

ИЗУЧЕНИЕ АНОМАЛИЙ В ПРОЦЕССЕ ВНУТРЕННЕЙ КОНВЕРСИИ γ -ЛУЧЕЙ ^{234}Pa

И. Н. Вишневский, С. С. Драпей, В. А. Желтоножский,
А. Г. Зелинский, Н. В. Стрильчук

Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев

Проведены точные измерения энергии и коэффициента внутренней конверсии на К-оболочке γ -перехода с энергией 112,8 кэВ ^{234}Pa . Получено значение $E_\gamma = 112,790 \pm 0,002$ кэВ и $\alpha_K = 0,220 \pm 0,011$. Экспериментальное значение α_K отличается на (21 - 23) % от теоретических, что трактуется как проявление корреляционных эффектов в процессе внутренней конверсии γ -лучей.

Введение

При фотоэффекте на внутренних оболочках атома во время движения электрона внутри оболочек возникает корреляционное взаимодействие электрона со связанными электронами атома. Это приводит к известным корреляционным эффектам [1]. Они могут быть значительными при малых энергиях вылетающих электронов, что происходит при энергиях фотонов ионизации, близких к энергии связи электрона, т.е. в припороговой области.

Аналогичные явления могут происходить в процессе внутренней конверсии γ -лучей при энергиях ядерных переходов, близких к энергии связи оболочки, из которой вылетает электрон.

Такая ситуация наблюдается в ядре ^{234}Pa . В нем имеется уровень, который разряжается γ -переходом $E_\gamma = 112,8$ кэВ, энергия которого всего на $\approx 0,2$ кэВ больше энергии связи К-электронов $E_K(\text{Pa}) = 112,598$ кэВ. При внутренней конверсии этого перехода на К-оболочке вылетающий электрон будет иметь очень малую кинетическую энергию $\approx 0,2$ кэВ и можно ожидать значительные аномалии в коэффициентах внутренней конверсии (КВК) из-за корреляционных эффектов.

Такие исследования выполнены ранее в работе [2] и была обнаружена значительная роль корреляционных эффектов в ^{187}Re и ^{234}Pa . Однако точность измерения как энергии γ -квантов, так и вероятности процесса внутренней конверсии γ -переходов с энергией 112,8 кэВ на К-оболочке (α_K) ^{234}Pa была недостаточной. В настоящей работе нами с помощью полупроводниковых спектрометров и новых методов обработки спектров, разработанных в последнее время, были проведены измерения как α_K (112,8 кэВ), так и существенно повышена точность измерения энергии этого $E_\gamma = 112,8$ кэВ перехода.

Экспериментальная методика и результаты измерений

При очень малых кинетических энергиях конверсионных электронов измерять абсолютные

значения КВК можно только сравнением интенсивности характеристического излучения (I_{Kx}), сопровождающего конверсию, с интенсивностью γ -излучения I_γ . Для внутренней конверсии на К-оболочке КВК α_K будет определяться по формуле

$$\alpha_K = I_{Kx} / I_\gamma \omega_{Kx}, \tag{1}$$

где ω_{Kx} – выход флуоресценции [4].

Измерения вероятности процесса внутренней конверсии γ -лучей проводились на рентгеновском γ -спектрометре с германиевым детектором, который имел входное бериллиевое окно, объем детектора составлял 1 см^3 и разрешение 400 эВ на γ -линии с энергией $E = 63$ кэВ.

Измерения α_K γ 112,8 кэВ ^{234}Pa проводились с источником из естественного урана, продуктом равновесного распада которого является ^{234}Th (рис. 1). Распад ^{238}U происходит по цепочке $^{238}\text{U} \rightarrow ^{234}\text{Th} \rightarrow ^{234}\text{Pa}$. Характеристическое K_x -излучение ^{234}Pa обусловлено внутренней конверсией γ 112,8 кэВ. В K_x -спектрах протактиния присутствует также компонента K_x -излучения ^{231}Pa , соответствующая цепочке $^{235}\text{U} \rightarrow ^{231}\text{Th} \rightarrow ^{231}\text{Pa}$.

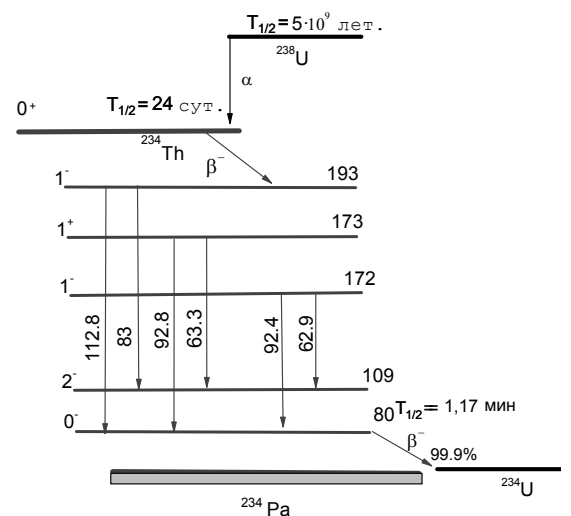


Рис. 1. Схема распада ^{234}Th .

