

## ИЗМЕРЕНИЕ ВЫХОДА ЗАПАЗДЫВАЮЩИХ ФОТОНОВ ИЗ РЕАКЦИИ ФОТОДЕЛЕНИЯ КАК МЕТОД ИДЕНТИФИКАЦИИ ДЕЛЯЩИХСЯ МАТЕРИАЛОВ

*С. В. Зуев, Е. С. Конобеевский \*, М. В. Мордовской,  
В. Г. Недорезов, В. Н. Пономарев, Г. В. Солoduхов*

Институт ядерных исследований РАН, Москва

Представлены результаты измерения выхода реакции фотоделения для ядер-актиноидов в околопороговой области энергии. На ускорителе ЛУЭ-8-5 ИЯИ РАН получены энергетические и временные спектры запаздывающих гамма-квантов при облучении делящихся изотопов тормозными фотонами. Сделан вывод о возможности идентификации делящихся изотопов по поведению сечения фотоделения в околопороговой области.

The results of measuring the photofission reaction yield in the near-threshold energy region are presented. At the LUE-8-5 accelerator of the Institute for Nuclear Research the energy and time spectra of the delayed photons were obtained by irradiating fissile isotopes by bremsstrahlung photons. The conclusion is made about the possibility of identifying fissile isotopes by the behavior of the photofission cross section in the near-threshold region.

PACS: 25.85.Jg; 29.25.Rm

### ВВЕДЕНИЕ

Реакция фотоделения имеет не только чисто научное, но и прикладное значение для определения присутствия в образцах делящихся материалов. Пороги реакции для различных делящихся материалов различаются, однако все они находятся в области  $(6 \pm 1)$  МэВ. Зная пороги для разных элементов, можно определить не только наличие делящегося материала, но и конкретный изотоп. Выход реакции можно определять по выходу запаздывающих гамма-квантов, которые излучаются в интервале  $10^{-3}$ – $10^3$  с после акта деления. Полная энергия гамма-излучения на акт деления 6–8 МэВ, а средняя энергия

---

\*E-mail: konobeev@inr.ru

гамма-квантов  $\sim 1$  МэВ. Энергетический спектр может быть очень сложным и составлять до 200  $\gamma$ -линий, соответствующих распаду различных продуктов деления. Хотя различных продуктов деления и соответствующих им времен распада много, они группируются в несколько групп с усредненными временами распада от долей секунды до тысяч секунд.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

В работе проверена возможность определения порога реакции фотоделения для конкретного элемента для доступных на ускорителе ЛУЭ-8-5 потоков облучающих частиц. На ускорителе имеется возможность работы с пучком электронов с энергией 4–9 МэВ, пучком тормозных фотонов с граничной энергией 4–9 МэВ, а при применении процедуры монохроматизации тормозного спектра [1] возможна работа с квазимоноэнергетическим пучком фотонов.

В эксперименте пучок электронов с энергией  $E_e$  отклонялся в магнитном поле магнитного анализатора на угол  $270^\circ$  и попадал либо на образец, либо на тормозную мишень. Во втором случае образец облучался потоком тормозных фотонов с граничной энергией  $E_{ph}^{max} \approx E_e$ . Данные получены для двух установок, предназначенных для работы с задержанными фотонами в различных временных областях.

Установка 1 (БОВР) предназначена для исследования запаздывающих фотонов с большими временами распада, но с хорошим энергетическим разрешением (возможность расшифровки  $\gamma$ -спектров). В этом случае после облучения образец перемещался в низкофоновую камеру с детектором на основе сверхчистого германия (HPGe) [2]. Время задержки от конца облучения до начала измерения при этом составляло 100–200 с.

