

§ 63. β^- -распад. Нейтрино

Протонно-нейтронная модель ядра может быть принята лишь в том случае, если в рамках этой модели удастся объяснить явление β^- -распада. Как меняется состав ядра при β^- -распаде?

Рассмотрим β^- -распад каких-либо ядер, например трития H_1^3 и углерода C_6^{14} :



Ядро H_1^3 до распада содержало два нейтрона и протон. Образовавшееся при распаде ядро He_2^3 содержит нейтрон и два протона. Ядро C_6^{14} содержало 8 нейтронов и 6 протонов, а образовавшееся после распада ядро N_7^{14} содержит 7 нейтронов и 7 протонов. Следовательно, при β^- -распаде в ядре происходит превращение нейтрона в протон и электрон. Протон остается в ядре, а электрон выбрасывается из него. Правильность этого заключения подтверждается наблюдением над свободными нейтронами. Оказалось, что свободные нейтроны β^- -радиоактивны, с периодом полураспада $(11,4 \pm 0,3)$ мин. Превращение свободного нейтрона возможно потому, что масса покоя нейтрона $m_{0n} = 1,008982$ ае превышает массу покоя протона $m_{0p} = 1,007593$ ае на 2,53 массы покоя электрона $m_{0e} = 5,48763 \cdot 10^{-4}$ ае. Казалось бы, что при распаде свободного нейтрона электрон должен был приобрести кинетическую энергию, отвечающую разности масс нейтрона и получившихся частиц:

$$m_{0n} - (m_{0p} + m_{0e}) = 1,53m_{0e}. \quad (63.2)$$

Эта энергия ϵ равна

$$\epsilon = 1,53m_{0e}c^2 = 0,782 \text{ Мэв}. \quad (63.3)$$

В действительности же такой энергией обладают лишь наиболее быстрые из электронов, возникающих при β^- -распаде свободных нейтронов. Это верхняя граница их непрерывного спектра.

В § 57 уже отмечалось, что при β^- -распаде сложных ядер электроны, выбрасываемые из ядер, также имеют непрерывный спектр энергий ϵ_β — от нуля до некоторого верхнего предела:

$$0 \leq \epsilon_\beta \leq \epsilon_{\beta, \text{макс}}. \quad (63.4)$$

Точное исследование масс исходных и конечных ядер показывает, что *теряемая при β^- -распаде энергия всегда одинакова и отвечает наибольшей уносимой электроном энергии $\epsilon_{\beta, \text{макс}}$* . Однако в общем числе β^- -электронов таких частиц очень немного: это видно из рис. 3.16, на котором изображен примерный энергетический спектр β^- -частиц ($\eta(\epsilon)d\epsilon = dn$ дает число электронов в интервале энергий $d\epsilon$).

Таким образом, энергия превращающихся ядер уменьшается всегда на одну и ту же величину $\Delta\varepsilon$:

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon_{\beta, \text{макс}}, \quad (63.5)$$

в то время как энергия покидающих ядро β -частиц различна. Если с помощью функции $\eta(\varepsilon)$ вычислить среднюю энергию β -электронов, то окажется, что она лишь немного превышает четвертую часть от максимальной. Так, например, один из β^- -радиоактивных изотопов семейства урана RaE (согласно общей классификации Bi_{83}^{210}) дает β^- -частицы со спектром, в котором верхняя граница отвечает энергии $\varepsilon_{\beta, \text{макс}} = 1,2 \text{ Мэв}$, а средняя энергия $\varepsilon_{\beta} = 0,34 \text{ Мэв}$.

Было высказано предположение, что β -частицы, вылетающие из ядер, обладают одинаковой энергией $\varepsilon_{\beta, \text{макс}}$, но затем в результате взаимодействия с электронами атомной оболочки и других возможных потерь их спектр приобретает указанный на рис. 3.16 вид. Решить этот вопрос можно с помощью достаточно точных ка-

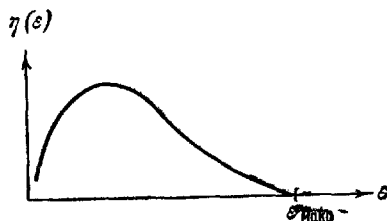


Рис. 3.16.

