

## НЕЙТРОНЫ И ДЕЛЕНИЕ АТОМНЫХ ЯДЕР

\* \*

## § 92. История открытия нейтрона

1. Нейtron в ядерной физике и ее приложениях играет по меньшую роль, чем электрон в электронике. Хотя при изучении физики ядра мы все время имели дело с нейтронами, до сих пор ничего не было сказано об истории открытия этих частиц. А этот вопрос в учебнике, несомненно, представляет определенный интерес. Заполним теперь коротко этот пробел.

Первая искусственная ядерная реакция



побудилась Резерфордом в 1919 г. Протоны в этой реакции регистрировались по сцинтиляциям, вызываемым ими на экране из сернистого цинка. После открытия реакции (92.1) Резерфордом, Чедвиком и др. началось энергичное изучение аналогичных ядерных реакций. Однако до 1931 г. не существовало ускорителей, пригодных для этой цели. Искусственные превращения атомных ядер пытались осуществлять путем облучения их  $\alpha$ -частицами, особенно наиболее энергичными, испускаемыми  ${}^{214}_{84}\text{Po}$  (радиохимическое обозначение этого изотопа RaC'). Было установлено, что многие элементы, преимущественно легкие, у которых кулоновский барьер сравнительно невысок, при таком облучении испускали протоны. Однако среди самых легких элементов оказались и такие, например Be и Li, которые при облучении  $\alpha$ -частицами протонов не испускали.

2. Был поставлен вопрос, не появляется ли при  $\alpha$ -облучении различных веществ какое-то новое излучение, которое не дает сцинтиляций на экране из сернистого цинка. Для ответа на этот вопрос Боте (1891—1957) и Г. Беккер в конце 1930 г. заменили экран из сернистого цинка счетчиком Гейгера. В качестве источника  $\alpha$ -частиц был взят  ${}^{218}_{84}\text{Po}$ , хотя энергия испускаемых им  $\alpha$ -частиц и не очень велика (5,25 МэВ). Такой выбор был сделан потому, что  ${}^{218}_{84}\text{Po}$  испускает только  $\alpha$ -частицы и не дает  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучений, осложняющих опыт. Между источником  $\alpha$ -частиц и счетчиком Гейгера вводилась пластина из исследуемого вещества, например бериллия, которая и подвергалась облучению. За облучаемой пластинкой можно было вводить свинцовые

пластины различной толщины для суждения о поглощении неизвестных лучей, если таковые будут обнаружены.

Опыт действительно показал, что при облучении некоторых веществ (бериллий, бор, литий) возникает какое-то излучение, вызывающее слабые разряды счетчика Гейгера. Особенно сильное излучение давал бериллий. *Бериллиевые лучи*, как мы будем временно называть неизвестное излучение, оказались весьма проникающими. При прохождении через слой свинца толщиной 2 см интенсивность бериллиевого излучения уменьшалась всего на 13 %. На основании этого можно было заключить, что бериллиевые лучи должны состоять из электрически нейтральных частиц, так как заряженные частицы ионизуют среду и поэтому поглощаются значительно сильнее. Из нейтральных же частиц в 1930 г. были известны только фотоны. Поэтому Боте и Беккер вполне естественно предположили, что бериллиевые лучи состоят из  $\gamma$ -квантов, и притом очень жестких. Однако при более подробных исследованиях это предположение не подтвердилось.

Если бы бериллиевые лучи представляли собой  $\gamma$ -излучение, то по их поглощению в свинце, например, можно было бы оценить энергию соответствующего  $\gamma$ -кванта. Таким путем было найдено, что максимальная энергия  $\gamma$ -кванта должна быть около 7 МэВ. А это не согласовывалось с результатами, найденными из других опытов. Кроме того, поглощение  $\gamma$ -лучей тем больше, чем больше плотность поглотителя. Для бериллиевых лучей соотношение оказалось обратным.

3. И. Кюри и Ф. Жолио-Кюри в 1932 г. повторили опыты Боте и Беккера, заменив счетчик Гейгера ионизационной камерой. Помещая между источником бериллиевых лучей и ионизационной камерой листы парафина, они обнаружили, что из парафина исходили протоны, максимальный пробег которых в воздухе достигал 26 см. Такому пробегу соответствовала энергия протона  $E \approx 4,5$  МэВ. Появление протонов отдачи в этих опытах было непосредственно доказано путем наблюдения треков в камере Вильсона. Подобно парафину действуют также все водородсодержащие вещества.

Зная максимальную энергию протонов, на основе гипотезы Боте и Беккера о природе бериллиевого излучения супруги Кюри вычислили необходимую максимальную энергию  $\gamma$ -квантов. Расчет производился следующим образом.

