

Не удалось с помощью ускорителей с энергией частиц 10—15 Мэв решить задачу о структурных элементах ядра. Поскольку протон и  $\alpha$ -частица сами являются ядрами определенных химических элементов (водорода и гелия), то процессы типа (61.1) и (61.5) представляют собой реакции обмена, а не расщепления ядер на составные элементы.

Это положение в ядерной физике существенно изменилось лишь с открытием нейтрона. Изучение свойств нейтронов позволило в основном расшифровать структуру ядра (§ 64) и осуществить практическое использование ядерной энергии (гл. XVIII).

### § 62. Открытие нейтрона. Состав атомных ядер

Когда выяснилось, что не все легкие ядра, обстреливаемые  $\alpha$ -частицами, испускают протоны, возник вопрос о том, что происходит в этих случаях. Происходит ли поглощение  $\alpha$ -частицы ядром без выбрасывания других частиц или происходит выбрасывание каких-то частиц, отличных от протонов? Вопрос этот был решен в 1932 г.

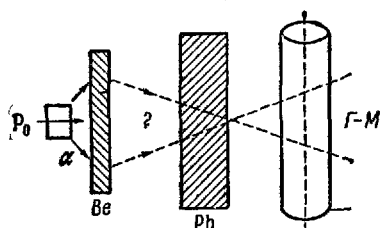


Рис. 3.15.

Одним из элементов, обстрел которых  $\alpha$ -частицами не приводил к появлению протонов, был бериллий. Боте и Беккер, ставя соответствующие опыты с этим элементом, обратили особое внимание на чистоту используемого излучения. Источником  $\alpha$ -частиц служил чистый полоний  $Po_{84}^{210}$ , имеющий то существенное преимущество, что он испускает  $\alpha$ -лучи, превращаясь в устойчивый элемент—свинец; следовательно, кроме  $\alpha$ -частиц, препарат полония никакого уже излучения не дает. Правда, энергия его  $\alpha$ -частиц меньше, чем у  $RaC'$ , составляя 5,25 Мэв, но для проникновения в ядра выбранного для опытов легкого бериллия ( $Z=4$ ) этого вполне достаточно.

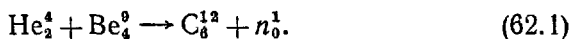
При обстреле бериллия  $\alpha$ -частицами было обнаружено возникновение сильно проникающего излучения. Схема опыта приведена на рис. 3.15. Было найдено, что новое излучение теряет всего 13% интенсивности при прохождении 2 см свинца. Очевидно, что это не поток заряженных частиц. Вначале предположили, что это жесткие  $\gamma$ -кванты; судя по поглощению, им следовало приписать энергию в 7 Мэв. Дальнейшие исследования французских ученых Ф. Жолио-Кюри и его жены Ирэн Кюри (дочери Склодовской-Кюри) показали, что новое излучение весьма интенсивно выбивает протоны из водородсодержащих веществ, например парафина.

При обстреле бериллия  $\alpha$ -частицами было обнаружено возникновение сильно проникающего излучения. Схема опыта приведена на рис. 3.15. Было найдено, что новое излучение теряет всего 13% интенсивности при прохождении 2 см свинца. Очевидно, что это не поток заряженных частиц. Вначале предположили, что это жесткие  $\gamma$ -кванты; судя по поглощению, им следовало приписать энергию в 7 Мэв. Дальнейшие исследования французских ученых Ф. Жолио-Кюри и его жены Ирэн Кюри (дочери Склодовской-Кюри) показали, что новое излучение весьма интенсивно выбивает протоны из водородсодержащих веществ, например парафина.

Удалось измерить длину следа протонов, выбиваемых бериллиевым излучением, оказавшуюся равной 25 см. Расчет показал, что протон может получить соответствующую скорость при ударе  $\gamma$ -кванта, энергия которого равна 55 Мэв. Дальнейшие опыты привели к еще более странным результатам. Удалось обнаружить ядра отдачи и в азоте с длиной следа в 3 мм. Такие ускорения тяжелых ядер азота могли бы дать  $\gamma$ -кванты энергии 90 Мэв. Исследования с ядрами аргона привели к еще более астрономической цифре—150 Мэв.

