

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

98-246

P15-98-246

С.А.Карамян, И.Адам, А.Г.Белов, Ю.В.Норсеев,
В.И.Стегайлов, П.Чалоун

ИЗМЕРЕНИЕ ВЫХОДА ЛЕГКИХ ЯДЕР
ПРИ ФОТОДЕЛЕНИИ ^{232}Th

Направлено в журнал «Ядерная физика»

1998

1. Введение

Деление с испусканием третьего фрагмента, тяжелее α -частицы, хорошо известно в литературе, например [1]. Однако вылет продуктов средней массы ($A > 20$) недостаточно изучен из-за низкой вероятности этого процесса. В ранней работе [2] выход (Y) ядер ^{24}Na и ^{28}Mg при делении ^{238}U под действием α -частиц измерялся с помощью счетчиков Гейгера при использовании радиохимического разделения продуктов реакции. Была обнаружена [2] резкая энергетическая зависимость $Y(E^*)$, такая, что при $E^* < 20$ МэВ выход убывал до значений ниже порога чувствительности эксперимента ($< 10^{-8}$ на акт деления). Этот результат был косвенно подтвержден в недавних экспериментах автора [3] с использованием кинематического сепаратора продуктов деления ядер мишеней от ^{229}Th до ^{249}Cf под действием тепловых нейтронов. Мишеням ^{229}Th и ^{233}U соответствует верхний предел $Y \leq 10^{-9}$ для выхода масс от 20 до 30, а в случаях ^{241}Am и ^{249}Cf получены значения $Y \geq 10^{-8}$, что можно связать с резким ростом E^* ядра в точке разрыва при увеличении Z .

Резкая зависимость сечения ядерной реакции от энергии обычно соответствует подбарьерному процессу. Она является естественной, например, для каскадного деления сильно-возбужденных ядер на три осколка сравнимой массы, обнаруженного в [4] при делении ^{238}U тяжелыми ионами. Вторичное деление тяжелого осколка заторможено высоким барьером деления (B_f) ядер в области от редкоземельных элементов до Au. Другой случай, где ожидается резкая энергетическая зависимость сечения, это подбарьерная эмиссия легкого кластера из тяжелого ядра. Вместе с тем тройное деление с эмиссией частиц из предразрывной фигуры не является подбарьерным, т.к. делящаяся система имеет большую деформацию и кулоновский барьер для эмиссии частиц значительно понижен. Это известно благодаря исследованиям тройного деления с испусканием α -частиц. Для него наблюдается удивительная стабильность выхода с изменением E^*

[5] и с ростом Z делящегося ядра [3], которое приводит к увеличению E^* в точке разрыва.

Действительно, при отсутствии удержания частиц кулоновским барьером их эмиссия определяется только вероятностями формирования и отделения частицы, которые не должны сильно зависеть от E^* . На основе такого рассуждения разумно предположить, что выход ^{24}Na и ^{28}Mg , определенный в [2], может быть связан с подбарьерной эмиссией кластеров из составного ядра. Тогда, тот же процесс должен наблюдаться и в случае неделиющегося ядра, однако наши измерения [6], сделанные для ^{181}Ta , возбуждаемого тормозным излучением с $E_e = 24$ МэВ, дали отрицательный результат.

Была получена весьма глубокая верхняя граница выхода ($\leq 10^{-10} - 10^{-11}$) не только для ^{24}Na и ^{28}Mg , но и для распада $^{181}\text{Ta}^* \rightarrow ^{48}\text{Ca} + ^{133}\text{I}$ с эмиссией дважды магического ^{48}Ca и околomagического ^{133}I . Заметим, что облегченная эмиссия магических продуктов является типичной в случае спонтанного кластерного распада [7].

Можно сделать вывод, что выход ядер ^{24}Na и ^{28}Mg и его энергетическая зависимость должны быть измерены заново, в частности, для такого ядра, как ^{232}Th , деление которого характеризуется рядом особенностей.

2. Эксперимент

2а). Схема эксперимента

В качестве материала мишени использовался специально приготовленный хлорид ThCl_4 высокой степени очистки от легких элементов, таких как Na, Mg, Al, которые могли служить фоновым источником ^{24}Na в результате реакций под действием тормозного излучения и нейтронов. 1 г ThCl_4 упаковывался в виде таблетки в оболочке из медной фольги и помещался для облучения тормозным излучением вплотную к W-конвертеру, установленному на пучке электронов микротрона МТ-25 ЛЯР ОИЯИ. Облучения проведены при трех значениях энергии электронов: 12; 16,5 и 24 МэВ, ток пучка составлял около 15 мкА, время облучения - около 7 час. Сразу после облучения активность короткоживущих ядер-осколков деления была весьма высока, и химические операции можно было пачать только после "охлаждения" в течение 3-х часов. Химическое выделение фракции щелочных и щелочно-

