

ИЗМЕРЕНИЕ ПРОДУКТОВ ФОТОДЕЛЕНИЯ ²³²Th

О. А. Бесшейко ¹, В. А. Желтоножский, И. Н. Каденко ¹, А. А. Левченко,
И. Б. Михницкий ¹, Л. В. Садовников, Н. В. Стрильчук

¹ Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко

Проведены измерения относительных выходов активностей фрагментов фотоделения ²³²Th γ-квантами с граничной энергией 22 МэВ. В результате проведенных экспериментов в спектрах надежно выявлены активности изомерных пар ^{117m,g}In, ^{135m,g}Xe и подпитывающих их радионуклидов. Проведенные исследования впервые позволили измерить величины σ_m/σ_g для этих фрагментов, которые оказались равными для ¹¹⁷In $\sigma_m/\sigma_g = 1,3 \pm 0,4$ и для ¹³⁵Xe $\sigma_m/\sigma_g = 0,66 \pm 0,09$. Определены средние угловые моменты для ¹¹⁷In и ¹³⁵Xe, равные $\bar{J} = 7,5$ и $4,5$ соответственно.

1. Введение

Эксперименты по изучению активностей первичных фрагментов деления являются важным источником информации при исследовании свойств нейтроноизбыточных ядер и изучении динамики ядерного деления [1 - 8]. Данные об изомерных отношениях (σ_m/σ_g), где σ_m – сечение образования высокоспиновых долгоживущих состояний, а σ_g – низкоспиновых, в ядрах продуктов деления содержат информацию о распределении углового момента в фрагментах деления, а следовательно, об изменении свойств делящихся ядер при переходе от седловой точки к точке разрыва. А именно такая информация позволяет выбрать наиболее адекватные модели, описывающие симметричный и асимметричный каналы деления.

Целью данной работы было определение средних угловых моментов (\bar{J}) осколков, образованных в результате деления ²³²Th тормозными γ-квантами с граничной энергией 22 МэВ, с использованием метода изомерных отношений.

2. Методика и обработка эксперимента

Облучение мишеней ²³²Th проводилось на линейном ускорителе с энергией электронов 22 МэВ. Тормозной спектр γ-лучей формировался на подложках из золота. Измерение γ-спектров проводилось непосредственно после облучения. Использовались германиевые детекторы объемом 250 см³ с разрешением 2,0 кэВ на γ-линиях ⁶⁰Co. Сохранение спектров в памяти компьютера производилось через интервалы времени, равные периодам полураспада изучаемых изотопов (3 × 15'; 2 × 30'; 6 × 1h). Характерный γ-спектр продуктов распада приведен на рис. 1. Данный спектр был получен при облучении мишени тория в течение 20 и 30 мин выдержки, для того чтобы избавиться от активностей с периодом полураспада меньше 5 мин.

Экспериментальные значения изомерных отношений вычислялись с учетом вклада от β-распада изобарных ядер в выходы исследуемых изотопов. Например, для цепочки ^{117m,g}Cd → ^{117m,g}In (рис. 2) система дифференциальных уравнений распада имеет вид

$$\partial N_{g1}/\partial t = KF(t)\sigma_{g1} - \lambda_{g1}N_{g1} + p_{m1g1}\lambda_{m1}N_{m1} + p_{m2g1}\lambda_{m2}N_{m2}; \tag{1}$$

$$\partial N_{m1}/\partial t = KF(t)\sigma_{g1} - \lambda_{m1}N_{m1} + p_{g2m1}\lambda_{g2}N_{g2}; \tag{2}$$

$$\partial N_{g2}/\partial t = KF(t)\sigma_{g2} - \lambda_{g2}N_{g2}; \tag{3}$$

$$\partial N_{m2}/\partial t = KF(t)\sigma_{m2} - \lambda_{m2}N_{m2}, \tag{4}$$

где K – количество ядер делящегося вещества; $F(t)$ – поток налетающих частиц; $N_{g1}, N_{m1}, N_{g2}, N_{m2}$ – активности, $\lambda_{g1}, \lambda_{m1}, \lambda_{g2}, \lambda_{m2}$ – постоянные распада; $\sigma_{g1}, \sigma_{m1}, \sigma_{g2}, \sigma_{m2}$ – сечения заселения основных и изомерных состояний ^{117}In и ^{117}Cd соответственно; p_{m1g1} – доля распада изомерного состояния ^{117m}In в основное ^{117g}In ; p_{g2m1} – доля распада основного состояния ^{117g}Cd в изомер ^{117m}In ; p_{m2g1} – доля распада изомерного состояния ^{117m}Cd в основное ^{117g}In .