Если протоны появляются под действием  $\gamma$ -квантов, то, очевидно, этот процесс есть комптон-эффект на протонах водорода, в котором их можно считать свободными. Поэтому для изменения длины волны  $\lambda$  при рассеянии  $\gamma$ -кванта на угол  $\vartheta$  можно воспользоваться известной формулой

$$\lambda' - \lambda = (h/mc)(1 - \cos \vartheta),$$

в которой, однако,  $m$  означает массу протона, а не электрона

(см. § 3). Максимальное изменение длины волны получается при рассеянии назад, т. е. при  $\vartheta = \pi$ . В этом случае  $\lambda' - \lambda = 2h/mc$ . Отсюда находим частоту  $v'$ , а затем и энергию выбитого протона:

$$\mathcal{E} = hv - hv' = \frac{hv}{1 + mc^2/2hv}. \quad (92.2)$$

Подставляя сюда  $\mathcal{E} = 4,5$  МэВ,  $mc^2 = 938$  МэВ, вычисляем  $hv = 48$  МэВ. Такова должна быть энергия  $\gamma$ -квантов, чтобы при их рассеянии получились протоны требуемой энергии. Сами  $\gamma$ -кванты должны возникать в бериллии под действием  $\alpha$ -частиц, излучаемых полонием. Так как энергия последних всего 5,25 МэВ, то трудно допустить, чтобы они возбуждали  $\gamma$ -кванты столь высоких энергий. Кроме того, полученное значение 48 МэВ не согласуется с энергией 7 МэВ тех же  $\gamma$ -квантов, найденной по их поглощению.

4. Наиболее тщательные исследования природы бериллиевого излучения были произведены Чедвиком в 1932 г. Схема его установки принципиально не отличается от той, какой пользовались

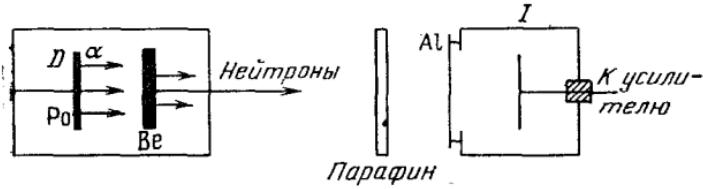


Рис. 158

супруги Кюри. Она изображена на рис. 158. На подложку  $D$  насыпали слой полония  $Po$ . Альфа-частицы, испускаемые ядрами  $Po$ , вступали в ядерную реакцию  $(\alpha, n)$  с ядрами  $Be$ . Нейтроны на пути к ионизационной камере пропускались через слой парафина. Заметим, что ионизационная камера  $I$  прикрывалась листами алюминия различной толщины для определения пробегов, а следовательно и энергий протонов, исходивших из парафина. Для максимальной энергии протонов из парафина Чедвик получил  $\mathcal{E} = 5,7$  МэВ. Если бы бериллиевые лучи состояли из  $\gamma$ -квантов, то при таком значении  $\mathcal{E}$  максимальная энергия  $\gamma$ -кванта получилась бы  $hv = 55$  МэВ. Но Чедвик исследовал рассеяние бериллиевых лучей не только парафином, но и другими веществами и рассчитал по формуле (92.2) соответствующие максимальные энергии  $\gamma$ -квантов. Из измерения пробегов ядер отдачи в азоте получилось  $hv = 90$  МэВ, а в аргоне  $hv = 150$  МэВ.

Итак, гипотеза, отождествлявшая бериллиевые лучи с  $\gamma$ -квантами, приводила к противоречивым результатам. Для одной и той же величины различные методы давали значения 7, 55, 90, 150 МэВ. Это доказывало неправильность указанной гипотезы. Однако, как указал Чедвик, все противоречия устраняются, если

предположить, что бериллиевые лучи образуются потоком не  $\gamma$ -квантов, а других нейтральных частиц, названных им нейтронами.

Возможность существования нейтронов предусматривалась еще Резерфордом в 1920 г. Он допускал возможность существования сложной частицы, состоящей из протона и электрона. Но в этой частице протон и электрон связаны между собой еще более прочно, чем в атоме водорода в основном состоянии. Существование подобной нейтральной частицы подтвердилось, но гипотезу о ее строении из протона и электрона пришлось оставить (см. § 63).