земельных элементов продолжалось около 2-х часов, затем полученный источник помещался для измерения γ -спектров вплотную к Ge HP-детектору с использованием толстых фильтров из Pb (+Cd+Cu). Активность источника была все еще высокой, т.к. не ставилась задача изолировать Na или Mg в чистом виде. Выделенная фракция содержала радионуклиды Sr, Ba, Ra и других элементов. Выход ^{91}Sr и ^{140}Ba использовался как репер для калибровки выхода искоемых радионуклидов ^{24}Na и ^{28}Mg на акт деления. Специальные радиохимические операции проводились для очистки источника от радиоактивных осколков Pd и Te, которые могли создать нежелательный фон при поиске ^{24}Na и ^{28}Mg (см. ниже).

Использовавшийся Ge HP-детектор (Canberra) является прибором высокой степени дифференциации радионуклидов, имея разрешение около 1,6 кэВ по линиям ^{60}Co . Поэтому большинство линий в γ -спектрах могло быть разрешено и индивидуально идентифицировано, несмотря на сложный спектр и высокую абсолютную активность источника. Избыточная загрузка детектора гасилась с помощью упомянутых Pb-поглотителей толщиной 10-20 мм. Для линий ^{24}Na и ^{28}Mg с энергиями 2753,9 и 1778,9 кэВ соответственно коэффициент пропускания поглотителя был достаточно велик, 60-30%, в то время как мягкое γ -излучение поглощалось полностью. Скорость счета спектрометра достигала $2 \cdot 10^4$ имп/с, при этом мертвое время не превышало 20% и не наблюдалось ухудшения разрешения или сдвига γ -линий. Применялся метод внутренней энергетической калибровки по γ -линиям ^{140}Ba , ^{140}La и ^{228}Ra . Энергетическая зависимость эффективности детектора измерялась в той же геометрии с помощью калибровочных источников, она совпала с результатами относительных измерений при внутренней калибровке. Накопление информации и обработка спектров производились с использованием РС типа IBM-586. Для декомпозиции спектра и определения площади отдельных линий применялся код "Maestro" в вариантах автоматического поиска и обработки линий или фитирования отдельных участков спектра в режиме диалога. Описанные выше условия облучений и измерений были достаточно напряженными, но необходимыми, чтобы удовлетворить задаче поиска радионуклидов, имеющих выход на уровне 10^{-6} - 10^{-7} от основной массы радиоактивных ядер.

^{28}Mg . Учтены квантовые выходы γ -линий, факторы эффективности, а также накопленне-распад.

В случае граничной энергии тормозного излучения $E_c=24$ МэВ статистическая точность определения ^{24}Na и ^{28}Mg выше, чем при 16,5 МэВ, а при $E_c=12$ МэВ удалось оценить только верхнюю границу Y . Это связано с убыванием полного числа событий деления при уменьшении энергии пучка электронов, главным образом, из-за ослабления интенсивности тормозного излучения и, во вторую очередь, из-за уменьшения граничной энергии спектра.

3. Обсуждение результатов

В табл.2 приведены значения выхода легких ядер на акт фотоделения ^{232}Th при трех значениях граничной энергии тормозного спектра. Выход ^{24}Na и ^{28}Mg составляет около 10^{-6} . Целый ряд значений представлен верхними границами выхода, что неудивительно с учетом достаточно жестких фоновых условий, описанных выше, а также определенного недостатка скорости счета, как ясно из рис.1. И это при том, что использована мишень ^{232}Th весом 1 г; и все накопленные при облучении радиоактивные ядра-продукты деления поступали на химическую переработку и последующее измерение γ -спектров.

Большинство предшествующих работ [2,3,8] используют метод кинематического отбора радиоактивных продуктов и, следовательно, тонкую мишень делящегося вещества. Полученные при этом значения выхода на уровне 10^{-7} и ниже имеют, по-видимому, достаточно слабую статистическую обеспеченность. Следует упомянуть еще одно различие методов: с помощью кинематических сепараторов [1,3] измеряется выход отдельных нуклидов, в то время как в нашем методе кумулятивный выход изобар $A=24$ и 28. Результаты нашей работы сравниваются с литературными данными [2,8] на рис.2. Нельзя сказать, что имеет место хорошее согласие. Результаты настоящих измерений предпочтительны, т.к. в эксперименте обеспечена высокая абсолютная чувствительность, исключены фоны и использована γ -спектрометрическая аппаратура последнего поколения. Все же эксперименты [2,8] не идентичны настоящим, т.к. применяют кинематический отбор продуктов реакции. В работе [11] предложен необычный механизм тройного деления, когда третий осколок не получает заметной кинетической энергии из-за баланса

кулоновского отталкивания от двух других. В настоящем эксперименте все радиоактивные продукты, независимо от их кинетической энергии, включены в измеренный выход. Все же расхождение данных, показанных на рис.2б, нельзя считать веским подтверждением экзотического механизма реакции, предложенного в [11].