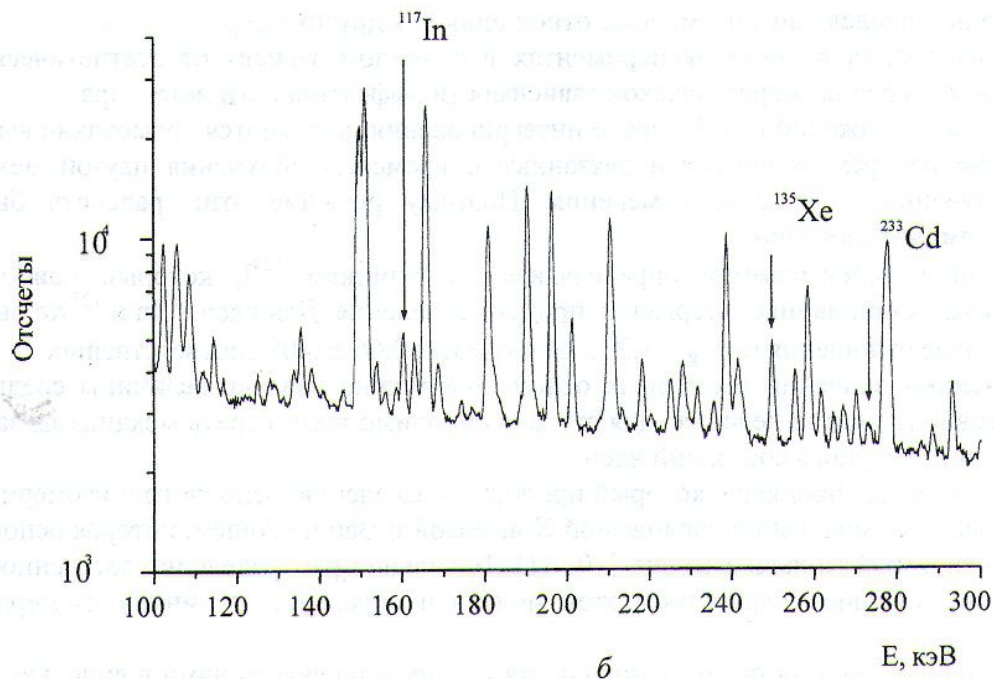
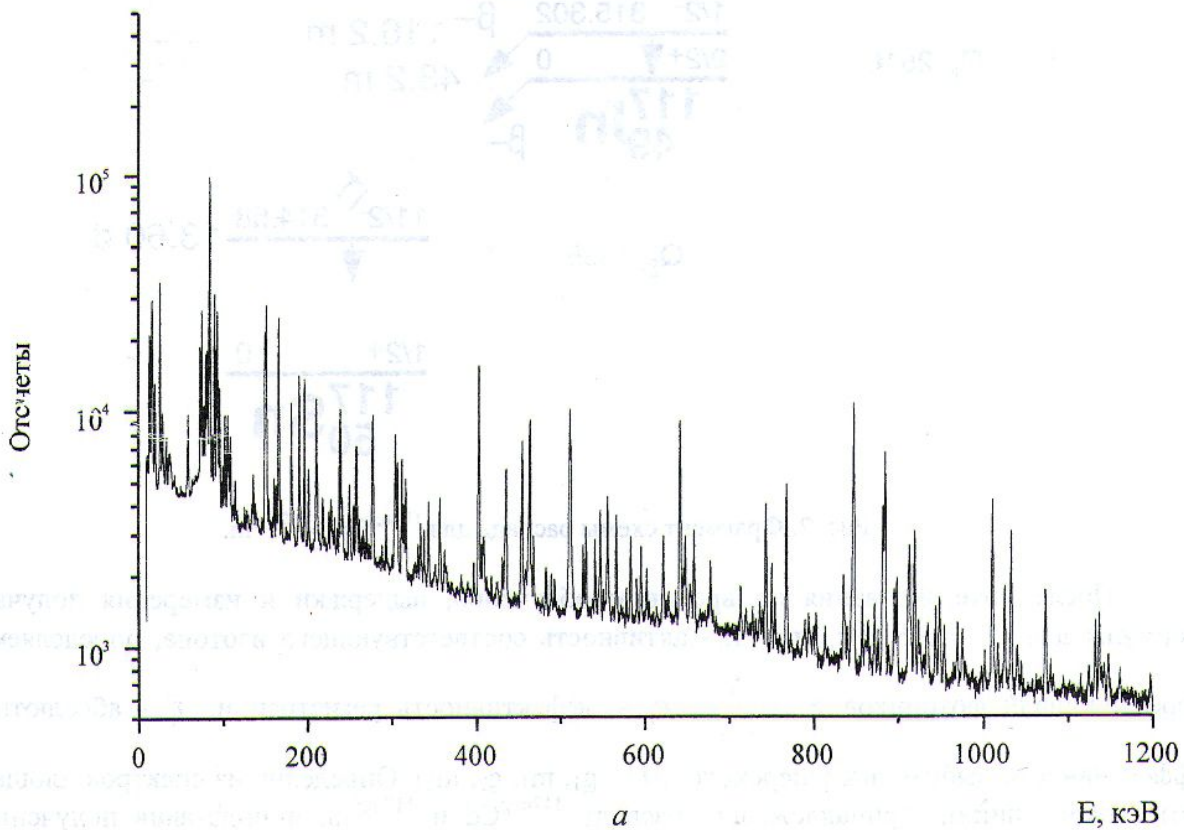


