

Вниманию читателей предлагаем продолжение подборки статей по материалам XI Международного семинара «Точные измерения в ядерной спектроскопии» (начало см. «Измерительная техника», 1997, № 6).

539.1+539.5

Рассеяние электронов в бета-спектрометрических источниках

А. ШПАЛЕК, О. ДРАГОУН, М. РЫШАВЫ, В. БРАБЕЦ,
А. КОВАЛИК (Чешская Республика), А. Ф. НОВГОРОДОВ (Россия)

Дано сравнение экспериментальных спектров конверсионных линий ^{169}Yb с кинетической энергией 3,7 — 18,4 keV и бета-спектра из распада ^{241}Pu с расчетами методом Монте-Карло, учитывающими индивидуальные упругие и неупругие рассеяния электронов в источнике, подложке и загрязнении источника слоем углерода. Получено хорошее согласие теоретического и экспериментального результатов. Показана также зависимость эффектов рассеяния электронов от угла их эмиссии.

Experimental spectra of the ^{169}Yb conversion electron lines with the kinetic energies 3,7—18,4 keV and ^{241}Pu beta spectrum are compared with the Monte-Carlo calculations taking into account individual elastic and inelastic electron scatterings in the source, its backing and in the carbonaceous contamination overlayer. Reasonable agreement between calculated and experimental results is obtained. The dependence of the scattering effect on the electron emission angle is also demonstrated.

Для прецизионного анализа экспериментального спектра электронов из бета-распада важно учитывать не только

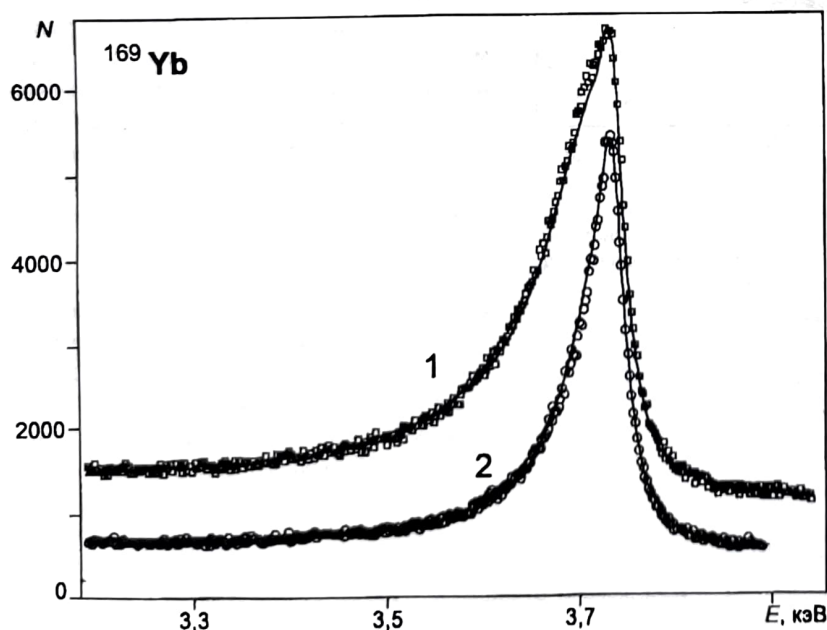


Рис. 1. Экспериментальные (точки) и теоретические (сплошная линия) профили конверсионной линии $K\beta_3$ из распада ^{169}Yb (N — число отсчетов, E — энергия электронов). Длительность экспозиции в одной точке 45 и 70 с соответственно для источников 2 и 1. Приборное разрешение 6,5 эВ, естественная ширина линии $K\beta_3$ равна 30 эВ. Источники:

1 — подложка Al + 1,7 нм ^{241}Pu + 3 нм C; 2 — подложка Al + 3 нм C;

соответствующие ядерные и атомные эффекты, но также функцию отклика спектрометра и влияние рассеяния электронов внутри источника β -лучей. На важность этих эффектов указывает то, что недавно интерпретировались незначительные искажения спектра электронов как проявление примеси 17 кэВ нейтрино. Впоследствии оказалось, что на самом деле эти искажения в основном вызваны рассеянием электронов. Следовательно, при поиске примесей порядка 0,1 % гипотетических массивных нейтрино все упомянутые выше эффекты должны быть тщательно учтены.