лориметрических опытов: энергия, потерянная β -частицей, не исчезает из калориметра и наравне с прочими видами выделяющейся в нем энергии приводит в конечном счете к повышению температуры. Результаты наиболее тщательных калориметрических опытов показали, что средняя энергия, выделяемая на одну β -частицу RaE, составляет $0,33 \pm 0,020 \text{ Мэв}$, что совпадает с величиной ε_{β} , полученной из анализа спектра электронов.

Еще в начале развития квантовой физики Н. Бор попытался поставить под сомнение закон сохранения энергии в микромире. Для преодоления ряда первоначальных затруднений в теории строения атома Бор предположил, что закон сохранения энергии носит чисто статистический характер и выполняется лишь в среднем для большого числа элементарных актов. В каждом же элементарном акте возможны отклонения от этого процесса как в одну, так и в другую сторону — возникновение и бесследное исчезновение энергии.

Это предположение было опровергнуто дальнейшим развитием квантовой механики. Из волнового уравнения Шредингера (47.21) следует, что в стационарном состоянии любая квантовая система имеет вполне определенное постоянное значение энергии E . Прямые опыты по наблюдению элементарных актов взаимодействия электронов и фотонов с атомами подтвердили соблюдение закона сохранения энергии в каждом элементарном акте.

После изучения энергетических спектров β -распада, затруднения с пониманием которых описаны выше, Бор вновь попытался выдвинуть идею о несохранении энергии, на этот раз для элементарных внутриядерных процессов. Но и в этом случае такая попытка не оправдалась. Решение загадки β -распада было найдено В. Паули.

Паули предположил, что к р о м е э л е к т р о н а при β -распаде вылетает еще одна частица, не обладающая зарядом и с весьма малой массой. Эта частица была названа н е й т р и н о.

Теоретически существование нейтрино подтверждается еще одним обстоятельством. Все три частицы — нейтрон, протон и электрон — обладают одинаковыми по величине спиновыми моментами,

равными $\frac{\hbar}{2}$. При превращении нейтрона со спином $\frac{\hbar}{2}$ в две частицы — протон и электрон — суммарный момент последних может равняться либо \hbar (если их спины параллельны), либо нулю (если они антипараллельны). Для того чтобы выполнялся закон сохранения момента количества движения, должна обязательно возникнуть еще третья частица со спином $\frac{\hbar}{2}$, которой и является нейтрино.

Нейтрино весьма слабо взаимодействует с веществом, т. е. обладает огромной проникающей способностью, и потребовалось много усилий, прежде чем существование нейтрино было доказано экспериментально. Обозначая нейтрино ν_0^0 (массовое число и заряд равны нулю), следует схему превращения нейтрона записать окончательно в виде



В настоящее время принято именовать частицу, образующуюся при распаде нейтрона, — а н т и н е й т р и н о, что и отмечается значком «тильда» над индексом частицы. О различии между частицей и античастицей будет сказано ниже, в § 72.

При β^- -распаде выделяющаяся энергия $e_{\beta, \text{макс}}$ делится в различной пропорции между порождаемыми в момент превращения электроном и антинейтрино.

При рассмотрении уравнения ядерной реакции (63.6) возникает вопрос, не означает ли эта реакция простого деления нейтрона на три составные части? Или же нейтрон является такой же микрочастицей, как и протон, а электрон и антинейтрино представляют собой новые частицы, не существовавшие «внутри» нейтрона и родившиеся за счет изменения массы в процессе превращения $n \rightarrow p$?

Не вдаваясь в общую проблему элементарных частиц (см. гл. XIX), отметим, что с обеими возможностями мы уже встречались в ч. II и III настоящего курса.

При переходе электрона в атоме с более высокого энергетического уровня на низший испускается фотон с энергией

$$h\nu_{k,n} = E_n - E_k \quad (63.7)$$

и соответствующей массой. Значит ли это, что такой фотон существует в атоме внутри возбужденного атома? Помимо того, что фотон благодаря своим свойствам (равномерное и прямолинейное движение с единственной возможной скоростью c) не может быть ограничен в пределах атома, — против этой возможности говорят и другие факты. Переход электрона с уровня E_n на E_k может происходить не сразу, а через ряд промежуточных ступеней E_r , E_s , E_m , и при этом последовательно будут испускаться фотоны с энергией:

$$\left. \begin{aligned} h\nu_{r,n} &= E_n - E_r, \\ h\nu_{s,r} &= E_r - E_s, \\ h\nu_{m,s} &= E_s - E_m, \\ h\nu_{k,m} &= E_m - E_k. \end{aligned} \right\} \quad (63.8)$$