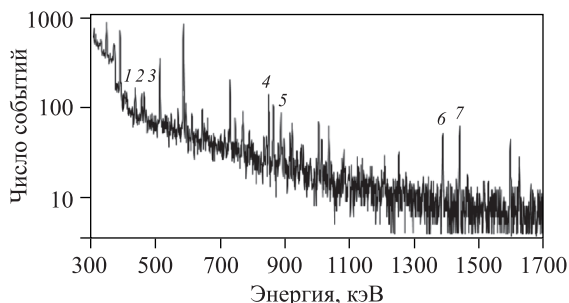


Рис. 1. Энергетический спектр запаздывающих фотонов, снятый с помощью HPGe-детектора при использовании установки 1; образец  $^{235}\text{U}$ , максимальная энергия тормозных фотонов  $E_{ph}^{max} = 7,5$  МэВ, время облучения 300 с, время задержки 180 с. Цифрами отмечены линии от распада  $^{138}\text{Xe}$  (1),  $^{137}\text{Xe}$  (2),  $^{138}\text{Cs}$  (3, 7),  $^{134}\text{I}$  (4, 5) и  $^{96}\text{Rb}$  (6)

На рис. 1 показан энергетический спектр запаздывающих фотонов при облучении образца  $^{235}\text{U}$  (масса образца 5,12 г, содержание изотопа 0,1%), снятый с помощью HPGe-детектора. В спектре видны линии от распада радиоактивных осколков Xe, Cs, I, Rb. Видны также фоновые пики, соответствующие естественной радиоактивности образца  $^{235}\text{U}$  и фону камеры.

Установка 2 (МАВР) предназначена для исследования запаздывающих фотонов с малыми временами распада. В этом случае после облучения образец оставался на месте облучения, а выход фотонов измерялся жидководородным детектором. Сигналы с детектора анализировались цифровым сигнальным процессором с  $n$ - $\gamma$ -разделением. Время задержки составляло 4–5 с.

### ИЗМЕРЕНИЕ ВРЕМЕННОЙ ЗАВИСИМОСТИ ВЫХОДА ЗАДЕРЖАННЫХ ФОТОНОВ

На рис. 2 показан временной спектр запаздывающих фотонов, полученный на установке 2. Для подгонки спектра и определения времен распада кривая распада аппроксимируется с помощью трехчленной формулы

$$N_{\text{app}} = N_1 \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right) + N_2 \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) + N_3,$$

состоящей из двух распадных членов и постоянного фона. Видно, что экспериментальная временная зависимость в области 4–12 с хорошо подгоняется кривой с двумя периодами полураспада  $T_1 = \tau_1 \ln 2 = 0,85$  с и  $T_2 = \tau_2 \ln 2 = 3,6$  с. Таким образом, показана возможность определения

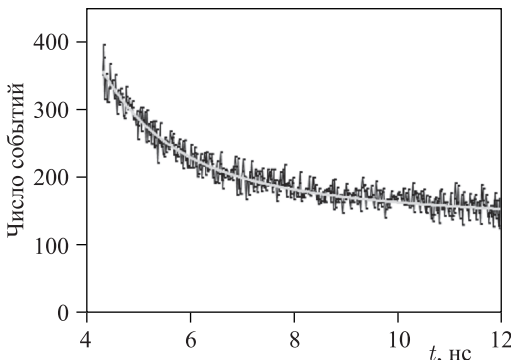


Рис. 2. Временной спектр запаздывающих фотонов, полученный на установке 2 (МАВР); образец  $^{232}\text{Th}$  (масса образца 9,05 г, содержание тория 1,025%), максимальная энергия тормозных фотонов  $E_{\text{ph}}^{\text{max}} = 7,5$  МэВ, время облучения 100 с, время задержки 4,3 с. Серая линия — аппроксимация по формуле (1) с параметрами:  $N_1 = 138$ ,  $T_1 = 0,85$  с,  $N_2 = 84$ ,  $T_2 = 3,6$  с,  $N_3 = 134$

временной зависимости выхода запаздывающих фотонов в секундной области на установке 2.

На рис. 3 приведен временной спектр запаздывающих фотонов, полученный на установке 1 (для больших времен распада) при предельной энергии тормозного спектра 7,5 МэВ. Для получения зависимости выхода запаздывающих фотонов от предельной энергии тормозных фотонов проводились измерения в пороговой области  $4 \leq E_{\text{ph}}^{\text{max}} \leq 8$  МэВ.

На рис. 4 показана зависимость выхода запаздывающих фотонов (параметра  $N_1$ ) от предельной энергии тормозного спектра для образца  $^{238}\text{U}$ . Видно ярко выраженную зависимость порогового поведения выхода запаздывающих фотонов от предельной энергии тормозных фотонов, облучающих образец.

