

КОНВЕРСИЯ АТОМНОГО ЭЛЕКТРОНА В ПОЗИТРОН И ДВОЙНОЙ β^+ -РАСПАД

М.Б.Волошин¹⁾, Г.В.Мицельмахер²⁾, Р.А.Эрамжян³⁾

Вероятность процесса конверсии атомного электрона в позитрон во всех ядрах должна превышать вероятность $2\beta^+$ -распада. Вычисленное отношение вероятностей не зависит от ядерных моделей и составляет для большинства ядер ~ 10 в случае безнейтринного превращения и $\sim 10^3$ для процессов с двумя нейтрино.

Указания на ненулевую массу нейтрино, полученные в эксперименте ИТЭФ¹, оживили интерес к безнейтринному 2β -распаду ядер как источнику информации о природе массы нейтрино (см., например,²⁻⁴). Именно такой распад мог бы происходить за счет диагонального майорановского массового члена в массовой матрице нейтрино.

В практически важных случаях $2\beta^-$ -распад более вероятен, чем $2\beta^+$ -распад, из-за кулоновского отталкивания позитронов от дочернего ядра в последнем случае. Поэтому до последнего времени $2\beta^+$ -распад не привлекал внимания исследователей. Однако несмотря на заметную меньшую вероятность, $2\beta^+$ -процесс может представлять интерес по той причине, что его проще идентифицировать. Действительно, образующиеся в распаде позитроны после аннигиляции дают четыре γ -кванта. Регистрация в совпадении двух позитронов и четырех γ -квантов дает возможность выделять такие события с большой уверенностью. Под таким углом зрения был проанализирован недавно $2\beta^+$ -распад в работе³.

Если имеет место $2\beta^+$ -распад, то должна происходить и конверсия атомного электрона в позитрон подобно тому, как обычный β^+ -распад сопровождается захватом атомного электрона⁵. В настоящей статье мы хотим обратить внимание на то, что отношение вероятностей процессов конверсии электрона в позитрон и $2\beta^+$ -распада практически не зависит от ядерных матричных элементов и определяется зарядом ядра и энергovyделением, причем во всех реальных переходах конверсия значительно усилена.

Для разрешенных переходов отношение скоростей безнейтринных процессов конверсии и $2\beta^+$ -распада в случае, когда переходы вызваны майорановской массой нейтрино, можно записать в виде

$$\frac{W_{e \rightarrow \beta^+}}{W_{2\beta^+}} = \frac{2 \frac{1}{\pi} \Delta^2 m_e^2 |\psi(0)|^2 f(\Delta)}{\frac{1}{2} \frac{1}{2\pi^3} m_e^5 f_1^{\Delta-1} \epsilon_1^2 (\Delta - \epsilon_1)^2 f(\epsilon_1) f(\Delta - \epsilon_1) d\epsilon_1}, \quad (1)$$

где Δ — разность масс исходного и дочернего ядра в единицах m_e , ϵ_1 — энергия позитрона в тех же единицах, $\psi(0)$ — волновая функция K -электрона в точке $r = 0$, $|\psi(0)|^2 \approx (eZm_e)^3 / \pi$, $f(\epsilon) = 2\pi aZ | \{ \exp(2\pi aZ/v) - 1 \} |$ фактор, связанный с кулоновским отталкиванием позитрона от дочернего ядра, $v_1 = (1 - \epsilon_1^2)^{1/2}$, $v_2 = [1 - (\Delta - \epsilon_1)^2]^{1/2}$. Множитель 2 в числителе отвечает наличию двух электронов на K -оболочке, а $1/2$ в знаменателе возникает из-за тождественности позитронов. В случае, если переходы обусловлены правыми тосками, выражение (1) для отношения вероятностей будет содержать дополнительный фактор $\Delta^2 / (\epsilon_1 - \epsilon_2)^2$. В среднем это отношение порядка 10. В принципе, это различие можно использовать для установления природы безнейтринного 2β -перехода. Заметим, однако, что гипотеза правых токов представляется нам искусственной.

1) ИТЭФ

2) ОИЯИ

3) ИЯИ АН СССР

В случае двухнейтринных процессов, наряду с захватом одного K -электрона возможен также захват обоих K -электронов. Отношение вероятностей соответствующих трех процессов можно записать в виде

$$W_{2e^- \rightarrow 2\nu} : W_{e^- \rightarrow \beta^+ + 2\nu} : W_{2\beta^+ + 2\nu} = 16\pi^4 |\psi(0)|^4 \Delta^5 : 8\pi^2 |\psi(0)|^2 \int_0^{\Delta-1} f(\Delta-w)(\Delta-w)^2 w^5 dw : \int_0^{\Delta-2} J(\Delta-w) w^5 dw, \quad (2)$$

где $J(\Delta-w)$ – интеграл того же вида, что и в знаменателе формулы (1), отвечающий энерговыделению $\Delta-w$. Исходя из приведенных соотношений (1) и (2) были рассчитаны отношения вероятности конверсии атомного электрона и вероятности $2\beta^+$ -распада как в случае безнейтринного перехода, так и в случае испускания двух нейтрино. Результаты приведены в таблице. Приводимые переходы исчерпывают возможные случаи $2\beta^+$ -распада. Из таблицы следует, что вероятность конверсии атомного электрона значительно превышает вероятность безнейтринного $2\beta^+$ -распада во всех представляющих интерес переходах. Отметим также, что абсолютное значение вероятности конверсии слабо зависит от энерговыделения и определяется, в основном, величиной ядерного матричного элемента. Если испускается два нейтрино, то конверсия атомного электрона усилена по сравнению с $2\beta^+$ -распадом на три и более порядка.