Ниже в рамках нашей программы поиска массивных нейтрино в бета-распаде ^{241}Pu , теоретически и экспериментально исследуются эффекты рассеяния электронов на атомах источника. Рассмотрены энергии электронов порядка единиц килоэлектронвольт, где ожидается существенный эффект.

На основе метода Монте-Карло была разработана программа, симулирующая индивидуальные упругие и неупругие соударения электронов с атомами источника. Упругие соударения трактуются при использовании электрон-атомных сечений рассеяния [1]. Для описания неупругих соударений введена функция $F(W)$, описывающая вероятность потерять в отдельном столкновении

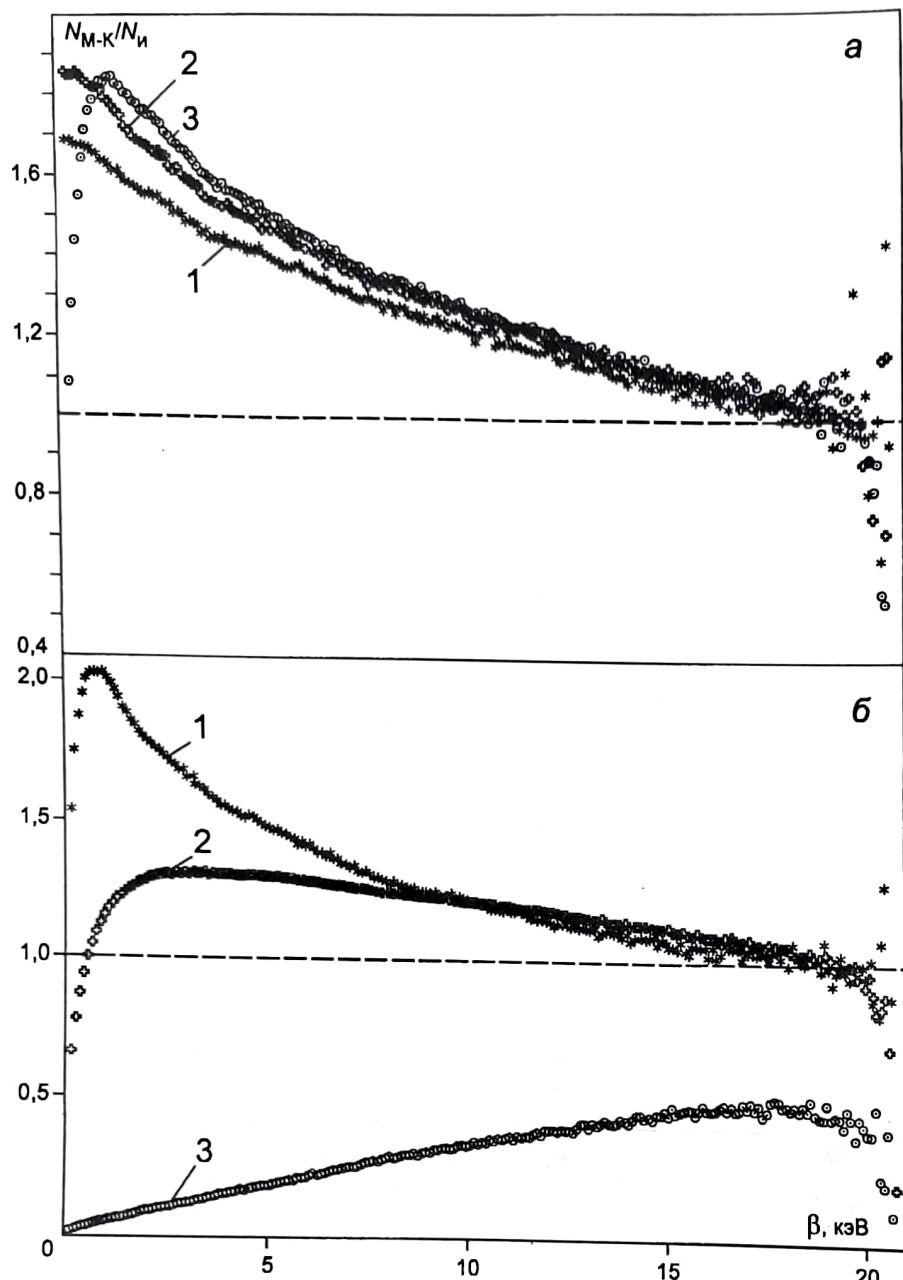


Рис. 2. а — Расчет бета-спектра ^{241}Pu ($Q_\beta = 20,8$ кэВ). Отношение рассчитанного по методу Монте-Карло спектра к идеальному $N_{M-K}/N_{ид}$. Электроны имитируются под углом 40° в отношении нормали к поверхности источника:

1 — подложка Al; 2 — подложка Al + 0,55 нм ^{241}Pu ; 3 — подложка Al + 0,55 нм ^{241}Pu + 3 нм C
 б — Зависимость расчетного бета-спектра из распада ^{241}Pu от угла эмиссии электронов (θ — угол вылета электронов в отношении нормали к поверхности источника):

1 — $0,9 < \cos \theta < 1,0$; 2 — $\cos \theta < 1,0$; 3 — $\cos \theta < 0,1$

энергию W . При низких энергиях (обычно порядка десятка электронвольт) $F(W)$ содержит характеристики рассеивающего элемента вне этой области $F(W) = W^{-2}$. Для сшивки обеих частей функции $F(W)$ используется условие

$$T_{av} = \int F(W) W dW = S \lambda_{in},$$

где T_{av} — средняя потеря энергии при неупругом столкновении; S — тормозная способность; λ_{in} — средний свободный пробег неупругого рассеяния. Учтено также угловое отклоне-

ние при неупругом соударении. Для каждого конкретного случая рассчитано примерно 10^7 траекторий электронов. Детали нашего метода приведены в [3, 4].

