Физика

УДК 539.16

Л. А. БОРИСОГЛЕБСКИЙ, В. А. НОСИЛОВСКАЯ

ВЛИЯНИЕ КВАДРУПОЛЬНОГО МОМЕНТА ЯДРА Pu^{242} ПРИ ПЕРЕХОДЕ 0,861 МэВ НА ПРИВЕДЕННУЮ ВЕРОЯТНОСТЬ ЕО-КОНВЕРСИИ

На K-оболочке атома абсолютная вероятность ЕО-конверсии электрона представляется в виде [1, 2]:

$$W(EO) = \rho^2 \Omega (EO), \tag{1}$$

где

$$\rho = \sum_{p=1}^{Z} \int \Psi_f^* \left(\frac{r_p}{R_0} \right)^2 \Psi_i d\tau$$

приведенная вероятность ЕО-конверсии (в релятивистских единицах), определяемый волновыми функциями ядра Ψ_i и Ψ_f соответственно в начальном и конечном состояниях; R_0 — эквивалентный радиус ядра. Суммирование производится по протонам, интегрирование по конфигурационному пространству ядерных нуклонов.

$$\Omega (EO) = \frac{1}{9} \pi \alpha^2 a_i^2 a_f^2 R_0^4 \tag{2}$$

приведенная вероятность ЕО-конверсии (в релятивистских единицах), определяемая релятивистскими волновыми функциями электрона, зависящая от полной энергии ε связанного электрона, атомного номера Z и энергии ядерного перехода k; α — постоянная тонкой структуры.

Расчет величин a_i и a_f, так называемых кулоновских амплитуд, получаемых обычно путем сшивания электронных функций внутри и вне ядра при $r = R_0$ [3, 4] проводился по формулам [5]:

$$a_{\pm|\varkappa_0|} = \left(\frac{2\alpha Z R \varepsilon}{n' + \gamma} \right)^{\gamma_0 + 1} \frac{1}{2\,\Gamma(2\gamma_0 + 1) R^{|\varkappa_0| + 1}} \times \left[\frac{\Gamma(2\gamma_0 + n')(|\varkappa_0| + \gamma_0)(\varepsilon |\varkappa_0| \mp \gamma_0) B'_{\mp|\varkappa_0|}}{n'!\,\alpha Z} \right]^{1/2}, \tag{3}$$

$$a_{\pm|\varkappa|} = R^{-|\varkappa| + 1} \left[E(|\varkappa| \mp \gamma)\, pF(Z, p)\, B'_{\pm|\varkappa|}/\pi \right]^{1/2}, \tag{4}$$

$$\sqrt{B'_{-|\varkappa|}} = \frac{2\gamma}{(|\varkappa| + \gamma)\, g'_\varkappa(R) + \alpha Z f'_\varkappa(R)}, \qquad \sqrt{B'_{+|\varkappa|}} = \frac{2\gamma}{(|\varkappa| + \gamma)\, f'_\varkappa(R) - \alpha Z g'_\varkappa(R)}, \tag{5}$$

где $F(Z, p)$ — функция Ферми, равная

$$F(Z, p) = \frac{2(|\varkappa| + \gamma)(2pR)^{2\gamma - 2}}{\Gamma(2\gamma + 1)} e^{\pi\alpha Z E/p} \left| \Gamma \left(\gamma + \frac{i\alpha Z E}{p} \right) \right|^2; \tag{6}$$

$\varkappa_0$ и $\varkappa$ — релятивистские квантовые числа, определяющие соответственно начальное i и конечное f состояния электрона, причем $\varkappa_0 = \varkappa = \pm 1$ для первых двух подоболочек атома (K, $L_{\text{I-II}}$, $M_{\text{I-II}}$, $N_{\text{I-II}}$ — подоболочек); $\gamma = \sqrt{1-\alpha^2 Z^2}$; p — импульс электрона в конечном состоянии; Γ — гамма-функция; ε и $E = \varepsilon + k$ — полные энергии конверсионного электрона в связанном и свободном состояниях соответственно; $n' = n - |\varkappa_0|$; n — главное квантовое число; $f'_\varkappa$ и $g'_\varkappa$ — радиальные функции электрона внутри ядра, вид которых зависит от различных предположений о распределении заряда ядра [1, 4]. В настоящей работе распределение заряда в объеме ядра-сферы радиуса $R = R_0$ предполагается равномерным. Радиальные функции электрона $f'_\varkappa$ и $g'_\varkappa$ взяты в виде степенных рядов, в которых учитывались первые четыре члена:

$$f'_{\varkappa_0} = \sum_{\nu=0}^{\infty} c_\nu R^{|\varkappa_0|+\nu-1}; \quad g'_{\varkappa_0} = \sum_{\nu=0}^{\infty} d_\nu R^{|\varkappa_0|+\nu-1}, \tag{7}$$

где коэффициенты c_ν и d_ν задаются рекуррентными формулами [6]:

$$c_{\nu+1}(\varkappa_0) = \frac{-\left(\varepsilon - 1 + \frac{3\alpha Z}{2R}\right) d_\nu + \frac{\alpha Z}{2R^3} d_{\nu-2}}{\nu + 1 + |\varkappa_0| - \varkappa_0}, \tag{8}$$

$$d_{\nu+1}(\varkappa_0) = \frac{\left(\varepsilon + 1 + \frac{3\alpha Z}{2R}\right) c_\nu - \frac{\alpha Z}{2R^3} c_{\nu-2}}{\nu + 1 + |\varkappa_0| + \varkappa_0} \tag{9}$$

при выполнении условий: $c_{-2} = c_{-1} = d_{-2} = d_{-1} = 0$; $c_0 = \lambda + \frac{1}{2}$, $d_0 = -\lambda + \frac{1}{2}$; $\lambda = \mp \frac{1}{2} \begin{pmatrix} \varkappa_0 < 0 \\ \varkappa_0 > 0 \end{pmatrix}$.

Рекуррентные формулы для $c_\nu(\varkappa)$ и $d_\nu(\varkappa)$ получаются из выражений (8) и (9) путем замены $\varkappa_0$ на $\varkappa$ и $\varepsilon \to E = \varepsilon + k$.

Расчет амплитуд $a_{\varkappa_0}$ и $a_\varkappa$ проведен без учета экранирования, поскольку учет экранирования несущественно изменит численные значения этих величин. В частности, для $Z = 95$ и $E = 1{,}010$ нами получены значения $a_{\varkappa_0} = 4{,}183$ и $a_\varkappa = 2{,}623$, отличающиеся менее чем на 0,1% от соответствующих значений $a_\varkappa$ и $a_{\varkappa_0}$, вычисленных с учетом экранирования [6]. Отметим, что в расчетах нами принималось для R_0 выражение:

$$R_0 = 1{,}2\, A^{1/3} \cdot 10^{-13} \text{ см}, \tag{10}$$

где A — массовое число.

Приведенная вероятность Е0-конверсии в сильной степени зависит от эквивалентного радиуса ядра R_0. Помимо (10) в литературе имеются еще два выражения для R_0 [7, 8]:

$$R'_0(A) = (1{,}123\, A^{1/3} + 2{,}352\, A^{-1/3} - 2{,}070\, A^{-1})\, 10^{-13} \text{ см}, \tag{11}$$

$$R''_0(A, \beta, \gamma^\circ) = l A^{1/3} \left\{1 + \frac{5}{2}\sigma - \frac{21}{8}\sigma^2 + \ldots \frac{5}{8\pi}\beta^2 \left(1 - \frac{13}{2}\sigma + \frac{173}{10}\sigma^2 - \ldots\right) + \frac{25}{168\pi}\sqrt{\frac{5}{\pi}}\, \beta^3 \cos 3\gamma^\circ \left(1 - \frac{73}{10}\sigma + \frac{1057}{50}\sigma^2 - \ldots\right)\right\}, \tag{12}$$