Распад активности мишени из естественного ^{238}U толщиной 100 мг/см^2 измерялся в течение 10 сут. За это время была достигнута статистическая погрешность измерения $K_{\alpha 1}$ -линии протактиний $\leq 1 \%$. Характерные участки K_{α} - и γ -спектров приведены на рис. 2. Активность ^{234}Pa в спектрах идентифицируется по γ_{92} , а ^{231}Pa по γ_{84} кэВ.

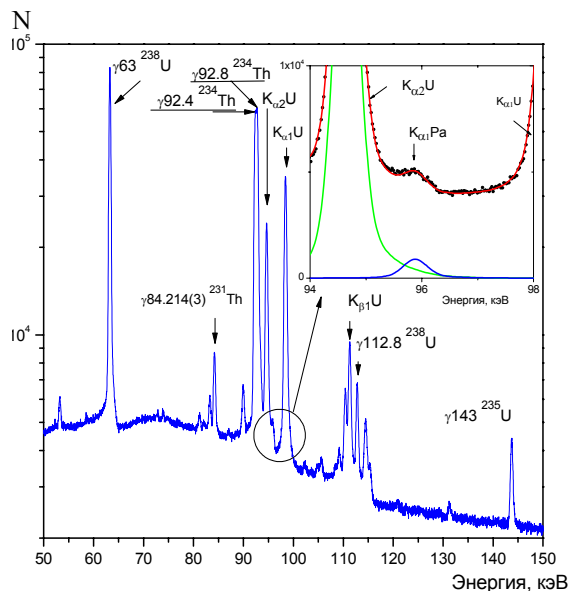


Рис. 2. Фрагмент γ -спектра ^{234}Th , измеренный на Ge-спектрометре.

При определении величины КВК предполагалось, что K_{α} -линия ^{234}Pa связана с внутренней конверсией только для $\gamma_{112,8}$ кэВ. Этот вывод основан на анализе γ -спектров из наших измерений и работ [3, 4]. Весь комплекс этих данных показывает, что все γ -кванты, кроме $\gamma_{112,8}$, имеют энергию меньшую, чем энергия связи К-электронов. Доля K_{α} -излучения, образующаяся при распаде ^{231}Th , учитывается по интенсивности γ_{84} кэВ, которая измерена нами со статистической погрешностью $\leq 1 \%$ (см. рис. 2). Используя данные о соотношении γ_{84} кэВ и K_{α} Pa, взятые из [4], где они измерены с точностью $\sim 7 \%$ и используя внутреннюю калибровку по эффективности, определяем вклад ^{231}Th в K_{α} линии Pa. По нему можно было определить интенсивность K_{α} ^{234}Pa ($I_{K\alpha}$). Используя полученное значение $I_{K\alpha}$ и измеренную интенсивность I_{γ} γ -линии $E_{\gamma} = 112,8$ кэВ, по формуле (1) получили значение КВК $\alpha_K = 0,220(1)$.

При сравнении экспериментальных значений с теоретическими необходимо выбрать какую-то модель расчета КВК. Значение КВК для E1-переходов наиболее сильно зависит от того, выполняется ли учет вакансии, образующейся в оболочке после вылета электрона. Для ^{234}Pa таблич-

ные значения $\alpha_K = 0,277$ без учета вакансии были рассчитаны из таблиц [5]. Учет вакансии приведет к увеличению α_K на 2 %. Таким образом, $\alpha_K^{\text{теор.}}$ завышено по сравнению с $\alpha_K^{\text{эксп.}}$ на

$$P^{\text{эксп.}} = \frac{\alpha_K^{\text{теор.}} - \alpha_K^{\text{эксп.}}}{\alpha_K^{\text{теор.}}} = (21 \pm 4) \%, \text{ если не учитывать}$$

роль вакансий и на $(23 \pm 4) \%$ при ее учете.

При анализе данных о КВК необходимо знать с высокой точностью энергию γ -кванта, поскольку это существенно влияет на выбранное теоретическое значения КВК. Нами были проведены специальные измерения энергии изучаемого перехода на полупроводниковом спектрометре с Si-детектором, который имел энергетическое разрешение 350 эВ на γ_{63} кэВ, и измерена кривая эффективности спектрометра от энергии в области 60 - 120 кэВ. В качестве примера на рис. 3 приведен фрагмент спектра в области $\gamma_{112,8}$ кэВ.