Эксперимент состоит из двух частей. В первом эксперименте мы анализировали форму конверсионных линий из распада ^{169}Yb при энергиях 3,7—18,4 кэВ. Источник ^{169}Yb был приготовлен испарением в вакууме на алюминиевую подложку, и электроны внутренней конверсии регистрировались на электростатическом спектрометре ESA-50 в ОИЯИ (г. Дубна). После этого источник был покрыт слоем ^{241}Pu (опять испарением в вакууме), толщина которого примерно равна толщине источников ^{241}Pu , используемых нами для изучения бета-спектра, и конверсионные линии измерили вновь.

При расчете профиля конверсионных линий в обоих случаях предполагали алюминиевую подложку бесконечно толстой и расположение атомов ^{169}Yb на глубине 1,1 нм ниже поверхности алюминия. Учтено также загрязнение источника слоем углерода толщиной 3 нм. На рис. 1 для сравнения приведены экспериментальный и расчетный профили К-конверсионной линии перехода 63 кэВ. Аналогичное согласие получено и для других конверсионных линий при более высоких энергиях.

Во втором эксперименте на электростатическом спектрометре ESA-12 в ИЯФ Ржеж (Чешская Республика) измерили бета-спектр распада ^{241}Pu при энергиях электронов 0,2—9,2 кэВ. Снова используя методику испарения в вакууме, подготовили два источника ^{241}Pu диаметром 8 мм на толстой углеродной и алюминиевой подложках. Посредством гамма-спектроскопии дочернего нуклида (применены HPGe и Si (Li)-детекторы) определили количество плутония в источниках. При помощи той же техники и коллиматора диаметром 1 мм было найдено, что неоднородность распределения ^{241}Pu по радиусу источника не превышает 13%. Отсюда мы смогли оценить среднюю толщину слоя ^{241}Pu на C- и Al-подложках, которая составила соответственно 1,7 и 0,55 нм при условии, что плотность ^{241}Pu равна $19,8 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$. Рассчитанное по методу Монте-Карло проявление различных компонентов источника в форме бета-спектра иллюстрирует рис. 2, а, где изображено отношение рассчитанного спектра к идеально-