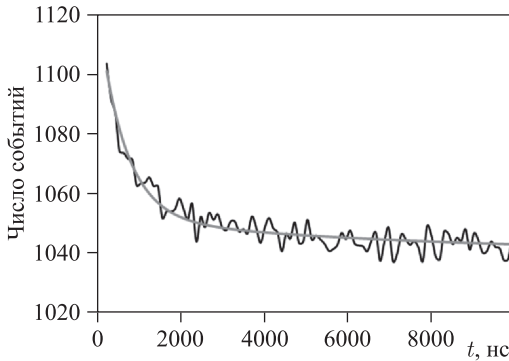


Рис. 3. Временной спектр запаздывающих фотонов, полученный на установке 1 (БОВР); образец  $^{238}\text{U}$  (масса образца 8,2 г, содержание урана 0,768%),  $E_{\text{ph}}^{\text{max}} = 7,5$  МэВ, время облучения 300 с, время задержки 180 с. Серая линия — аппроксимация по формуле (1) с параметрами:  $N_1 = 71$ ,  $T_1 = 440$  с,  $N_2 = 12$ ,  $T_2 = 5000$  с,  $N_3 = 1040$

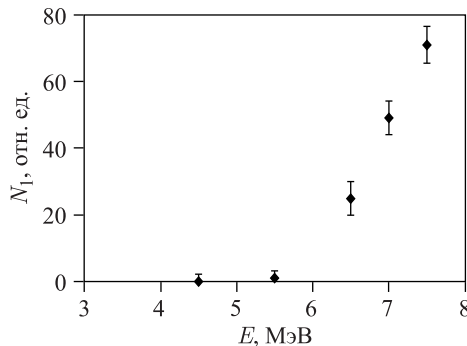


Рис. 4. Зависимость выхода запаздывающих фотонов (параметра  $N_1$ ) от предельной энергии тормозного спектра для образца  $^{238}\text{U}$

Сечения реакции фотоделения для изотопов  $^{238}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  и  $^{232}\text{Th}$ 

Сечение	$^{232}\text{Th}$	$^{238}\text{U}$	$^{239}\text{Pu}$
$\sigma$ (8,5 МэВ), мб	15	22	22
$\sigma$ (5,5 МэВ), мб	0,012	0,21	2,8
$\sigma$ (8,5 МэВ)/ $\sigma$ (5,5 МэВ)	1250	105	7,9

В работе [3] были приведены зависимости сечения фотоделения  $^{238}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  и  $^{232}\text{Th}$  от энергии фотонов в околопороговой области. Показано, что при энергии фотонов 8–9 МэВ сечения для всех приведенных изотопов сравнительно одинаковы, а в области 5,5–6,0 МэВ значительно различаются. В таблице даны значения сечений при этих энергиях и отношение сечений при 8,5 МэВ к сечениям при 5,5 МэВ. Видно, что для приведенных делящихся изотопов это отношение составляет 1250, 105 и 7,9 соответственно, что может позволить, измерив отношение выходов при различных энергиях (например 5,5 и 8,5 МэВ), идентифицировать делящийся изотоп.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Опробован метод измерения выхода реакции фотоделения путем измерения временной зависимости испускания запаздывающих гамма-квантов. На ускорителе ЛУЭ-8-5 ИЯИ РАН получены энергетические и временные спектры запаздывающих гамма-квантов при облучении делящихся изотопов пучками электронов и фотонов. Измерена также зависимость выхода запаздывающих гамма-квантов от энергии электронов для образца  $^{235}\text{U}$ . Сделан вывод о возможности идентификации делящихся изотопов по поведению сечений в околопороговой области.

Работа выполнена при поддержке РФФ, грант 16-12-10039.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зуев С. В., Недорезов В. Г., Конобеевский Е. С., Туринге А. А. Разработка метода измерения сечений фотоядерных реакций с использованием модельно рассчитанных спектров квазимоноэнергетических фотонов // ЯФ. 2018. Т. 81. С. 409–414.
2. Андреев А. В., Бурмистров Ю. М., Зуев С. В., Конобеевский Е. С., Мордовской М. В., Фирсов В. И. Низкофонный гамма-спектрометр с защитой на антисовпадениях от космического излучения // ЯФ и инжиниринг. 2016. Т. 4. С. 879–882.
3. Gozani T. Active Nondestructive Assay of Nuclear Materials: Principles and Applications. NUREG/CR-0602; SAI-MLM-2585.