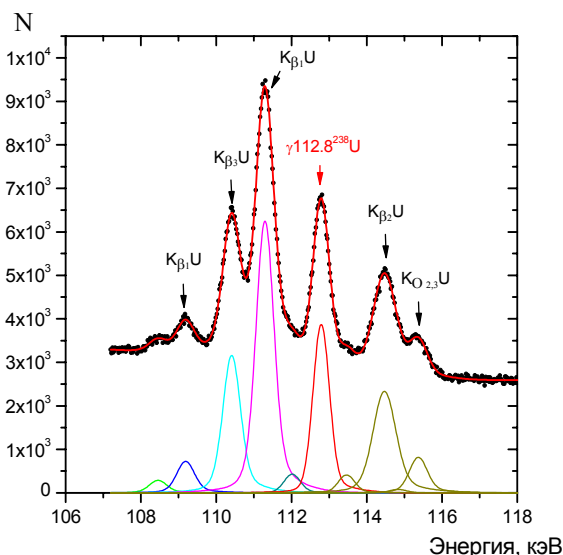


Рис. 3. Участок γ -спектра в области K_{β} -линий урана, измеренный на Si-спектрометре. Внизу показано разложение спектра с учетом вычитенного фона.

При измерениях на полупроводниковых спектрометрах важное значение имеют выбор нормалей, дифференциальная нелинейность спектрометра и способ обработки. Современные способы обработки позволяют определять положение линии с относительной точностью $(0,05 \pm 0,01) \%$. Отсюда следует, что определение энергии $\gamma_{112,8}$ кэВ с точностью $(1 - 2)$ эВ требует того, чтобы одна из γ -нормалей отстояла не дальше, чем на $(2 - 3)$ кэВ. При таких точностях проводить отдельно измерения положения нормалей и исследуемой γ -линии не представляется возможным, так как, несмотря на то что интегральная нелинейность в нашем спектрометре была $\leq 0,1 \%$, исключить методические

была $\leq 0,1$ %, исключить методические ошибки, связанные с каким-то изменением внешних условий, не представлялось возможным. Поэтому в нашем эксперименте проводилась внутренняя энергетическая калибровка по наиболее сильным $K_{\alpha 1}$, $K_{\alpha 2}$ и $K_{\beta 1}$ линиям урана, энергии которых хорошо известны.

Обработка проводилась методом наименьших квадратов. Для этого в качестве табличной линии выбиралась нормаль γ_{63} кэВ и вписывалась в виде свертки лоренциана с функцией отклика Si-детектора в $K_{\alpha}U$, $K_{\alpha}Pa$, $\gamma_{112,8}$ кэВ, $\gamma_{92,4}$ кэВ и $\gamma_{92,8}$ кэВ. При этом учитывалось, что естественная ширина K_{α} -линии составляет 82 эВ (расчет был выполнен без учета ширины L-дырок). С учетом того, что ширина приборной линии 350 эВ, на форме рентгеновских линий начинает сказываться естественная ширина K-дырки. Из-за того, что K_{α} -линии описываются лоренцевским распределением, а приборная – гауссовским, появляются "хвосты" в K_{α} -линиях, измеренных на полупроводниковых спектрометрах.

Разброс значений измеренных энергий всех исследованных γ - и K_{α} -переходов во всех сериях не выходил за пределы 1,4 эВ. Однако нами использовались табличные значения энергий K_{α} -линий урана, а они в разных таблицах различаются на 1 эВ [3, 4]. Кроме того, в качестве основных реперов использовались K_{β} -линии урана, где присутствуют слабые компоненты $K_{\beta}Pa$ (см. рис. 3). Все это приводит к дополнительной погрешности, поэтому точность измерений $\gamma_{112,8}$ ограничена 2 эВ. С учетом всего вышесказанного было получено, что значение энергии $E_{\gamma}(Pa) = 112,790(2)$ кэВ.

Обсуждение результатов

В таблице приведены полученные данные о $\alpha_K^{экс.}$, $\alpha_K^{теор.}$ и другие параметры, характеризующие данный γ -переход.

E_{γ} , кэВ	112,790
$E_{\gamma} - E_{K_{\alpha}}$, эВ	192
Γ , эВ	82
$\alpha_K^{экс.}$	0,220(11)
$\alpha_K^{теор.}$	0,277

Здесь Γ – естественная ширина K-подоболочки (расчет был выполнен без учета естественной ширины L-подоболочки); $\alpha_K^{теор.}$ – табличное значение α_K из [5]; $\alpha_K^{экс.}$ – значение, полученное в данной работе.

