фактами из опытов с искусственным разрушением элементов, но это не является общим доказательством.

Вследствие этого я поставил дальнейшие опыты с целью исследовать свойства излучения бериллия. Эти опыты по-

* Здесь под словом „частота“ разумеется число элементарных актов рассеяния в единицу времени. *Перев.*

казали, что излучение бериллия выбрасывает частицы не только из водорода, но из всех исследованных легких элементов. Экспериментальные результаты оказалось очень трудно объяснить с точки зрения гипотезы о квантовой природе излучения бериллия, но эти результаты вытекали, как непосредственные следствия, если предположить, что излучение бериллия состоит из частиц с массой, приблизительно равной массе протона и без эффективного заряда, т. е. — из нейтронов. Краткое резюме некоторых из этих наблюдений было опубликовано в „Nature“ *. Настоящая статья содержит детальное описание опытов, которые указывают на существование нейтрона и из которых могут быть выведены некоторые свойства этих частиц. В следующей статье д-р Фезер ** излагает некоторые свои наблюдения при помощи вильсоновской камеры, относящиеся к столкновению между бериллиевыми лучами и ядрами азота, и, наконец вслед за ней публикуется статья Ди*** (Dee), посвященная опытам со столкновением этих лучей с электронами.

§ 2. Наблюдение атомов отдачи. Свойства излучения бериллия исследовались первоначально при помощи счетчика, построенного для работы по искусственному разрушению α -частицами и подробно описанному ранее ****. Коротко говоря, он состоит из малой ионизационной камеры, соединенной с катодным усилителем. Внезапное возникновение ионов в камере при попадании в нее ионизирующей частицы обнаруживается при помощи осциллографа, присоединенного к усилителю. Отклонения осциллографа регистрировались фотографически на ленте фотографической бумаги.

Источник полония был приготовлен из раствора радия ($D + E + F$) путем осаждения на серебряном диске. Диск имел диаметр в 1 см и был расположен поблизости от диска

* J. Chadwick, Nature, 129, 312, 1932.

** N. Feather, Proc. Roy. Soc. 136, 709, 1932.

*** P. J. Dee, Proc. Roy. Soc. 136, 727, 1932.

**** J. Chadwick, Constable and Pollard. Proc. Roy. Soc. 130, 463, 1931.

чистого бериллия диаметром 2 см, и оба были заключены в малом цилиндре, который можно было откачивать (рис. 1). Первая из применявшихся ионизационных камер имела отверстие в 13 мм, была покрыта алюминиевой фольгой с поглощением, эквивалентным 4,5 см воздуха, и имела глубину 15 мм. Эта камера обладала очень малым естественным эффектом, давая в среднем всего около 7 спонтанных отклонений в час.

Когда цилиндр с источником располагался перед ионизационной камерой, число отклонений сразу возрастало. Для

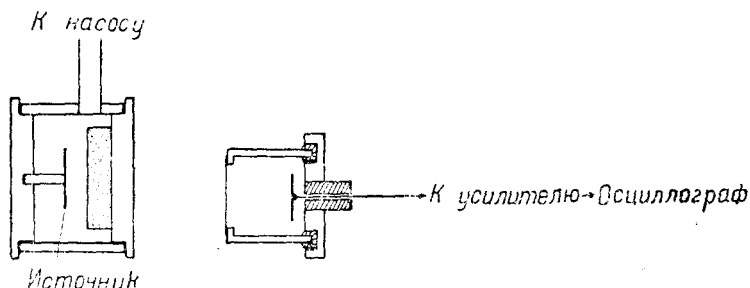


Рис. 1.

расстояния в 3 см между бериллием и счетчиком число отклонений составляло около 4 в минуту. Так как число отклонений оставалось почти тем же самым при помещении между источником и счетчиком толстых слоев металла, — вплоть до 2 см свинца, то было ясно, что эти отклонения вызываются излучением, исходящим от бериллия. Впоследствии мы покажем, что эти отклонения вызывались атомами азота, приведенными в движение при соударении с излучением бериллия.

Если поместить на пути излучения, как раз перед отверстием счетчика, пластинку твердого парафина, толщиной около 2 мм, то число отклонений, записываемых осциллографом, заметно возрастает. Это возрастание обусловлено частицами, выбрасываемыми из парафина и попадающими в счетчик. Помещая между пластинкой парафина и счетчиком поглощающие экраны из алюминия, можно было получить кривую поглощения, приведенную на рис. 2

(кривая А). Из этой кривой видно, что частицы имеют максимальный пробег, немного превосходящий 40 см воздуха, если предположить, что алюминиевая фольга в $1,64 \text{ мг/см}^2$ эквивалентна 1 см воздуха. Если сравнить величины отклонений (которые пропорциональны числу ионов, получающихся в камере), вызываемых этими частицами с отклонениями под влиянием протонов примерно того же самого пробега, то становится очевидным, что эти частицы являются протонами. На этом основании по кривой пробег-

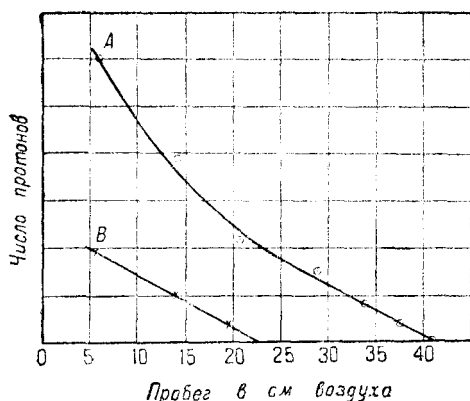


Рис. 2.