Чэдвик первый высказал предположение о том, что новое излучение представляет собой не  $\gamma$ -кванты, а поток тяжелых незаряженных частиц, которые были названы нейтронами. По следам отдачи ядер разных масс можно было заключить о том, что масса нейтронов весьма близка к массе протонов. На рис. XI (в конце книги) мы воспроизводим фотографии следа ядра отдачи в камере Вильсона. След нейтрона не виден, так как нейтрон, не обладая зарядом, сам ионизации не производит. Дальнейшие исследования показали, что масса нейтронов равна 1,008982 аем (масса протона равна 1,007593 аем).

Обозначим нейтрон через  $n_0^1$ . Поставленные индексы указывают, что нейтрон имеет заряд  $Z=0$  и массовое число  $A=1$ . Расшифровка исходной ядерной реакции получения нейтрона приводит к уравнению



Отсутствие электрического заряда нейтронов приводит к тому, что они практически не взаимодействуют с электронной оболочкой встречающихся атомов. По той же причине отсутствует и электрическое взаимодействие с атомными ядрами. Специфическое (не электрической природы!) взаимодействие нейтронов с ядрами, обуславливающее возможность содержания нейтронов в ядрах, которое будет рассмотрено подробнее в § 64, имеет место на расстояниях от центра ядра, не превышающих  $10^{-12}$  см. Поэтому пучки нейтронов в веществе и обладают высокой проникающей способностью, а их обнаружение возможно лишь путем наблюдения результатов непосредственного взаимодействия нейтронов с ядрами.

Для регистрации быстрых нейтронов используют их упругие столкновения с ядрами, при которых последним передается значительная часть энергии нейтрона. Благодаря практическому равенству масс нейтрона и протона при упругом ударе нейтрона с неподвижным протоном последнему передается большая часть кинетической энергии нейтрона (вплоть до всей при прямом ударе (см. т. I, § 8), при котором нейтрон останавливается, а протон начинает двигаться в том же направлении с энергией, равной первоначальной энергии нейтрона). При этом протон производит на

своем пути интенсивную ионизацию, регистрируемую счетчиком или камерой Вильсона.

После нескольких последовательных столкновений с атомными ядрами быстрые нейтроны отдают свою избыточную энергию и в дальнейшем совершают хаотическое движение с тепловыми скоростями (диффундируют в веществе). Для таких тепловых нейтронов описанный выше метод регистрации становится непригодным. В этом случае используют ядерные реакции, обратные (62.1), при которых нейтрон, проникая в ядро, приводит к вылету из последнего  $\alpha$ -частицы большой энергии.

Практически для регистрации медленных нейтронов используется обладающая сравнительно высокой вероятностью реакция



при которой выбрасывается быстрая  $\alpha$ -частица с энергией 2,1 Мэв. Если в ионизационную камеру или счетчик ввести газообразный трехфтористый бор ( $\text{BF}_3$ ), то при прохождении нейтронов через камеру можно судить об их количестве по ионизации, производимой возникающими  $\alpha$ -частицами. Иногда вместо газообразного соединения бора в камеру вводятся пластинки, покрытые металлическим бором.

Вероятность различных типов ядерных взаимодействий характеризуется величинами эффективных сечений, определяемыми по соотношениям, аналогичным соотношениям, установленным в § 60 для  $\gamma$ -лучей. Благодаря малости размеров ядер и малому радиусу действия ядерных сил, эти эффективные сечения выражаются весьма малыми числами. При размере ядра порядка  $10^{-12}$  см его геометрическое сечение порядка  $10^{-24}$  см<sup>2</sup>.

Как указывалось в § 59, эффективное сечение  $\sigma$  характеризует сложные процессы взаимодействия и может быть как больше, так и меньше формального геометрического сечения. В качестве удобной единицы измерений ядерных эффективных сечений принята геометрическая единица

$$1 \text{ барн} = 10^{-24} \text{ см}^2.$$

Для примера укажем, что эффективное сечение для ядерной реакции (62.2) на тепловых нейтронах составляет  $\sigma \approx 500 \text{ барн} = 5 \cdot 10^{-22} \text{ см}^2$ . При концентрации атомов (ядер) бора  $n \approx 10^{19}/\text{см}^3$ , средняя длина пробега нейтрона до превращения (62.2) будет согласно (60.11) составлять

$$l = \frac{1}{n\sigma} = \frac{1}{5 \cdot 10^{-22} \cdot 10^{19}} = 200 \text{ см} = 2 \text{ м}.$$

Следовательно, лишь небольшая, но вполне определенная доля нейтронов, проходящих через камеру, будет вызывать реакцию (62.2) и регистрироваться счетной установкой.