где $l = 1{,}123 \cdot 10^{-13}$ см, $\sigma = \frac{1}{3}\left(\frac{\pi a}{l A^{1/3}}\right)^2$, $a = \frac{s}{4 \ln 3}$, $s = 2{,}49 \cdot 10^{-13}$ см;

β и γ^0 — параметры деформации (несферичности) и неаксиальности, обусловленные наличием у ядра квадрупольного момента. Формулы (11) и (12) совпадают при $\beta = 0$. Связь квадрупольного момента ядра с параметрами деформации и неаксиальности задается формулой [9]:

$$Q_0 = 3\,(5\pi)^{-1/2} Z \left[l A^{1/3} \left(1 + \frac{5}{2}\sigma - \frac{21}{8}\sigma^2 \right) \right]^2 \times \beta \times [\cos\gamma^\circ + $$
$$+ 0{,}36\beta\,(1 - 2\sin^2\gamma^\circ)]. \quad (13)$$

Используя формулу (13), по имеющимся в литературе данным для Q_0 можно найти β.

Радиусы ядер, вычисленные по формулам (11), (12), во многих случаях дают лучшее согласие с экспериментальными данными, чем найденные по формуле (10) (см., например, таблицу).

Ядро	$R_{эксп} \times 10^{-13}$см	$R_0 \cdot 10^{-13}$см	$R_0' \cdot 10^{-13}$см	$R_0'' \cdot 10^{-13}$см
Pb^{208}	7,00	7,1100	7,0408	—
TA^{181}	7,10	6,7880	6,7627	6,8310
Cd^{110}	4,578	5,7497	5,3964	—

В рассматриваемом случае ядра Pu^{242} для перехода $k = 0{,}861$ МэВ использование радиусов R_0' и R_0'' дало заметное расхождение в величине приведенной вероятности ЕО-конверсии: $\Delta = \frac{\Omega''(EO)}{\Omega'(EO)} 100\% = 105{,}45\%$.

Влияние квадрупольного момента ядра на ЕО-конверсию можно исследовать с учетом «сателлитных» состояний, возникающих из-за взаимодействия этого момента с электроном оболочки атома.

Проведенные исследования [10, 11] показали, что «сателлитные» состояния оказывают слабое воздействие на коэффициенты внутренней конверсии (не достигает и 0,1%). Наши расчеты для ЕО-конверсии дают величину менее 0,05%. Влияние же квадрупольного момента ядра на ЕО-конверсию, учтенное через деформацию ядра, оказалось в 100 раз больше, несмотря на то, что учет деформации ядра произведен посредством уточнения эквивалентных размеров ядра.

ЛИТЕРАТУРА

1. Churh E. L., Weneser J.— «Phys. Rev.», 1956, **103**, 1035.
2. Гречухин Д. П.— «ЖЭТФ», 1957, **32**, 1036.
3. Слив Л. А.— «ЖЭТФ», 1947, **17**, 1049.
4. Слив Л. А., Волчок Б. А. Таблицы кулоновских фаз и амплитуд. М.— Л., 1956.
5. Борисоглебский Л. А.— «ЖЭТФ», 1964, **46**, 1664.
6. Банд И. М. и др. Таблицы радиальных функций и фаз электронов. М.— Л., 1959.
7. Элтон Л. Размеры ядер. М., 1962.
8. Борисоглебский Л. А. Препринт ИТФ-74-5. Киев, 1974.
9. Борисоглебский Л. А.— «ЖЭТФ», 1964, **47**, 1575.
10. Matese J. J.— «Phys. Rev.», **173**, 1165, 1968.
11. Борисоглебский Л. А. и др.— «Изв. АН СССР. Сер. физ.», 1974, **38**, 2581.
12. Немец О. Ф., Гофман Ю. В. Справочник по ядерной физике. Киев, 1975.
13. Абрамов А. А. Таблицы $\ln\Gamma(t)$ в комплексной области. М., 1953.
14. Борисоглебский Л. А. и др. Таблицы по внутренней конверсии γ-лучей на высших оболочках атома. Минск, 1972.

Поступила в редакцию
3/III 1978 г.

Кафедра теоретической физики