скорость для протонов мы заключаем, что максимальная скорость, сообщаемая протонам бериллиевым излучением, равна приблизительно $3,3 \cdot 10^9 \text{ см/сек}$, что соответствует энергии приблизительно $5,7 \cdot 10^6$ вольт-электронов.

После этого был исследован эффект, получающийся при прохождении излучения бериллия через другие вещества.

С этой целью применя-

лась ионизационная камера с отверстием, закрытым золотым листочком, с поглощением, эквивалентным 0,5 мм воздуха. Исследуемые элементы фиксировались на чистой латунной пластинке и располагались совсем близко от отверстия счетчика. Таким путем были испытаны литий, бериллий, бор, углерод и азот (в виде парацана). Во всех случаях число отклонений счетчика возрастало, когда тот или иной элемент бомбардировался бериллиевым излучением. Пробеги частиц, выбрасываемых из этих элементов, были очень коротки, порядка нескольких миллиметров воздуха. Отклонения, производимые ими, были различной величины, но многие из них были велики даже по сравнению с отклонениями, производимыми медленными протонами. Из этого следует, что частицы имели большую

ионизирующую способность и, вероятно, являлись в каждом случае атомами отдачи соответствующих элементов. Газы изучались путем наполнения ионизационной камеры исследуемым газом посредством пропускания этого газа через камеру в течение нескольких минут. Таким путем были исследованы водород, гелий, азот, кислород и аргон. Опять-таки в каждом случае наблюдались отклонения, которые были приписаны возникновению атомов отдачи соответствующих газов. Для данного положения бериллиевого источника относительно счетчика число атомов отдачи было грубо тем же самым для каждого газа. К этой особенности мы вернемся впоследствии. Таким образом представляется, что бериллиевое излучение может сообщать энергию атомам вещества, сквозь которое оно проходит, и что шансы передачи энергии не изменяются значительно при переходе от данного элемента к другому.

Было показано, что протоны выбрасываются из парафина с энергией максимально до $5,7 \cdot 10^6$ вольт-электронов. Если это выбрасывание приписать комптоновской отдаче от кванта излучения, то энергия такого кванта должна быть около $55 \cdot 10^6$ вольт-электронов, ибо максимальная энергия, которая может быть сообщена массе m квантом $h\nu$ равна:

$$\frac{2}{2 + mc^2/h\nu} \cdot h\nu.$$

энергии атомов отдачи, создаваемых тем же самым процессом в других элементах, также могут быть легко вычислены. Например, атомы отдачи азота должны бы иметь энергии максимально 450 000 вольт-электронов. Принимая энергию, необходимую для создания 1 пары ионов в воздухе, равной 35 вольт-электронам, мы заключаем, что атомы отдачи азота должны создавать не более 13 000 пар ионов. Однако многие отклонения, наблюдаемые в азоте, отвечают гораздо большему числу ионов; некоторые из атомов отдачи создают от 30 000 до 40 000 пар ионов. В случае других элементов было отмечено аналогичное расхождение между наблюдаемыми энергиями и пробегами и величинами, вычисленными в основании предположения, что атомы приводятся в дви-

жение путем отдачи при столкновении с квантом в $55 \cdot 10^6$ вольт-электронов. Энергии атомов отдачи оценивались по числу ионов, возникавших в счетчике, причем это число характеризовалось величиной отклонений осциллографа. Однако достаточно хорошие измерения пробегов могут быть сделаны или путем изменения расстояния между элементом и счетчиком или путем помещения тонких золотых экранов между элементом и счетчиком.