Однако гипотеза Резерфорда о строении нейтрона позволяет сразу понять, почему для выбивания наблюдаемых протонов из парафина требуются нейтроны несравненно меньшей энергии, чем энергия  $\gamma$ -квантов. Дело в том, что в соответствии с гипотезой Резерфорда масса пейтрона должна быть с большой точностью равна массе протона. Примем, что масса  $m$  протона и пейтрона одна и та же. При лобовом столкновении  $\gamma$ -кванта с энергией  $hv$  с протоном последний получает импульс  $mv = hv/c$ . Отсюда

$$\frac{mv^2/2}{hv} = \frac{v}{2c}.$$

Но при равенстве масс протона и нейтрона величина  $mv^2/2$  равна также энергии нейтрона. Из последней формулы видно, что эта энергия должна быть значительно меньше энергии соответствующего  $\gamma$ -кванта. Отметим, что в этом рассуждении принималось во внимание только предположение о равенстве масс протона и нейтрона, а гипотеза о строении последнего совсем не использовалась.

5. Чедвик произвел и первое, хотя и недостаточно точное измерение массы пейтрона  $m_n$ . Он исходил из следующих соображений. Если нейtron претерпевает лобовое столкновение с покоящимся ядром массой  $m$ , то на основании законов сохранения энергии и импульса в нерелятивистском приближении можно написать

$$m_nv_{n1}^2 = m_nv_{n2}^2 + mv^2, \quad m_nv_{n1} = m_nv_{n2} + mv,$$

где  $v_{n1}$  и  $v_{n2}$  — скорости нейтрона до и после столкновения, а  $v$  — скорость ядра отдачи. Отсюда

$$v = \frac{2m_n}{m + m_n} v_{n1}.$$

Производились измерения максимальных скоростей ядер отдачи в водороде ( $v_h$ ) и в азоте ( $v_N$ ). Максимум скорости ядер отдачи свидетельствовал о том, что в обоих случаях скорости нейтронов были одинаковы, а именно максимальны. Поэтому, полагая в предыдущем уравнении спачала  $m = m_h$ , а затем  $m = m_N$ , по-

членным делением получаем

$$\frac{v_H}{v_N} = \frac{m_N + m_n}{m_H + m_n} = \frac{m_N/m_H + m_n/m_H}{1 + m_n/m_H}. \quad (92.3)$$

Из своих измерений Чедвик нашел, что наиболее вероятные максимальные скорости отдачи ядер водорода (протонов) и азота равны  $v_H = 3,3 \cdot 10^9$  см/с и  $v_N = 4,7 \cdot 10^8$  см/с. Пользуясь этими значениями и полагая  $m_N/m_H = 14$ , из предыдущего соотношения находим  $m_n/m_H = 1,15$ . Учитывая довольно большую ошибку метода, Чедвик заключил, что  $m_n = m_H$ , т. е. масса нейтрона равна массе протона  $m_p$ . Точное значение массы нейтрона  $m_n = (939,5731 \pm 0,0027)$  МэВ было получено из баланса масс различных ядерных реакций с участием нейтронов. Масса нейтрона отличается от массы протона  $m_p = (938,2796 \pm 0,0027)$  МэВ на  $m_n - m_p = (1,29343 \pm 0,00004)$  МэВ.

### § 93. Деление атомных ядер

**1. Открытие деления атомных ядер — одно из важнейших фундаментальных открытий, получившее многочисленные научно-технические применения.** Предыстория этого открытия начинается с 1934 г., когда Ферми со своими сотрудниками начали облучать нейtronами атомные ядра с целью получения новых химических элементов. Нейтроны не имеют электрического заряда — для них не существует кулоновского потенциального барьера. Поэтому им легче проникать внутрь ядра и вызывать различные ядерные превращения, чем заряженным частицам. При облучении самого тяжелого из естественных (встречающихся в природе) химических элементов — урана — Ферми надеялся получить еще более тяжелые химические элементы, называемые *трансуранами*. Эти элементы должны быть радиоактивными, так как в противном случае они встречались бы на Земле в естественном состоянии.

Стабильных изотопов у урана всего три:  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  и  $^{234}\text{U}$ . Самым распространенным является  $^{238}\text{U}$ . Относительная распространенность остальных двух изотопов весьма мала:  $^{235}\text{U}$  составляет около 1/140, а  $^{234}\text{U}$  — всего 1/17 000 долю  $^{238}\text{U}$ . Допустим, что облучению подвергается один из этих изотопов, например  $^{238}\text{U}$ . При таком облучении возникает новый радиоактивный изотоп  $^{239}_{92}\text{U}$ . Этот изотоп перегружен нейtronами, а потому должен испытывать  $\beta^-$ -распад, в результате чего возникает трансурановый элемент с  $Z = 93$ . При последующем  $\beta^-$ -распаде должен возникнуть элемент с  $Z = 94$ , и т. д.

Ферми и его сотрудники действительно обнаружили, что при облучении урана нейtronами возникают новые радиоактивные ядра. Доказательством этого служило появление новых периодов