

## АТОМНАЯ И ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

УДК 539.164

ТОРМОЗНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ПРИ АЛЬФА-РАСПАДЕ ЯДРА  $^{210}\text{Po}$ 

Н. В. Еремин, С. В. Климов, Д. А. Смирнов, А. Ф. Туинов

(НИИЯФ)

Измерен энергетический спектр тормозного излучения, сопровождающего  $\alpha$ -распад ядра  $^{210}\text{Po}$ . Вероятность выхода тормозных фотонов монотонно падает по мере увеличения их энергии. Проведено сопоставление полученных данных с результатами численного расчета в рамках классической теории тормозного излучения и квантовомеханического расчета с учетом подбарьерной области движения  $\alpha$ -частицы.

В последние годы было предпринято несколько попыток исследовать природу тормозного излучения (ТИ), сопровождающего  $\alpha$ -распад тяжелых ядер. В теоретической работе [1] на примере  $\alpha$ -распада ядра  $^{210}\text{Po}$  впервые была показана возможность испускания тормозных фотонов с энергиями вплоть до нескольких сотен кэВ. В работе [2] нами был измерен выход ТИ с энергиями  $E_\gamma$  до 400 кэВ, сопровождающего  $\alpha$ -распад изотопов  $^{214}\text{Po}$  и  $^{226}\text{Ra}$ . В работах [3, 4] опубликованы экспериментальные результаты по вероятности выхода ТИ для случая  $\alpha$ -распада  $^{244}\text{Sm}$  и  $^{210}\text{Po}$ . В энергетическом спектре тормозных фотонов, испускаемых при  $\alpha$ -распаде  $^{210}\text{Po}$ , при энергии  $E_\gamma \sim 400$  кэВ присутствовал минимум интенсивности. Природа этого минимума, по мнению авторов [3, 4], связана с интерференционными эффектами в амплитуде вероятности испускания ТИ при движении  $\alpha$ -частицы под барьером и вне его. Однако точность экспериментальных данных не позволяла использовать их для детального сопоставления с результатами теоретических расчетов [5–9].

В настоящей работе измерен энергетический спектр ТИ, испускаемого при  $\alpha$ -распаде  $^{210}\text{Po}$ , с энергией до  $\sim 800$  кэВ с более высокой точностью.

В качестве  $\alpha$ -источника был выбран изотоп  $^{226}\text{Ra}$ , содержащий в цепочке распада пять групп  $\alpha$ -частиц, испускаемых при распаде следующих изотопов:  $^{210,214,218}\text{Po}$ ,  $^{222}\text{Rn}$  и  $^{226}\text{Ra}$ . Активность источника была равна  $\sim 3,5$  кБк для  $^{210}\text{Po}$  и  $\sim 10$  кБк для остальных изотопов. Регистрация  $\alpha$ -частиц проводилась с помощью кремниевого поверхностно-барьерного детектора с разрешением  $\sim 20$  кэВ при энергии  $\alpha$ -частиц  $E_\alpha \sim 5,3$  МэВ. Детектор имел диаметр  $\sim 0,8$  см и устанавливался на расстоянии  $\sim 1$  см от источника. Тормозные фотоны и  $\gamma$ -кванты регистрировались NaI(Tl)-сцинтилляционным детектором диаметром  $\sim 3$  см и толщиной  $\sim 3$  см. Расстояние от  $\gamma$ -детектора до источника было равно  $\sim 1,6$  см. Углы между детекторами и нормалью к поверхности источника были выбраны равными  $45^\circ$ , так что общий угол между  $\alpha$ - и  $\gamma$ -детекторами составлял  $90^\circ$ .

Для учета пространственной протяженности детекторов мы использовали экспериментальную функцию угловых  $(\alpha-\gamma)$ -корреляций  $W(\theta, E_\gamma)$ , которая

в случае испускания ТИ  $E_1$ -мультипольности может быть записана в виде [3]

$$W(\theta, E_\gamma) = 1 + a_2 Q_2(E_\gamma) P_2(\cos \theta). \quad (1)$$

Здесь  $a_2 = -1$ ;  $P_2(\cos \theta)$  — полином Лежандра второй степени;  $Q_2(E_\gamma) = Q_2^\alpha \cdot Q_2^\gamma(E_\gamma)$  — геометрический коэффициент ослабления  $(\alpha-\gamma)$ -корреляций второго порядка вследствие пространственной протяженности  $\alpha$ - и  $\gamma$ -детекторов, где  $Q_2^\alpha$ ,  $Q_2^\gamma(E_\gamma)$  — коэффициенты для  $\alpha$ - и  $\gamma$ -детекторов соответственно.