Атомы отдачи азота были также исследованы в сотрудничестве с д-ром Фезером при помощи вильсоновской камеры. Цилиндр с источником располагался непосредственно над камерой типа Шимизу, так что значительная доля бериллиевого излучения проходила сквозь камеру. В течение нескольких часов было наблюдеено большое количество путей атомов отдачи. Их пробеги, оцененные на-глаз, составляли примерно 4 или 6 *м.м* или, внося поправку на расширение, приблизительно 3 *м.м* в стандартном воздухе. Эти визуальные оценки были подтверждены предварительной серией опытов д-ра Фезера с большой автоматической камерой, при помощи которой были получены фотографии путей отдачи в азоте. Пробеги атомов отдачи азота для разных скоростей были ранее измерены Блеккетом и Лисом. Пользуясь их результатами, мы нашли, что атомы отдачи азота, создаваемые бериллиевым излучением, могут иметь скорости, по крайней мере, $4 \cdot 10^8$ *с.м/сек*, что соответствует энергии приблизительно $1,2 \cdot 10^6$ вольт-электронов. Для того чтобы ядро азота могло приобрести такую энергию при столкновении с квантом излучения, необходимо, чтобы энергия этого кванта была около $90 \cdot 10^6$ вольт-электронов, если при столкновении выполняются законы сохранения энергии и количества движения. Но, с другой стороны, уже раньше было показано, что квант в $55 \cdot 10^6$ вольт-электронов достаточен для объяснения столкновений в водороде. Вообще говоря, экспериментальные результаты показывают, что, если объяснять возникновение атомов отдачи путем столкновения с квантом, мы должны принять все большую и большую энергию для кванта по мере того, как возрастает масса приводимых в движение ядер.

§ 3. Гипотеза нейтронов. Очевидно, что мы должны или считать неприменимыми к этим столкновениям законы сохранения энергии и количества движения, или же сделать другую гипотезу о природе излучения. Если мы предположим, что излучение не является квантовым, но состоит из частиц с массой очень близкой к массе протона, то все трудности, связанные со столкновениями как в отношении частоты, так и в отношении передачи количества движения различным массам, исчезают. Для того чтобы объяснить большую проникающую способность излучения, мы должны, далее, принять, что частицы не имеют эффективного заряда. Мы можем предположить, что они состоят из тесной комбинации протона и электрона, т. е. из „нейтронов“, существование которых обсуждалось Резерфордом * в его беккеровской лекции 1920 г.

Когда эти нейтроны проходят сквозь вещество, они испытывают иногда столкновения с атомными ядрами и таким образом дают начало наблюдаемым атомам отдачи. Так как масса нейтрона равна массе протона, то атомы отдачи, получающиеся когда нейтроны проходят сквозь вещества, содержащие водород, должны иметь скорости, наибольшая из которых должна совпадать с максимальной скоростью нейтронов. Опыты показывают, что максимальная скорость протонов, выброшенных из парафина, составляет около $3,3 \cdot 10^9$ см/сек. Это и есть максимальная скорость нейтронов, испускаемых бериллием при бомбардировке α -лучами полония. Отсюда мы можем в свою очередь вычислить максимальную энергию, которая может быть передана соударяющимися нейтронами другим атомам, и мы находим, что результаты оказываются в полном соответствии с энергиями, наблюдаемыми на опыте. Например, атом азота при центральном ударе с нейтроном с массой 1 и скоростью $3,3 \cdot 10^9$ см/сек приобретает скорость в $4,4 \cdot 10^8$ см/сек, что соответствует энергии в $1,4 \cdot 10^6$ вольт-электронов, пробегу 3,3 м.м в воз-

* E. Rutherford, Proc. Roy. Soc., A. 97, 374, 1920 (русск. перевод— „Успехи физич. наук“ 2, 192, 1921 помещена также в сборнике „Строение атома и искусственное разложение элементов“).

духе и количеству ионов около 40 000 пар. Аналогично, атом аргона должен приобрести энергию $0,54 \cdot 10^6$ вольт-электронов и создать около 15 000 пар ионов. Все эти цифры находятся в хорошем согласии с экспериментом.*

Комбинируя результаты наблюдений в водороде и в азоте, можно показать, что масса нейтрона грубо равна массе протона. Фезер** сообщает об опытах, при которых было сфотографировано около 100 путей атомов отдачи азота в вильсоновской камере. Измерение величин путей показывает, что максимальный пробег атомов отдачи составляет 3,5 мм в воздухе при 15°C и 760 мм давления, что отвечает скорости $4,7 \cdot 10^8$ см/сек, согласно данным Блеккета и Лис. Если обозначить соответственно через M , V массу и скорость нейтрона, то в таком случае максимальная скорость, сообщаемая водородному атому, будет:

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

а максимальная скорость, сообщаемая атомам азота, будет

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

откуда

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

и

$$M = 1,15.$$

Полная ошибка при оценке скорости атома азота легко может достигать 10% и поэтому вполне позволительно заключить, что масса нейтрона с большим приближением совпадает с массой протона.

* Следует заметить, что незначительное число атомов отдачи азота создает около 50 или 60 000 пар ионов. Эти случаи, вероятно, соответствуют случаям разрушения ядер, найденным Фезером и описанным в его работе.