му. Для сравнения экспериментальных результатов с теоретическими мы воспользовались отношением интенсивностей двух бета-спектров, измеренных с источниками на углеродной и алюминиевой подложках. В таком отношении значительно уменьшено влияние отклика спектрометра, особен-

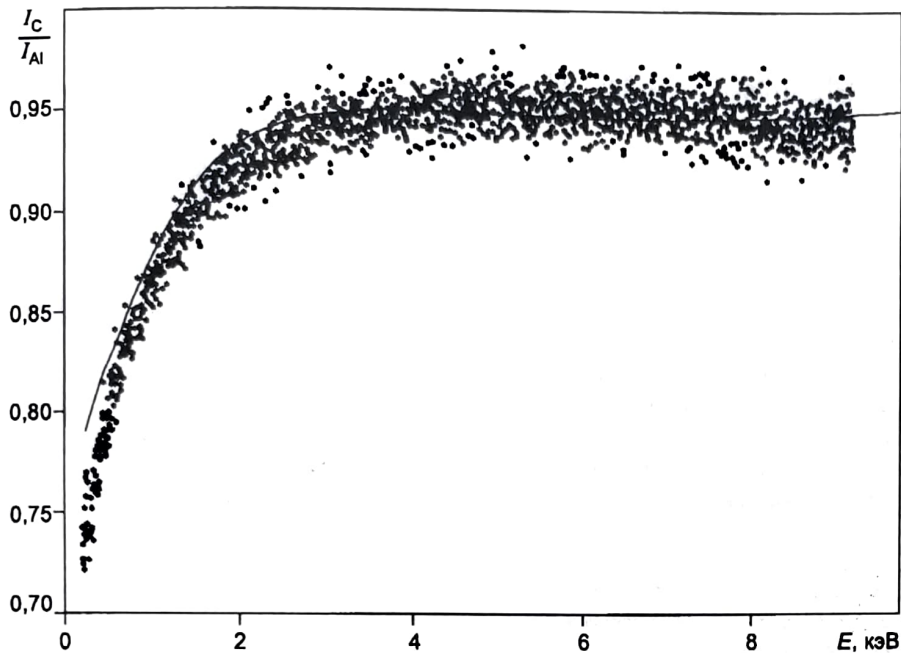


Рис. 3. Отношение интенсивностей / бета-спектров ^{241}Pu с источником на С- и Al-подложках (E — энергия электронов):
 точки — эксперимент; сплошная линия — симуляция зависимости по методу Монте-Карло

но зависимости эффективности детектора от энергии. Сравнение измеренного и рассчитанного отношений показано на рис. 3.

Приведенные результаты оправдывают применение нашего подхода для расчета энергетических потерь электро-

нов в указанной области энергий. Все результаты данной работы соответствуют геометрии примененных спектрометров, где электроны входят в спектрометр под углом около 40° в отношении нормали к поверхности источника. Мы также рассмотрели другие углы входа электронов в спектрометр и обнаружили значительную угловую зависимость, как следует из рис. 2, б. Этот эффект угловой зависимости необходимо принять во внимание в новейших электронных спектрометрах, в которых используется магнитное соленоидное поле, собирающее электроны с большого телесного угла.

Работа была осуществлена при поддержке Грантовой агентства Чешской Республики, контракт № 202/96/0552.

ЛИТЕРАТУРА

1. Riley M. E., Mc Callum C. J., Biggs F.: At Data Nucl. Data Tables. — 1995. — V. 15. — P. 443.
2. Wehenkel C., Gauthe B. // Optics Communications. — 1974. — V. 11. — P. 64; Bakulin E. A. e. a. // Solid State Physics. — 1974. — V. 16. — P. 2568.
3. Muller S. e. a. // Z. Naturforsch. — 1994. — V. 49 a. — P. 874.
4. Spalek A., Dragoun O. // J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. — 1993. — V. 19. — P. 2071.