Расчет указанных коэффициентов ослабления  $(\alpha-\gamma)$ -корреляций [10], проведенный с учетом реальной геометрии эксперимента, дал следующие значения:  $Q_2^\alpha = 0,90$ ,  $Q_2^\gamma = 0,66$  и  $0,76$  при энергии  $E_\gamma = 100$  и  $800$  кэВ соответственно.

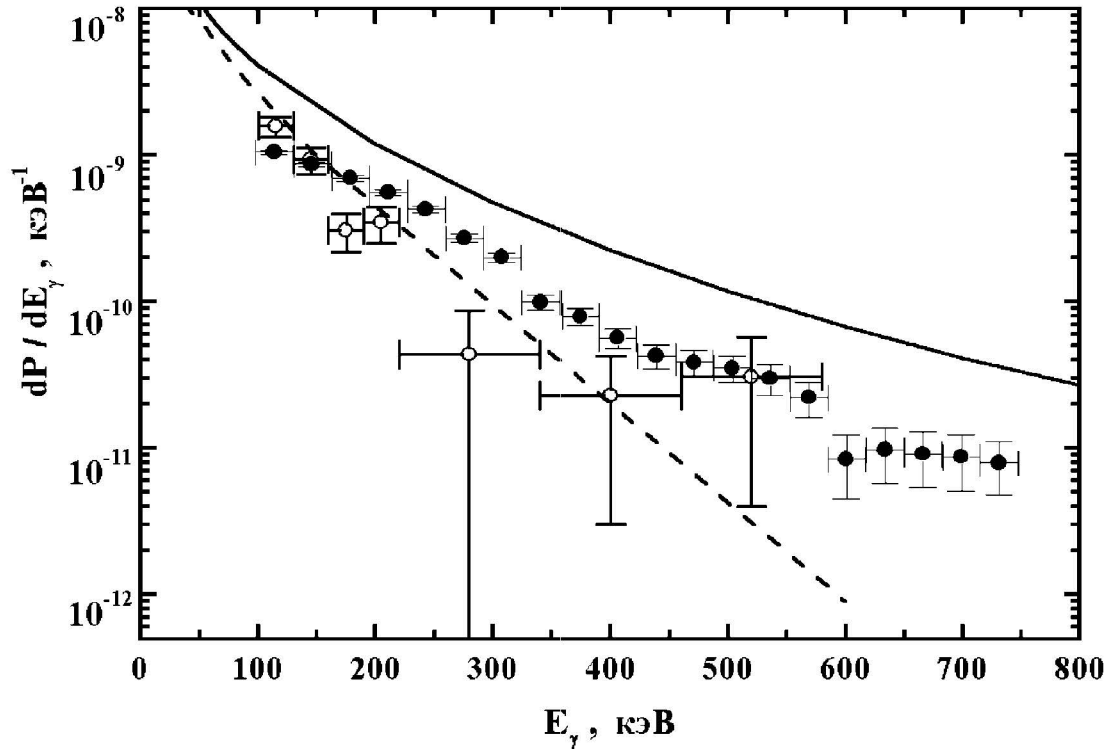
Абсолютные значения эффективности NaI(Tl)-детектора для фотонов с энергией от 60 кэВ до 1 МэВ определялись путем измерения интенсивности линий стандартных  $\gamma$ -источников —  $^{241}\text{Am}$  ( $E_\gamma = 59,6$  кэВ),  $^{57}\text{Co}$  (122 и 136 кэВ),  $^{226}\text{Ra}$  (186, 295, 352 и 609,4 кэВ),  $^{137}\text{Cs}$  (662 кэВ) и  $^{60}\text{Co}$  (1,17 и 1,33 МэВ).

В эксперименте применялась методика быстро-медленных совпадений с временным разрешением  $\sim 10$  нс. Измерение  $(\alpha-\gamma)$ -совпадений для всех пяти  $\alpha$ -групп проводилось в течение  $\sim 1500$  ч, и общее число совпадений было равно  $\sim 4,4 \cdot 10^6$ . Анализ распределения совпадательных событий на плоскости  $(E_\alpha, E_\gamma)$  в окрестности линии, соответствующей закону сохранения энергии  $E_\alpha + E_\gamma = \text{const}$ , позволил определить вероятность выхода тормозных фотонов, энергия которых достигала энергии первого возбужденного уровня дочернего ядра  $^{206}\text{Pb}$  (803 кэВ).