** N. Feather, Proc Roy. Soc., A. 136, 709, 1932.

Мы обратимся теперь к рассмотрению образования нейтронов из бериллия при бомбардировке его α -частицами. Мы можем предположить, что α -частица захватывается ядром Be^9 , с образованием ядра C^{12} и с выбрасыванием нейтрона. Этот процесс аналогичен известному искусственному расщеплению, но при нем испускается не протон, а нейтрон. Энергетические соотношения, имеющие место при этом процессе, не могут быть установлены точно, так как массы Be^9 и нейтрона точно не известны. Однако легко показать, что подобный процесс удовлетворяет экспериментальным фактам. Мы имеем:

$$\text{Be}^9 + \text{He}^4 + \text{кинетич. энергия } \alpha\text{-частиц} = \text{C}^{12} + n^1 + \text{кинетич. энергия } \text{C}^{12} + \text{кинетич. энергия } n^1.$$

Если мы допустим, что ядро бериллия состоит из двух α -частиц и нейтрона, то его масса не может быть больше суммы масс этих частиц, ибо энергия связи создается за счет дефекта массы. Тогда уравнение энергии будет:

$$(8,00212 + n^1) + 4,00106 + \text{кинетич. энергия } \alpha\text{-частиц} > 12,003 + n^1 + \text{кинетич. энергия } \text{C}^{12} + \text{кинетич. энергия } n^1$$

или:

$$\text{кинетич. энергия } n^1 < \text{кинетич. энергия } \alpha\text{-частиц} + 0,003 - \text{кинетич. энергия } \text{C}^{12}.$$

Так как кинетическая энергия α -частицы полония равна $5,25 \cdot 10^6$ вольт-электронов, то энергия испускания нейтрона не может быть больше приблизительно $8 \cdot 10^6$ вольт-электронов, поэтому скорость нейтрона должна быть меньше $3,9 \cdot 10^9$ см/сек. Мы видели, что на самом деле максимальная скорость нейтрона равна приблизительно $3,3 \cdot 10^9$ см/сек, так что предположенный процесс разрушения согласуется с наблюдениями.

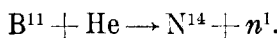
Дальнейшее подтверждение гипотезы нейтрона было получено путем исследования излучения, испускаемого бериллием в направлении, противоположном направлению бомбардирующих α -частиц. Источник, рис. 1 был повернут так, что пластинка парафина, расположенная перед счетчиком, подвергалась действию „обратного“ излучения берил-

лия. Максимальный пробег протонов, выбрасываемых из парафина, определялся, как раньше, путем счета числа наблюдаемых протонов после прохождения через различной толщины алюминиевые экраны, расположенные между парафином и счетчиком. Полученная кривая показана на рис. 2 (кривая В). Максимальный пробег протонов оказался около 22 см воздуха, что соответствует скорости приблизительно $2,74 \cdot 10^9$ см/сек. Так как полониевый источник был расположен на расстоянии всего около 2 мм от бериллия, то эта скорость должна быть сравнимой не со скоростью нейтронов, выпускаемых под углом 180° , но под углом немногим больше 90° к направлению падающих α -частиц. Простой подсчет показывает, что скорость нейтронов, выпускаемых под углом 90° , когда α -частица с полным пробегом захватывается бериллиевым ядром, должна быть $2,77 \cdot 10^9$ см/сек, если принять, что скорость нейтронов, выпускаемых под углом 0° , при том же процессе равна $3,3 \cdot 10^9$ см/сек. Скорость, найденная в описанном выше опыте, должна быть меньше этой, так как угол испускания слегка больше 90° . Совпадение с вычислениями удовлетворительно в той мере, в какой можно было ожидать при данных измерениях.

§ 4. Природа нейтрона. Мы показали, что происхождение излучения бериллия, бомбардируемого α -частицами, и свойства этого излучения, поскольку дело касается его взаимодействия с атомными ядрами, получают простое объяснение, если предположить, что это излучение состоит из частиц с массой, равной приблизительно массе протона, и не имеющих заряда. Наиболее простая гипотеза, какая может быть сделана относительно природы таких частиц, состоит в предположении, что эти частицы являются тесной комбинацией протона и электрона, так что результирующий заряд будет равен нулю, а масса — немного меньше массы водородного атома. Эта гипотеза подтверждается изучением данных, какие могут быть получены относительно массы нейтрона.

Как мы видели, грубая оценка массы нейтрона получается из измерений его столкновений с атомами водорода и азота, но эти измерения для нашей теперешней цели не

могут быть сделаны с достаточной точностью. Мы должны обратиться к рассмотрению энергетических соотношений при процессе, при котором нейтрон освобождается из атомного ядра; если массы атомных ядер, принимающих участие в этом процессе, известны точно, то можно сделать и точную оценку массы нейтрона. Масса ядра бериллия, однако, не была точно измерена и, как показано в § 3, в этом случае могут быть сделаны только общие заключения. К счастью, в нашем распоряжении остается еще случай бора. В § 1 мы указывали, что бор при бомбардировке α -частицами полония также испускает лучи, которые выбрасывают протоны из веществ, содержащих водород. Дальнейшее исследование показало, что это излучение во всех отношениях подобно излучению бериллия, и потому следует допустить, что излучение бора также состоит из нейтронов. Вероятно, что нейтроны испускаются изотопом бора B^{11} , так как мы знаем, что изотоп B^{10} распадается с испусканием протона.* Процесс распада в таком случае будет:



Массы B^{11} и N^{14} известны из измерений Астона, а остальные данные, необходимые для нахождения массы нейтрона могут быть получены из опыта.