Переход	%	Δ_K / m_e	$W_{e^- \rightarrow \beta^+} / W_{2\beta^+}$	$W_{2e^- \rightarrow 2\nu} / W_{e^- \rightarrow \beta^+ + 2\nu} / W_{2\beta^+ + 2\nu}$
${}^{78}_{36}\text{Kr} \rightarrow \text{Se}$	0,36	3,64	2,6	1900 : 580 : 1
${}^{96}_{44}\text{Ru} \rightarrow \text{Mo}$	5,7	3,33	13	$7,9 \cdot 10^4 : 5,8 \cdot 10^3 : 1$
${}^{106}_{48}\text{Cd} \rightarrow \text{Pd}$	1,22	3,44	16	$1,1 \cdot 10^5 : 6,2 \cdot 10^3 : 1$
${}^{124}_{54}\text{Xe} \rightarrow \text{Te}$	0,10	4,00	11	$2,9 \cdot 10^4 : 2,0 \cdot 10^3 : 1$
${}^{130}_{56}\text{Ba} \rightarrow \text{Xe}$	0,10	3,045	115	$1,2 \cdot 10^7 : 1,4 \cdot 10^5 : 1$
${}^{136}_{58}\text{Ce} \rightarrow \text{Ba}$	0,19	2,71	650	$8,2 \cdot 10^8 : 3,7 \cdot 10^6 : 1$

Заметим также, что двойной безнейтринный K -захват представлял бы заметный интерес, если бы существовала пара ядер, для которых этот процесс мог бы идти резонансным образом т.е. если масса дочернего атома, в котором электроны с K -оболочки переведены в возбужденное состояние, с точностью порядка 10 эВ совпадала бы с массой исходного атома в основном состоянии. Единственным возможным кандидатом является пара атомов $W^{180}_{74} \rightarrow \text{Hf}^{180}_{72}$, разность масс которых составляет 155 ± 10 кэВ, что близко к удвоенной энергии связи K -электрона. Резонансный переход мог бы идти и на возбужденное состояние дочернего ядра, для чего необходимо совпадение разности масс атомов и энергии возбуждения ядра с той же точностью. Однако совпадение масс с необходимой точностью кажется маловероятным.

Таким образом, если будет предпринята попытка исследовать $2\beta^+$ -распад, то следует иметь в виду, что конверсия атомного электрона будет идти с большей вероятностью и, по-видимому именно с этого процесса следует начать исследования перехода. Удается ли при этом наблюдать безнейтринный процесс – вопрос открытый. Но даже если будет зафиксирован процесс с испусканием двух нейтрино, это достаточно интересно, так как двойной β -переход даже с участием двух нейтрино до настоящего времени надежно не зарегистрирован. Тем самым, для данной пары ядер будет зафиксирован матричный элемент перехода, что позволит дискриминировать модели, используемые для расчетов матричных элементов. И, наконец, из такого наблюдения можно будет судить о величине фона, каковым является двухнейтринный процесс относительно безнейтринного.

В случае, если для какой-либо пары ядер будут наблюдаемы оба процесса — и конверсия атомного электрона в позитрон, и $2\beta^+$ -распад, отношение вероятностей этих процессов можно использовать для идентификации безнейтринного перехода аналогично тому, как использовался³ аргумент Понтекорво⁶ о соотношении вероятностей $2\beta^-$ -переходов в ^{130}Te и ^{128}Te .

Конверсия атомного электрона может происходить в гораздо большем числе ядер, чем $2\beta^+$ -распад, так как в последнем случае необходимо затратить энергию на рождение двух электронов. Почти полный список ядер, в которых может происходить конверсия атомного электрона, приведен в обзоре⁷. Отметим, что распространенность в природе некоторых вошедших в список изотопов велика: ^{58}Ni — 67,8%, ^{92}Mo — 15,9%. Эти изотопы также представляются интересными для практических исследований проблемы $2\beta^-$ -перехода.

Таким образом, для всех пар ядер конверсия атомного электрона оказывается более вероятной, чем $2\beta^+$ -распад. Отношение вероятностей этих процессов практически не зависят от ядерных моделей и определяются такими характеристиками, как заряд ядра и энерговыделение.

Авторы благодарны Я.Б.Зельдовичу, Л.Б.Окуню, Б.М.Понтекорво и В.Д.Хованскому за полезные обсуждения.

Литература

1. Козик В.С. и др. ЯФ, 1980, 31, 301.
2. Doi M. et al. Osaka Preprints OSGE 80-27, 81-28, 81-29.
3. Rosen S.P. Talk presented at "Neutrino-81", Hawaii, 1981.
4. Зельдович Я.Б., Хлопов М.Ю. Письма в ЖЭТФ, 1981, 34, 148.
5. Winter R.G. Phys. Rev., 1955, 100, 142.
6. Pontecorvo B. Phys. Lett., 1968, B26, 630.
7. Здесенко Ю.Г. ЭЧАЯ, 1980, 11, 1369