Заметим, что при достаточной толщине слоя любого вещества (а не только бора) движущийся в нем свободный нейтрон в конечном счете поглотится одним из встречных ядер. Образующееся ядро является, как правило, неустойчивым и испытывает различные превращения. Таким образом, в отличие от  $\alpha$ -частиц, нейтроны могут быть использованы для осуществления ядерных реакций и при этом не требуется сообщать им предварительно большую энергию. Эти свойства нейтронов были в дальнейшем широко использованы в технике применения ядерной энергии (см. гл. XVIII).

Итак, из ядер могут вылетать и поглощаться ими  $\alpha$ -частицы. С помощью  $\alpha$ -частиц из некоторых ядер можно выбивать протоны, из других — нейтроны. Какие же частицы входят в состав атомных ядер? До 1932 г. были известны две (если не считать фотонов) элементарные частицы: электрон и ядро легчайшего, водородного, атома — протон. Целочисленность атомных весов (изотопов, а не химических средних весов) наталкивала на мысль, что атомы, следовательно и ядра атомов, построены из этих же частиц. Так, например, атом гелия  $\text{He}_2^4$  примерно в 4 раза тяжелее атома водорода. Полагали, что атом гелия и построен из четырех водородных. Считали, что четыре протона и два электрона входят в состав ядра, остальные два электрона образуют электронную оболочку. Небольшие отклонения от целочисленности веса здесь в расчет могут не приниматься, — ниже будет показано, что они обусловлены энергией связи между частицами атомного ядра.

Наличие в ядрах электронов казалось бы подтверждается фактом  $\beta$ -распада, при котором из ядер атомов вылетают электроны. Однако быстро выяснилось, что такое представление о строении ядра приводит к ряду противоречий с опытом.

В результате взаимодействия между магнитным моментом ядра и орбитальным током (ориентация которого относительно момента ядра определяется магнитным квантовым числом  $m$ ) наблюдается сверхтонкое расщепление спектральных линий. По сверхтонкому расщеплению линий можно определять магнитный момент ядер. Оказалось, что по порядку величины он совпадает с магнитным моментом протона. Измерения магнитных моментов ядер методом парамагнитного резонанса (т. II, § 46) приводят к значениям порядка так называемого ядерного магнетона  $\mu_n =$

$$= \frac{e}{m_p c} \frac{\hbar}{2} = (0,505038 \pm 0,000018) \times 10^{-23} \text{ эс} \cdot \text{см}^3$$
, где  $m_p$  — масса протона. Точные измерения показали, что магнитный момент протона равен  $(1,41044 \pm 0,00004) \cdot 10^{-23} \text{ эс} \cdot \text{см}^3$ , т. е.  $2,79275 \pm 0,00003$  ядерного магнетона. Магнитный момент электрона  $\frac{e}{m_{0e} c} \frac{\hbar}{2}$  в 657,5

раза больше. Для ядер, которые, по предположению, содержат четное число электронов, это может быть объяснено: спины электронов внутри ядер попарно компенсируются у гелия  $\text{He}_2^4$ , у углерода, содержащего, по предположению, в ядре 12 протонов и 6 электронов соответственно. Однако у азота такую компенсацию получить нельзя: для семи электронов один спин по крайней мере останется нескомпенсированным (три спина имеют одно направление, четыре — им обратное). А между тем магнитный момент ядра азота, как и у других ядер, много меньше магнитного момента электрона и не отличается по порядку величины от магнитных моментов других ядер. Кроме того, из самых общих соображений квантовой теории оказалось возможным по чередованию интенсивностей линий спектра комбинационного рассеяния для молекулярного азота установить, что число частиц в ядрах азота четное. Между тем, согласно рассматриваемой теории, ядра азота должны состоять из 14 протонов и 7 электронов, т. е. 21 частицы. Эти противоречия между теорией и опытом получили название «азотной катастрофы». Они были разрешены в результате открытия нейтрона.