В источнике (рис. 1) бериллий был заменен порошкообразным бором, нанесенным на графитовой пластинке. Пробег протонов, выбрасываемых излучением бора, измерялся таким же самым образом, как в случае излучения бериллия. Наблюдаемый эффект был значительно меньше, нежели в случае бериллия, и было трудно измерять точно пробег протонов. Максимальный пробег составлял приблизительно 16 см воздуха, что отвечает скорости $2,5 \cdot 10^9$ см/сек. Это и есть, следовательно, максимальная скорость нейтронов, освобождаемых из бора α -частицами полония со скоростью $1,59 \cdot 10^9$ см/сек. Предполагая, что количество движения при соударениях сохраняется, можно вычислить скорость движения ядер N^{14} , и в таком случае мы будем знать кинети-

* Chadwick, Constable and Pollard, l. c.

ческие энергии всех частиц, принимающих участие в процессе разрушения. Уравнение энергии этого процесса будет:

$$\text{Масса } B^{11} + \text{масса } He^4 + \text{кинетич. энергия } He^4 = \text{масса } N^{14} + \\ + \text{масса } n^1 + \text{кинетич. энергия } N^{14} + \text{кинетич. энергия } n^1.$$

Массы, входящие в это уравнение, таковы: $B^{11} = 11,00825 \pm 0,0016$; $He^4 = 4,00106 \pm 0,0006$; $N^{14} = 14,0042 \pm 0,0028$. Кинетические энергии в единицах массы следующие: α -частица — 0,00565; нейтрон — 0,0035; ядро азота — 0,00061. Мы находим, таким образом, что масса нейтрона равна 1,0067. Ошибки в измерениях масс, указанные выше, даны Астоном. Они являются максимальными ошибками, которые могут быть в его измерениях; вероятная ошибка может быть принята равной приблизительно четверти этих ошибок *. Учитывая ошибки в измерениях масс, мы можем заключить, что масса нейтрона не может быть меньше 1,003 и что она, вероятно, лежит между 1,005 и 1,008.

Такое значение для массы нейтрона следовало ожидать, если нейтрон состоит из протона и электрона, и полученное хорошо подтверждает это представление. Так как сумма масс протона и электрона равна 1,0078, то энергия связи или дефект массы нейтрона равняется около 1 или 2 млн. вольт-электронов. Это — вполне возможное значение. Мы можем предположить, что протон и электрон образуют маленький диполь или же мы можем нарисовать более привлекательную картину, в которой протон внедрен в электрон. При таком представлении мы можем ожидать, что радиус протона равен нескольким единицам порядка 10^{-13} см.

§ 5. Прохождение нейтронов сквозь вещество. Электрическое поле нейтрона этого типа, очевидно, должно быть чрезвычайно малым за исключением областей, расположенных к нему весьма близко, на расстояниях по-

* Масса B^{11} по отношению к массе B^{10} была проверена оптическими методами Дженкинсом и Мак Келларом (Phys. Rev. 39, 546, 1932). Их величины совпадают с данными Астона до единицы в пятом знаке. Это указывает, что к измерениям Астона можно относиться с большим доверием.

рядка 10^{-12} см. При своем прохождении сквозь вещество нейтрон не должен испытывать отклонения, за исключением тех случаев, когда он приходит в тесное соударение с ядром. Потенциал нейтрона в поле ядра может быть грубо представлен рис. 3. Радиус площади соударения для заметных отклонений нейтрона должен быть меньше, нежели радиус ядра. Далее, нейтрон должен быть способен проникать легко в ядро и возможно, что рассеяние нейтрона в значительной степени вызывается внутренним полем ядра или, другими словами, что рассеянные нейтроны суть, главным образом, те, которые проникли через потенциальный барьер. Согласно этому взгляду мы должны ожидать, что соударение нейтрона с ядром должно происходить весьма редко и что рассеяние должно быть,

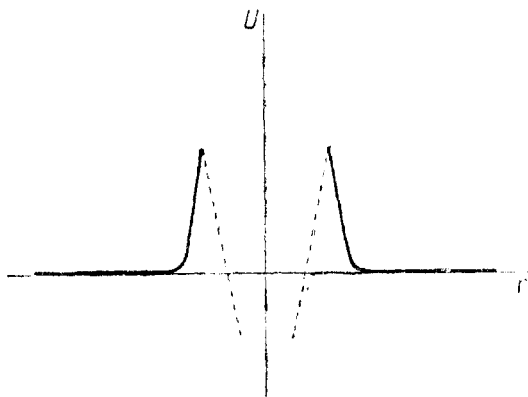


Рис. 3.

грубо говоря, одинаково по всем направлениям, по крайней мере по сравнению с кулоновым рассеянием заряженной частицы.