Рис. 1. Спектр γ -излучений продуктов распада ^{232}Th . Время измерения – 7 час:
 а – весь спектр; б – фрагмент спектра от 100 до 300 кэВ.

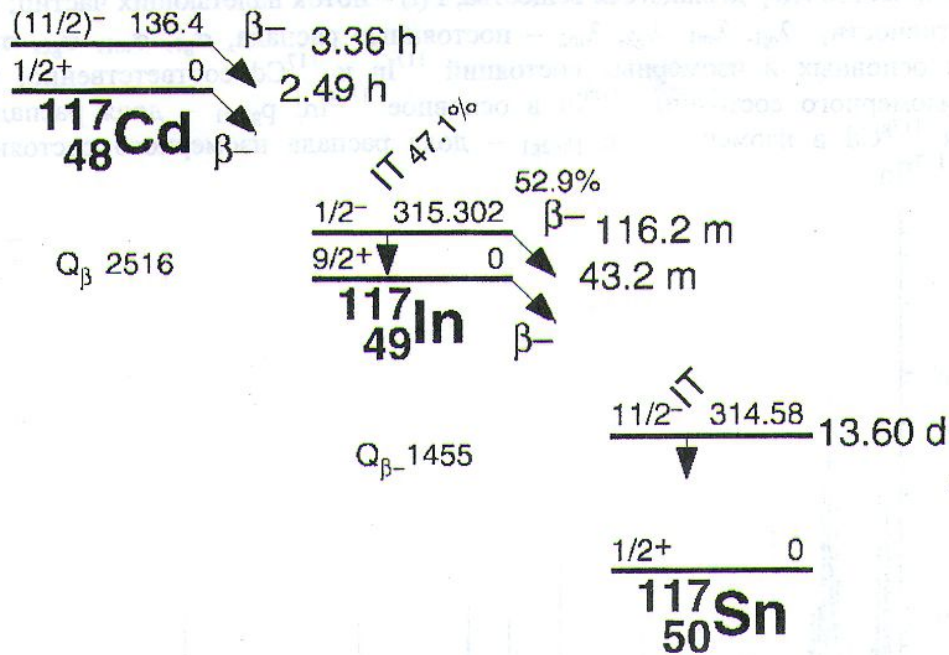


Рис. 2. Фрагмент схемы распада для $^{117m,g}\text{Cd} \rightarrow ^{117m,g}\text{In}$.

После интегрирования по временам облучения, выдержки и измерения получаем формулы для $A_i = KF(t)\sigma_i$, где A_i - активность соответствующего изотопа, определяемая через площади фотопиков $S_i = \frac{N_i}{e_i f_i}$ (e_i - эффективность регистрации, f_i - абсолютные эффективности выбранных γ -переходов, $i = g_1, m_1, g_2, m_2$). Определив из спектров площади фотопиков γ -линий, принадлежащих распаду $^{117m,g}\text{Cd}$ и $^{117m,g}\text{In}$, и подставив полученные значения в выражения для A_i , легко вычислить значения изомерных отношений (σ_m/σ_g) для $^{117m,g}\text{In}$. Аналогично определялись изомерные отношения для других ядер.