Как видно, наблюдается значительное отличие $\alpha_K^{экс.}$ от теоретических значений. Так как

$\alpha_K^{экс.}$ значительно меньше $\alpha_K^{теор.}$, примесь M2-компоненты, как и неучтенных слабых γ -квантов большей энергии, только увеличит расходжение, следовательно, эти факторы можно не анализировать. Роль эффектов проникновения в γ -переходах непосредственно оценить нельзя. Однако из анализа схемы уровней ^{234}Pa , заселяемых при β -распадах ^{234}Th , следует, что γ -переходы с энергией 92,4 и 112,8 кэВ разряжают состояния одинаковой природы на одно и то же низколежащее состояние (см. рис. 1). Данные о КВК 92,4 кэВ показывают, что это E1-переход, в процесс внутренней конверсии которого не дают значительного вклада эффекты проникновения. Поэтому можно сделать предположение, что и в случае $\gamma_{112,8}$ кэВ эффекты проникновения не могут повлиять на изменение величины α_K .

Из результатов нашей работы можно сделать вывод, что отличие α_K от табличных значений обусловлено именно корреляционными эффектами.

Теоретические оценки наблюдаемого явления можно сделать, исходя из того факта, что виртуальные и реальные процессы при малых энергиях электронов описываются одинаково. В [1] эти процессы при фотоионизации обсуждались наиболее полно. Нами сделано предположение, что процесс внутренней конверсии при кинетических энергиях конверсионных электронов < 1 кэВ аналогичен фотоионизации и учет корреляционных эффектов при использовании такого же подхода к процессу внутренней конверсии γ -лучей приводит к появлению дополнительного слагаемого (P) в вероятности внутренней конверсии. Теоретические оценки этого явления были сделаны в [2], где было показано, что дополнительное слагаемое определяется соотношением кинетической энергии конверсионного электрона и естественной ширины линии.

Из наших данных следует, что $P^{теор.}(Pa) = 0,21$, $P^{экс.}(Pa) = 0,23(4)$ с учетом вакансии и $P^{экс.}(Pa) = 0,21(4)$ без учета вакансии на K-оболочке соответственно.

Как видно, в ^{234}Pa согласие между теоретическим и экспериментальным значениями хорошее. Отметим также, что полученные нами как экспериментальные значения, так и теоретические оценки согласуются с расчетами, выполненными в работе [6].

Поэтому из всего изложенного выше можно сделать вывод, что наблюдаемые отклонения экспериментальных КВК от табличных могут трактоваться как проявление корреляционных эффектов в процессе внутренней конверсии γ -лучей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Амусья М.Я.* Фотоэффект. – Л.: Наука, 1987.
2. *Бондарьков М.Д., Желтоножский В.А., Зелинский А.Г. и др.* Исследование корреляционных эффектов в процессе внутренней конверсии γ -лучей // ЖЭТФ. - 1996. - Т.110, вып. 2(8). - С. 443 - 449.
3. *Table of radioactive Isotopes / Ed. by E. Browne et al.* - New York: John Wiley Inc., 1986.
4. *Table of Isotopes / Ed. by R. B. Firestone.* - New York: J. Wiley and Sons, 1996.
5. *Hager R.S., Seltzer E.C.* Internal Conversion Tables. P. I. $30 < Z < 103$ // Nucl. Data Tables. -1968. - Vol. A4. - P. 1 - 135.
6. *Амусья М.Я., Листенгартен М.А., Шапиро С.Г.* // Изв. АН СССР. - Сер. физ. - 1968. - яТ. 32 - С. 1415.

ВИВЧЕННЯ АНОМАЛІЙ У ПРОЦЕСІ ВНУТРІШНЬОЇ КОНВЕРСІЇ γ -ПРОМЕНІВ ^{234}Pa

**І. М. Вишневський, С. С. Драпей, В. О. Желтоножський,
А. Г. Зелінський, М. В. Стрільчук**

Проведено точні вимірювання енергії та коефіцієнта внутрішньої конверсії на К-оболонці γ -переходу з енергією 112,8 кеВ ^{234}Pa . Отримано значення $E_\gamma = 112,790 \pm 0,002$ кеВ і $\alpha_K = 0,220 \pm 0,011$. Експериментальне значення α_K відрізняється на (21 - 23) % від теоретичних, що трактується як прояв кореляційних ефектів у внутрішній конверсії γ -променів.

INVESTIGATION OF INTERNAL CONVERSION ANOMALIES IN ^{234}Pa

I. N. Vishnevsky, S. S. Drapey, V. A. Zheltonozhsky, A. G. Zelinsky, N. V. Strilchuk

In the work presented the energy and K-shell internal conversion coefficient for γ -transition with the energy of 112,8 keV in ^{234}Pa were measured. The following estimates for $E_\gamma = 112,790 \pm 0,002$ keV and $\alpha_K = 0,220 \pm 0,011$ have been obtained. The experimental value α_K differs by (21 - 23) % from the theoretical one and it can be treated as the demonstration of correlation effects in the internal conversion

Поступила в редакцію 04.03.06,
после доработки – 26.04.06.