Сразу же после открытия нейтрона Д. Д. Иваненко и Е. Н. Гапон высказали гипотезу о том, что ядра атомов состоят только из протонов и нейтронов. Этим решалась азотная катастрофа, становился понятным малый магнитный момент ядер, а также вывод о четном числе элементарных частиц в ядре азота: согласно этой гипотезе, ядра  $\text{N}^{14}$  содержат 7 протонов и 7 нейтронов.

Последующие измерения подтвердили, что спин нейтрона, так же как у протона и электрона, равен  $\hbar/2$ . Несмотря на отсутствие электрического заряда, у нейтрона оказался магнитный момент, по порядку величины близкий к магнитному моменту протона и равный  $-1,91$  ядерного магнетона. Знак минус указывает, что, в отличие от протона, магнитный и механический моменты нейтрона направлены в противоположные стороны. Представление о протонно-нейтронном составе атомных ядер подтверждено большим экспериментальным материалом и в наши дни является общепризнанным.

Простой физический смысл получает массовое число  $A$ : оно дает число  $n$  у к л о н о в — частиц, входящих в состав ядра. Так как атомный номер  $Z$  дает число протонов, то число нейтронов оказывается равным  $N = (A - Z)$ :

$$A \text{ частиц} = Z \text{ протонов} + (A - Z) \text{ нейтронов.} \quad (62.3)$$

Таким образом, *изотопы отличаются числом нейтронов в ядре*. Водород имеет три изотопа с массовыми числами  $A$ , равными соответственно 1, 2 и 3. Ядро легкого изотопа  $\text{H}_1^1$  состоит из одного

протона. Этот изотоп называется протием. Тяжелый водород  $H_2^2$ , иначе называемый дейтерием (D), имеет заряд  $Z=1$  и массовое число  $A=2$ . Его ядро, называемое дейтоном  $d$ , состоит из одного протона ( $Z=1$ ) и одного нейтрона ( $N=A-Z=1$ ). Это строение дейтона подтверждено прямыми опытами. С помощью  $\gamma$ -лучей можно произвести фоторасщепление дейтона:



При бомбардировке водорода пучком нейтронов удается зарегистрировать обратный процесс синтеза дейтонов:



Выделяющаяся при синтезе энергия высвечивается с  $\gamma$ -фотоном энергии  $2,18 \text{ Мэв}$ .

Для того чтобы не вводить новых обозначений для ядер, при записи ядерных превращений принято обозначать ядра химическими символами соответствующих им изотопов (верхний индекс — массовое число, нижний — электрический заряд в единицах  $e$ , т. е. число протонов, так что разность их дает число нейтронов). Например, реакцию (62.5) записывают так:



Третий изотоп водорода  $H_1^3$  называется тритием (T) и имеет заряд  $Z=1$  и массовое число  $A=3$ . Его ядро, называемое тритием  $t$ , состоит из одного протона и двух нейтронов. Тритий  $\beta^-$ -радиоактивен, с периодом полураспада  $12,5$  года.

Гелий также имеет несколько изотопов. Ядра каждого из них содержат два протона ( $Z=2$ ) и разное число нейтронов. Так, ядро основного изотопа  $He_2^4$  состоит из двух протонов и двух нейтронов. Ядро легкого изотопа гелия  $He_2^3$  состоит из двух протонов и одного нейтрона. По отношению к тритию  $H_1^3$  легкий гелий является изобаром. Оба изобарных ядра  $H_1^3$  и  $He_2^3$  имеют одинаковое число нуклонов ( $A=3$ ), почти одинаковый атомный вес ( $H_1^3 - 3,0164525 \text{ аем}$  и  $He_2^3 - 3,0158832 \text{ аем}$ ) и различное число протонов и нейтронов.

Общее число нуклонов в полученных искусственно до 1964 г. тяжелых ядрах достигает 264.

Приведем названия полученных искусственно заурановых элементов: 93 — нептуний, 94 — плутоний, 95 — америций, 96 — кюрий, 97 — берклий, 98 — калифорний, 99 — эйнштейний, 100 — фермий, 101 — менделевий, 102 — нобелий, 103 — лоуренсий. Элемент 104, названный курчатовий, был получен в 1964 г. в Дубне в лаборатории Флерова в количестве нескольких десятков атомов.