Ошибки измерения в таких экспериментах в основном зависят от статистических ошибок и ошибок измерения энергетической зависимости эффективности детектора.

Как видно из выражений (1 - 4), после интегрирования получают громоздкие выражения, состоящие из трёх экспонент и связанные с временем облучения паузой между окончанием облучения и началом измерения. Поэтому решение этих равенств было выполнено программным способом.

Эффективность спектрометра определялась по γ -линиям ^{134}I , который наиболее сильно образовывался при данных энергиях в продуктах деления. Для ядер ^{117}In и ^{135}Xe были получены изомерные отношения $\sigma_m/\sigma_g = 1,3 \pm 0,4$ и $\sigma_m/\sigma_g = 0,66 \pm 0,09$ соответственно.

Из полученных значений изомерных отношений можно извлечь величины средних угловых моментов фрагментов деления. Для этого необходимо рассмотреть механизмы заселения основного и изомерного состояний ядер.

Процесс девозбуждения ядра, который приводит к заселению основного и изомерного состояний, описывается моделью, предложенной Хоизенгой и Ванденбошем, которая основывается на статистической модели распада [10, 11]. Начальное распределение заселенности состояний является входным параметром этой модели и определяет величину изомерных отношений.

Распределение вероятности заселения состояний представлялось нами в виде, как и в [8]

$$P(E^*, J, \pi) = 2\rho(E^*, J, \pi)\exp(-\beta E^* - \lambda J),$$

где ρ - плотность уровней; E^* и J - энергия возбуждения и угловой момент ядра в единицах \hbar , β и λ -параметров. Для расчета распределения вероятностей эмиссии нейтронов и γ -распада фрагментов, приводящих к заселению основного или изомерного состояний ядра-продукта, использовалась программа STAPRE [12]. Для вычисления изомерных отношений брались рассчитанные средние значения числа испущенных нейтронов для каждого значения массового числа фрагмента, взятые из [13]. Параметры β и λ выбирались таким образом, чтобы воспроизвести экспериментальные значения изомерного отношения. Средние угловые моменты фрагментов деления связаны с распределением вероятности заселения состояний соотношением

$$\bar{J} = \frac{\sum_J JP(J)}{\sum_J P(J)}. \quad (6)$$

Зная параметры вероятности заселения состояний, которые были фиксированы при расчете величины изомерного отношения, и используя (6), были определены \bar{J} . Величины \bar{J} , извлеченные из экспериментальных значений изомерных отношений для ¹¹⁷In и ¹³⁵Xe, оказались равными 7,5 и 4,5 соответственно. Величины \bar{J} определены с точностью $\pm (0,5 \div 1)\hbar$.

3. Выводы

Относительный выход фрагментов деления в (γ , f)-реакции существенно отличается от данных из реакции деления с частицами. На рис. 3 [7] приведены фрагменты спектров деления из (γ , f) и (d, f)-реакции с близкими энергиями возбуждения составных ядер. Из этих данных видно, что практически не заселяются фрагменты деления с $A = 132$ в (γ , f)-реакции и примерно одинаково заселяются фрагменты деления с $A = 134$. Наиболее вероятно это связано с тем, что при энергии 22 МэВ значительным является вклад канала ((γ , n), f), т. е. деление при более низких энергиях возбуждения составного ядра.

Средние угловые моменты для (γ , f)-реакции также занижены по сравнению с (d, f)-реакцией. Для ядер ¹¹⁷In и ¹³⁵Xe они равны $\bar{J} = 7,5$ и $4,5$ в (γ , f)-реакции и $9,1$ и $4,7$ в (d, f)-реакции соответственно [9, 16].

Одной из возможных причин этого может быть то, что в (γ , n)-реакции вылетают нейтроны с большим моментом. Это приводит к обеднению высокоспиновых состояний в составном ядре, а соответственно, и к уменьшению средних угловых моментов в осколках деления.

Теоретические расчеты средних угловых моментов при энергии составного ядра около 20 МэВ дают величины \bar{J} от 6,0 до 7,0 для ядер In и меняются от 4,0 до 5,2 для ядер ¹³⁵Xe при изменении ϕ от 0,25 до 0,27, где ϕ - функция, которая определяет часть энергии деления, переходящую в тепловую и кинетическую энергию относительного движения осколков в точке разрыва [14, 15].