Эти выводы были подтверждены следующим образом. Источник с бериллиевым экраном был расположен на расстоянии, большем $2\frac{1}{2}$ см от поверхности закрытого счетчика, наполненного воздухом (рис. 1). Число отклонений или число атомов отдачи азота, получавшихся в камере, наблюдалось в течение известного времени. Наблюдаемое число было 190 в час, если принять в расчет естественный эффект. Затем, между источником и счетчиком был помещен сплошной кусок свинца толщиной в $2\frac{1}{2}$ см. Число отклонений упало до 166 в час. Так как число атомов отдачи должно быть пропорциональным числу нейтронов, проходящих сквозь счетчик, то эти наблюдения показывают,

что 13% нейтронов поглощаются или рассеиваются при прохождении через $2\frac{1}{2}$ см свинца.

Предположим, что нейтрон, который проходит на расстоянии p от центра ядра, рассеивается и удаляется из пучка. Тогда доля удаленных из пучка при прохождении через слой t свинца будет $\pi p^2 n t$, где n — число атомов свинца в единице объема. Следовательно,

$$\pi p^2 n t = 0,13,$$

откуда

$$p = 7 \cdot 10^{-13} \text{ см.}$$

Эта величина для радиуса соударения со свинцом мала, но не неправдоподобна. Мы можем сравнить ее с радиусами радиоактивных ядер, вычисленных из констант распада Гамовым и Гаутермансом* и составляющих по их расчетам $7 \cdot 10^{-13}$ см.

Аналогичные опыты были сделаны с прохождением потока нейтронов через латунь и уголь. Величины p , выведенные из этих опытов тем же самым способом, оказались соответственно $6 \cdot 10^{-13}$ см и $3,5 \cdot 10^{-13}$ см.

Эффективные сечения для некоторых легких элементов сравнивались и другим методом. Для этого была использована вторая ионизационная камера, которую можно было наполнять различными газами посредством циркуляции. Положение источника сохранялось неизменным относительно счетчика и наблюдалось число отклонений осциллографа при наполнении счетчика последовательно водородом, азотом, кислородом и аргоном. Так как число нейтронов, проходивших через счетчик, во всех случаях было одинаково, то число отклонений должно быть пропорциональным эффективному сечению соударения, если пренебречь влиянием вещества счетчика и сделать поправку на то, что аргон является одноатомным. Было найдено, что азот, кислород и аргон дают приблизительно одинаковое число отклонений; таким образом эффективное сечение азота и кислорода грубо

* G. Gamow und F. Houtermans, Z. Physik, 52, 453, 1928.

равны, а эффективное сечение аргона приблизительно в два раза больше. С водородом измерения были очень трудны, так как большинство отклонений было очень слабо вследствие малой пониживающей способности протонов и малой плотности газа. Результаты показывают, что эффективное сечение водорода, вероятно, составляет около двух третей сечения азота или кислорода, но оно может быть и больше.

Пока еще мы имеем мало сведений относительно углового распределения рассеянных нейтронов. В некоторых опытах, любезно выполненных для меня Греем и Ди, рассеяние свинцом сравнивалось в обратном и в прямом направлениях при помощи ионизации в камере высокого давления. Грей и Ди нашли, что величина рассеяния приблизительно такая же, какую можно было ожидать на основании только что упомянутых измерений, и что интенсивность на единицу телесного угла приблизительно одинакова между 30° и 90° в прямом направлении и между 90° и 150° в обратном направлении. Таким образом рассеяние свинцом не является заметно анизотропным.

Два типа соударений представляют особенный интерес: соударение нейтрона с протоном и соударение нейтрона с электроном. Детальное изучение соударений с элементарными частицами представляет особый интерес, так как оно должно дать сведения о структуре и поле самого нейтрона, тогда как соударения с другими ядрами главным образом, представляют интерес с точки зрения исследования структуры этих ядер. Некоторые предварительные опыты Ди при помощи ионизационной камеры высокого давления — опыты, имевшие целью измерение рассеяния нейтронов твердым парафином и жидким водородом, указывают на то, что соударение с протоном является более частым, нежели соударение с другими легкими атомами. Это не согласуется с описанными выше опытами, однако, результаты не являются совершенно определенными. Эти соударения можно исследовать более прямым способом при помощи вильсоновской камеры или методом счета, и я надеюсь в близком будущем произвести такое исследование.

Соударение нейтрона с электроном исследовалось двум

путями: при помощи вильсоновской камеры и счетчиком. Описание опытов с вильсоновской камерой дано Ди в особой статье *. Ди изучал общую ионизацию, создававшуюся большим числом нейтронов при прохождении через камеру и короткие электронные траектории, которые должны быть результатом тесного соударения между нейтроном и электроном. Его результаты показывают, что соударения с электронами чрезвычайно редки по сравнению с соударениями с ядрами азота, и он оценил, что нейтрон может создавать, в среднем, не более одной пары ионов при прохождении сквозь 3 м воздуха.