Вероятность испускания ТИ с энергией  $E_\gamma$  может быть записана следующим образом:

$$\frac{dP}{dE_\gamma} = \frac{N_{\alpha-\gamma}(\theta, E_\gamma)}{N_\alpha \Delta E_\gamma \varepsilon(E_\gamma) W(\theta, E_\gamma)},$$

где  $N_{\alpha-\gamma}(\theta, E_\gamma)$  — число  $(\alpha-\gamma)$ -совпадений (при энергии тормозного фотона в интервале  $(E_\gamma - \Delta E_\gamma/2; E_\gamma + \Delta E_\gamma/2)$ );  $N_\alpha$  — полное число  $\alpha$ -частиц, зарегистрированных в  $\alpha$ -детекторе;  $\varepsilon(E_\gamma)$  —



Зависимость вероятности испускания тормозного излучения  $dP/dE_\gamma$  при  $\alpha$ -распаде ядра  $^{210}\text{Po}$  от энергии тормозного фотона  $E_\gamma$ : экспериментальные данные работы [3] (○) и настоящей работы (●); результаты расчета в рамках классической теории тормозного излучения (сплошная линия) и результаты квантовомеханического расчета [7] (штриховая линия)

приведенная эффективность NaI(Tl)-детектора; функция  $W(\theta, E_\gamma)$  определена выражением (1).

Подробно методика нашего эксперимента по регистрации ТИ при  $\alpha$ -распаде тяжелых ядер описана в работе [11].

Измеренные значения вероятности выхода тормозных фотонов  $dP/dE_\gamma$  вместе с данными [3] приведены на рисунке.

Численный расчет вероятности выхода тормозных фотонов проводился в рамках классической теории ТИ, испускаемого при движении  $\alpha$ -частиц по кулоновским траекториям [2, 11]. Результаты расчета показаны на рисунке вместе с результатами квантовомеханического расчета из работы [7], в котором учитывался вклад ТИ, испускаемого при туннелировании  $\alpha$ -частицы через кулоновский барьер ядра, в полную вероятность выхода тормозных фотонов.

Полученные нами экспериментальные значения вероятности испускания ТИ показывают, что локальный минимум в вероятности выхода тормозных фотонов при  $E_\gamma \sim 400$  кэВ отсутствует. Результаты эксперимента, так же как и данные [3], лежат ниже значений, рассчитанных с использованием классической кулоновской модели. По нашему мнению, это указывает на заметный деструктивный вклад подбарьерной области движения  $\alpha$ -частицы в полную вероятность испускания тормозных фотонов. При энергиях ТИ  $E_\gamma > 500$  кэВ имеется расхождение экспериментальных данных с результатами квантовомеханического расчета [7]. Это может быть связано с ограниченностью применения первого порядка те-

рии возмущений и одночастичной модели  $\alpha$ -распада, а также с предположением о сферической форме распадающегося ядра [12] при описании испускания ТИ, сопровождающего  $\alpha$ -распад тяжелых ядер.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты 98-02-16529 и 98-02-16070).

#### Литература

1. Баткин И.С., Копытин Т.А., Чуракова Т.А. // Ядерная физика. 1986. **44**, № 6(12). С. 946.
2. D'Arrigo A., Giardina G., Eremín N.V. et al. // Phys. Lett. 1994. **B332**. P. 25.
3. Kasagi J., Yamazaki H., Kasajima N. et al. // Phys. Rev. Lett. 1997. **79**, No. 3. P. 371.
4. Kasagi J., Yamazaki H., Kasajima N. et al. // J. Phys. G. 1997. **23**. P. 1451.
5. Papenbrock T., Bertsch G.F. // Phys. Rev. Lett. 1998. **80**, No. 19. P. 4141.
6. Takigawa N., Nozawa Y., Hagino K. et al. // Phys. Rev. 1999. **C59**, No. 2. P. 593.
7. Tkalya E.V. // Phys. Rev. 1999. **C60**, No. 4. P. 446.
8. Dyakonov M.I. // Phys. Rev. 1999. **C60**, No. 3. P. 037602.
9. Bertulani C.A., de Paula D.T., Zelevinsky V.G. // Phys. Rev. 1999. **C60**, No. 3. P. 031602.
10. Фергюсон А. Методы угловых корреляций в гамма-спектроскопии. М.: Атомиздат, 1969. Гл. 2, 3.
11. Еремін Н.В., Климов С.В., Смирнов Д.А., Тулинов А.Ф. Препринт НИИЯФ МГУ. 2000. № 2000-17/621.
12. Престон М. Физика ядра. М.: Мир, 1964. Гл. 14.

Поступила в редакцию  
17.05.00