Как видно, согласование достаточно хорошее. Оно даже лучше, чем в (d, f)-реакции для ¹¹⁷In, где $J_{\text{exp}}^- \sim 9,1$ $J_{\text{теор}}^- \sim 7,3$. Однако для понимания деталей механизма фотоделения необходимо продолжить изучение этого канала деления в зависимости от энергии γ -квантов и распространить этот метод на другие изомерные пары, в частности для периода полураспада < 5 мин.

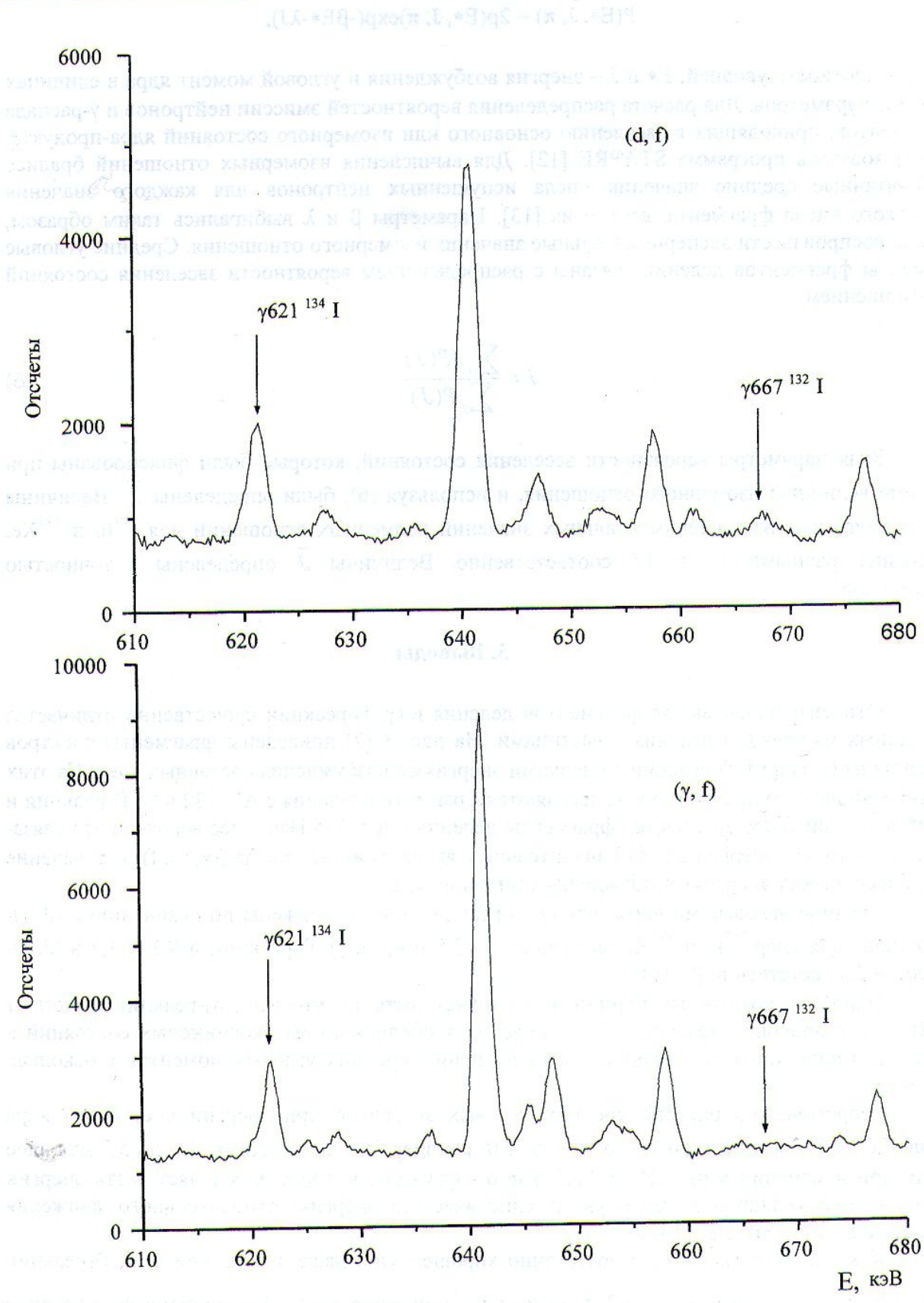


Рис. 3. Участки спектров γ -излучения ^{232}Th , облученных дейтронами и γ -квантами соответственно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nix J.R., Swiatecki W.J. // Nucl. Phys. - 1965. - Vol. 71. - P. 1.
2. Ahmad I., Phillips W.R. // Rep. Prog. Phys. - 1995. - Vol. 58. - P. 1415.
3. Datta T., Dange S.P., Prakash S.K., Ramaniah M.V. // Z. Phys. A. - 1986. - Vol. 324. - P. 81.
4. The nuclear fission process / Ed. C. Wagemans. - Boca Raton, FL (United States): CRC Press, Inc., 1991. - P. 475.
5. Wilhelmy J.B., Cheifetz E., Jared R.C. et al. // Phys. Rev. C. - 1972. - Vol. 5. - P. 2041.
6. Тер-Акопян Г.М., Оганесян Ю.Ц., Попеко Г.С. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. - 1997. - Т. 61. - С. 185.
7. Вишневецкий И.Н., Желтоножский В.А., Реиштько С.В. // Изв. РАН. Сер. физ. - 1997. - Т. 61. - С. 102.
8. Ford G.P., Wolfsberg K., Erdal B.R. // Phys. Rev. C. - 1984. Vol. 30. - P. 195.
9. Table of Isotopes / Ed. M. Lederer. - N.Y.: J. Wiley and Sons, 1978.
10. Huizenga J.R., Vandenbosh R. // Phys. Rev. - 1960. - Vol. 120. - P. 1305.
11. Vandenbosh R., Huizenga J.R. // Phys. Rev. - 1960. - Vol. 120. - P. 1313.
12. Avrigeanu M., Ivascu M., Avrigeanu V. // Preprint N NP-63-1987, 1988, Rev. 1.
13. Brosa U., Grossman S., Muller A. // Phys. Rep. - 1990. - Vol. 197. - P. 169.