Сопоставляя (63.7) с (63.8), мы видим, что если трактовать эти процессы как распад атома на составные части, то надо предположить существование внутри атома как фотона $h\nu_{k,n}$, так и одновременно с этим и всех промежуточных фотонов $h\nu_{r,n}$, $h\nu_{s,r}$ и т. д., что бессмысленно. Таким образом, мы приходим к выводу, что при реакции типа (63.7) происходит рождение новой материальной частицы — фотона, ранее внутри атома не существовавшей. Энергия, масса, собственный момент импульса этой частицы равны соответственной убыли энергии, массы и момента импульса испускающего ее атома. Новая частица возникает в процессе, в котором, как и в любом другом, все законы сохранения соблюдаются. То же имеет место и при превращении (63.6). В пользу этого утверждения говорит ряд факторов.

Во-первых, было установлено аналогичное (63.6) превращение протона в нейтрон по реакции

$$p_1^1 \rightarrow n_0^1 + e_{+1}^0 + \nu_0^0, \quad (63.9)$$

где через e_{+1}^0 обозначен **п о з и т р о н** — частица с массой покоя, равной массе покоя электрона, таким же спином $\frac{\hbar}{2}$, несущая такой же по величине, но противоположный по знаку (положительный) электрический заряд $+e$. В отличие от (63.6) позитрону здесь сопутствует нейтрино, а не антинейтрино. Так как масса покоя протона меньше массы покоя нейтрона (и, тем более, суммы

масс нейтрона, позитрона и нейтрино), то такой процесс возможен лишь, если исходный протон обладает достаточной избыточной энергией, обусловленной взаимодействием с другими частицами, например в атомных ядрах. Получающийся нейтрон остается внутри ядра, а родившиеся позитрон и нейтрино выбрасываются наружу. Такой процесс, открытый Жолио-Кюри в 1935 г., носит название *п о з и т р о н н о г о* или β^+ -распада и по своим закономерностям аналогичен β^- -распаду радиоактивных ядер. В отличие от закона смещения (58.2), при позитронном распаде заряд ядра уменьшается на единицу и дочерний элемент смещается влево на одну клетку по таблице Менделеева.

Наконец, известно превращение



При этом превращении ядро захватывает один из электронов своей оболочки и выбрасывает нейтрино. Один из протонов ядра превращается в нейтрон, заряд ядра убывает на единицу и оно смещается влево так же, как и при позитронном распаде. Процесс носит название *е-з а х в а т а* (раньше он назывался *K-захватом*; первые наблюдавшиеся захваты происходили в атомах, где, как правило, захватывается электрон из ближайшей к ядру *K*-оболочки). Вылет нейтрино обнаруживается по отдаче, которую испытывает превратившееся ядро.

Сравнивая (63.6), (63.9) и (63.10), видим, что *каждый из этих процессов нельзя объяснить делением системы на составные части*, не вступая при этом в противоречие с фактом существования других превращений. Эти процессы представляют собой *п р е в р а щ е н и е м и к р о ч а с т и ц* в прямом смысле этого слова. И хотя большинство из этих микрочастиц заведомо не являются простейшими*), толковать эти превращения как распад на части обычной системы (например, как распад атома водорода на протон и электрон)—нельзя. Электрон, позитрон и нейтрино не содержатся в протоне или нейтроне, а порождаются при взаимном превращении последних. Микрочастица как структура существенно отличается от обычной системы (см. § 72, стр. 469, и § 74).

Близость масс нейтрона и протона и наличие взаимных превращений $p \rightleftharpoons n$ с испусканием и поглощением различных легких частиц дает возможность *ф о р м а л ь н о* трактовать нейтрон и протон не как *р а з л и ч н ы е* частицы, но как два *к в а н т о в ы х* состояния одной и той же ядерной частицы или *н у к л о н а*. Массовое число и спиновый механический момент по величине одинаковы в обоих состояниях, а электрический заряд может принимать значения $Z=1$ (протон) и $Z=0$ (нейтрон).

*) «Элементарными» в том смысле, как это понималось еще совсем недавно, — «первичными».