В опытах со счетчиком пучок нейтронов проходил сквозь кусок латуни толщиной в 2,5 см и определялся максимальный пробег протонов, выбрасываемых проходящим пучком. По найденному таким путем пробегу определялась максимальная скорость нейтронов, после прохождения через латунь, и ее можно было сравнивать с максимальной скоростью в падающем пучке. Никакого изменения скорости нейтрона вследствие прохождения их через латунь нельзя было обнаружить. Точность этих опытов была невелика, так как определение конца пробега протонов было очень затруднительно. Результаты показывают, что потеря энергии нейтрона при прохождении через 2,5 см латуни не больше, чем приблизительно $0,4 \cdot 10^6$ вольт-электронов. Путь в 2,5 см латуни соответствует в отношении соударений с электронами пути приблизительно в $2 \cdot 10^4$ см воздуха, так что этот результат показывает, что нейтрон теряет менее 20 вольт/см пути в воздухе на соударение с электронами. Этот опыт, таким образом, дает общее подтверждение опытам с вильсоновской камерой, но он гораздо менее точен. Мы заключаем, что передача энергии от нейтрона к электронам — в высшей степени редкое событие. Это не является неожиданным. Бор ** показал, исходя из самых общих представлений, что соударение нейтрона с электроном должно быть весьма редким по сравнению с ядерными соударениями.

* De e, Proc. Roy. Soc., A. 136, 727, 1932.

** Копенгагенская дискуссия, не опубликовано.

Массей, * на основании правдоподобных допущений относительно поля нейтрона, произвел детальные вычисления потери энергии на электроны, и нашел также что эта потеря должна быть мала, — не больше 1 пары ионов на 1 м воздуха.

§ 6. Общие замечания. Интересно исследовать, испускаются ли нейтроны другими элементами, кроме бериллия и бора при бомбардировке α -частицами. Опыты, выполненные до сих пор, показывают, что не имеется случаев, где бы эффект был сравним с этими двумя. Некоторые указания на испускание нейтронов были получены для фтора и магния, однако, в этом случае эффект был очень мал, — меньше 1% эффекта, получаемого в бериллии при тех же условиях. Имеется также возможность, что некоторые элементы испускают нейтроны спонтанно; сюда может относиться калий, относительно которого известно, что он испускает ядерное β -излучение, сопровождаемое более проникающим излучением. Однако доказательств присутствия нейтронов не было найдено и представляется достоверным, что это проникающее излучение калия является, как и было допущено первоначально, γ -излучением.

Хотя определенное доказательство испускания нейтронов имеется только в двух случаях ядерных превращений, мы можем, тем не менее, предположить, что нейтрон является обычным компонентом атомных ядер. Мы можем попытаться сконструировать ядра из α -частиц, нейтронов и протонов и тем самым избежать присутствия в ядре некомбинированных электронов. Это имеет определенные преимущества, ибо, как хорошо известно, электроны в ядре теряют некоторые из свойств, которыми они обладают вне ядра, например, свой спин и магнитный момент. Если α -частица, нейтрон и протон только и являются компонентами структуры ядра, то мы можем подсчитать дефект массы или энергию связи ядра, как разность между массой ядра и суммой масс, образующих его основных компонентов. Однако ни в коем случае не может считаться достоверным, что α -частица

* Massey, „Nature“. 129, 469, 691, (1932).

и нейтрон являются единственными сложными частицами, входящими в состав ядра, и потому дефекты массы, вычисленные таким путем, могут и не быть истинной энергией связи ядер.

Здесь можно отметить, что примеры разрушения ядер нейтронами, рассмотренные Фезером, * не являются всеоднотипными, и Фезер предположил, что в некоторых случаях может выбрасываться частица с массой 2 и зарядом 1, т. е. недавно открытый Юреем, Брикведде и Мерфи изотоп водорода.

До сих пор допускалось, что нейтрон представляет собою сложную частицу, состоящую из протона и электрона. Это — простейшее предположение, и оно подтверждается тем, что масса нейтрона равна около 1,006, т. е. немного меньше, нежели сумма масс электрона и протона. Такой нейтрон должен явиться первой ступенью в комбинации элементарных частиц для образования ядер. Очевидно, что этот нейтрон может помочь нам ясно представить себе возникновение более сложных структур, но обсуждение этих вопросов мы дальше не продолжаем, так как подобные спекуляции, хотя и не являются совершенно пустыми, — в данный момент еще не слишком плодотворны. Конечно, можно предположить, что нейтрон является элементарной частицей. Однако в настоящий момент такое представление едва ли целесообразно, если только исключить возможность объяснения статистики ядер, подобных N^{14} .

Остается рассмотреть превращения, которые происходят, когда α -частица захватывается ядром бериллия Be^9 . Данные, приведенные в этой статье, указывают, что главный тип превращения состоит в образовании ядра C^{12} и в испускании нейтрона. Опыты Кюри-Жолио и Жолио **, Оже *** и Ди **** совершенно определенно показывают, что существует излучение, испускаемое бериллием, которое способно

* Feather, l. c.