14. Tsang C.F. // Phys. Scripta. - 1974. - Vol. 10A. - P. 90.
15. Blocki J. et al. // Ann. Phys. - 1977. - Vol. 105. - P. 427.
16. Денисов В.Ю., Реиштько С.В. // Ядерная физика. - 1996. - Т. 59. - С. 78.

ВИМІРЮВАННЯ ПРОДУКТІВ ФОТОПОДІЛУ ²³²Th

О. А. Безшийко, В. О. Желтоножський, І. М. Каденко, О. А. Левченко,
І. Б. Михницький, Л. В. Садовников, М. В. Стрильчук

Проведено вимірювання відносних виходів активностей фрагментів фотоподілу ²³²Th із граничною енергією 22 МеВ. У результаті виконаних експериментів у спектрах надійно виявлено активності ізомерних пар ^{117m,g}In, ^{135m,g}Xe та живлячих їх радіонуклідів. Ці дослідження вперше дозволили виміряти величини σ_m/σ_g для цих фрагментів, які виявилися рівними для ¹¹⁷In $\sigma_m/\sigma_g = 1,3 \pm 0,4$ ¹³⁵Xe $\sigma_m/\sigma_g = 0,66 \pm 0,09$. Визначено середні кутові моменти для ¹¹⁷In і ¹³⁵Xe, рівні $\bar{J} = 7,5$ і $4,5$ відповідно.

MEASUREMENTS OF FOTOFISSION PRODUCTS OF ²³²Th

O. A. Bessheyko, V. A. Zheltonozhskiy, I. N. Kadenko, A. A. Levchenko,
I. B. Mihnitzkiy, L. V. Sadovnikov, N. V. Strilchuk

Our research group fulfilled measurements of relative output fragments activities of ²³²Th fotofission by γ -quanta with boundary energies 22 MeV. As the results of experiments, in spectra activities of isomeric pairs ^{117m,g}In, ^{135m,g}Xe and feeding radionuclide were discovered. At first these researches allow to measure quantities of σ_m/σ_g for these fragments, which were founded equal for ¹¹⁷In $\sigma_m/\sigma_g = 1,3 \pm 0,4$ and for ¹³⁵Xe $\sigma_m/\sigma_g = 0,66 \pm 0,09$. We define quantities of medium angular moments for ¹¹⁷In $\bar{J} = 7,5$ and for ¹³⁵Xe $\bar{J} = 4,5$.

Поступила в редакцію 13.02.01