** J. Curie-Joliot et F. Joliot, C. R. Acad. Sciences 194, 708, 876 (1932).

*** F. Joliot, C. R. 194, 877 (1932).

**** P. Dee, l. c.

создавать быстрые электроны при прохождении сквозь вещество *. Я производил опыты со счетчиком Гейгера, имея в виду исследовать это излучение, и результаты показывают, что быстрые электроны создаются γ -излучением. Имеется два различных процесса, которые могут дать начало такому излучению. Прежде всего, мы можем предположить, что превращение бериллия Be^9 в C^{12} происходит иногда с образованием возбужденного ядра C^{12} , которое переходит в нормальное состояние с испусканием γ -лучей. Этот процесс аналогичен превращениям, которые, как предполагается, происходят в некоторых случаях при разрушении ядра с испусканием протонов, например B^{10} , F^{19} , Al^{27} ; большинство этих превращений происходит с образованием возбужденного ядра, и только примерно в одной четверти случаев окончательное состояние остаточного ядра возникает в первой стадии. В таком случае мы должны бы иметь две группы нейтронов с различными энергиями и γ -излучение с квантом, равным разности энергий этих групп нейтронов. Квант энергии этого излучения должен быть меньше максимальной энергии выбрасываемых нейтронов, т. е. $5,7 \cdot 10^6$ вольт-электронов. Во-вторых, мы можем предположить, что иногда ядро бериллия превращается в ядро C^{13} и весь избыток энергии испускается в виде γ -излучения. В этом случае квант энергии излучения должен быть приблизительно $10 \cdot 10^6$ вольт-электронов.

Интересно отметить, что Вебстер наблюдал мягкое излучение бериллия, бомбардируемого α -частицами полония, причем квант этого излучения должен быть приблизительно $5 \cdot 10^5$ вольт-электронов. Это излучение вполне можно приписать первому из рассмотренных двух процессов и его интенсивность имеет правильный порядок величины. С другой стороны, некоторые из электронов, наблюдаемых Кюри-Жолио и Жолио, имеют энергии порядка от 2 до $10 \cdot 10^6$ вольт-электронов, а Оже отмечает один пример электрона с энергией около $6,5 \cdot 10^6$ вольт-электронов. Эти электроны

* В то время как нейтроны создают медленные электроны, см. выше. *Перев.*

могут быть созданы жестким γ -излучением, получающимся при преобразованиях второго типа *.

Можно отметить, что электронов с большей энергией, нежели указанная выше, повидимому, не имеется. Это подтверждается опытом, выполненным в этой лаборатории д-ром Оккилиани. Два счетчика Гейгера были расположены в горизонтальной плоскости и число совпадений, регистрируемых ими, наблюдалось при помощи метода, разработанного Росси. Бериллиевый источник затем был расположен в плоскости счетчиков, так что излучение проходило сквозь оба счетчика последовательно. Никакого увеличения числа совпадений при этом не было обнаружено. Отсюда следует, что если и возможно возникновение β -лучей с энергией, достаточной для прохождения сквозь стенки обоих счетчиков, т. е. в совокупности 4 мм латуни, то такие β -частицы возникают лишь в незначительном количестве; энергии, о которой при этом идет речь — больше, нежели примерно $6 \cdot 10^6$ вольт. Этот опыт показывает, далее, что нейтроны очень редко вызывают совпадение в счетчиках при обычных условиях опыта **.

В заключение, я еще раз коротко формулирую основания, заставляющие предположить, что излучение, эффекты которого были рассмотрены в этой статье, состоит из нейтральных частиц, а не из квантов. Во-первых, не существует данных, чтобы при соударениях электронов могло возникать излучение с таким квантом энергии, какой необходим для объяснения ядерных соударений. Во-вторых, гипотеза о квантовой природе этого излучения может быть сохранена только ценою отказа от законов сохранения энергии и количества движения. С другой стороны, гипотеза нейтронов дает непосредственное и простое объяснение экспериментальных фактов; оно является вполне последовательным и оно бросает новый свет на проблему строения ядра.

* Хотя возникновение быстрых электронов легко может быть объяснено таким образом, не следует упускать из виду возможность, что некоторые из этих электронов возникают в результате вторичных эффектов нейтронов.

** См. также Rasetti, Nature, 20, 252 (1932).

РЕЗЮМЕ

Исследованы свойства проникающего излучения, испускаемого бериллием и бором при бомбардировке α -частицами полония. Сделано заключение, что это излучение состоит не из квантов, как предполагалось первоначально, но из нейтронов, т. е. частиц с массой 1 и зарядом 0. Приведены доказательства того, что масса нейтрона, вероятно, лежит между 1,005 и 1,008. Это указывает на то, что нейтрон состоит из тесной комбинации протона и электрона с энергией связи приблизительно от 1 до $2 \cdot 10^6$ вольт-электронов. На основании опытов с прохождением нейтронов сквозь вещество рассмотрен вопрос о частоте их соударений с атомными ядрами и электронами.