Результаты, приведенные в табл.2 и на рис.2, позволяют оценить характер энергетической зависимости выхода легких ядер, что важно для получения выводов о механизме процесса. Средняя энергия возбуждения делящегося ядра ^{232}Th была определена с использованием характеристик, взятых из литературы и показанных на рис.3. Вычисленный спектр тормозного излучения и гигантский дипольный резонанс (GDR) в сечении фотопоглощения ^{232}Th [12] даны на рис.3а, а вероятность деления, P_f , - на рис.3б. Вероятность процесса (γ, xnf) в широком диапазоне E^* получена пересчетом результатов для (n, upf) , приведенных в справочнике [13]. Предполагалось, что P_f ступени x первой реакции равна вероятности следующей ступени второй реакции, т.е. $y=x+1$. В околобарьерной области учтены данные по фотоделению [14], (t, pf) и $(p, p'f)$ -реакциям [15,16]. Произведение функций, помеченных цифрами 1,2 и 3 на рис.3, дает распределение делящихся ядер по E^* , которое оказывается не очень широким с максимумом при энергии значительно ниже граничной энергии тормозного спектра. Отсюда вычислена средняя \bar{E}^* делящегося составного ядра. Например, в случае $E_c=12$ МэВ $\bar{E}^* \approx 8$ МэВ, т.е. ненамного выше барьера деления ^{232}Th $V_f=6,0$ МэВ.

Точки на рис.2 размещены при соответствующих значениях средней энергии возбуждения составного ядра. Согласно настоящим измерениям резкая энергетическая зависимость [2] вероятности вылета легких ядер ^{24}Na и ^{28}Mg на акт деления не подтверждена, скорее имеет место достаточно стабильный выход на уровне 10^{-6} . Такое поведение согласуется с хорошо изученным случаем эмиссии длиннопробежных α -частиц (см. рис.2а) и, по-видимому, подтверждает сходный механизм испускания легких ядер (типа Na) и α -частиц из предразрывной делящейся системы.

4. Заключение

С применением высокочувствительного бесфонового метода определен выход легких ядер ^{24}Na и ^{28}Mg при фотоделении ^{232}Th . Не подтверждены данные предыдущих работ о резкой энергетической зависимости этого процесса. Таким образом, предполагавшийся ранее общий механизм тройного деления как с эмиссией α -частиц, так и более сложных ядер, получил теперь прямое обоснование.

Таблица 1. Перечень γ -линий, использованных в работе для определения выходов радионуклидов

Нуклид	$T_{1/2}$	E_γ (кэВ)	I_γ (%)
^7Be	53,3 дн.	477,6	10,4
^{24}Na	15,0 час.	1368,5 2753,9	100 100
$^{28}\text{Mg} \rightarrow ^{28}\text{Al}$	20,9 час. \rightarrow 2,2 мин.	1342,2 1778,9 (доч.)	54,0 100
$^{38}\text{S} \rightarrow ^{38}\text{Cl}$	2,84 час. \rightarrow 37 мин.	1941,9 2167,6 (доч.)	84,0 42,4
^{59}Fe	44,5 дн.	1099,3 1291,6	56,5 43,2
$^{91}\text{Sr} \rightarrow ^{91}\text{Y}^m$	9,5 час. \rightarrow 49 мин.	555,6 (доч.)	61,3
$^{112}\text{Pd} \rightarrow ^{112}\text{Ag}$	21,1 час. \rightarrow 3,1 час.	617,4 (доч.) 2752,8 (доч.)	50 0,11
$^{132}\text{Te} \rightarrow ^{132}\text{I}$	76,3 час. \rightarrow 2,3 час.	667,7 (доч.) 1778,6 (доч.)	100 0,08
$^{140}\text{Ba} \rightarrow ^{140}\text{La}$	12,75 дн. \rightarrow 40,3 час.	537,3 1596,5 (доч.)	24,4 95,4

Таблица 2. Выход легких ядер на акт фотоделения ^{232}Th при трех значениях граничной энергии спектра тормозного излучения

Продукт реакции	Выход		
	24 МэВ	16,5 МэВ	12 МэВ
^7Be	$\leq 1,1 \cdot 10^{-4}$	-	$\leq 1,0 \cdot 10^{-4}$
^{24}Na	$(1,0 \pm 0,2) \cdot 10^{-6}$	$(0,65 \pm 0,20) \cdot 10^{-6}$	$\leq 0,5 \cdot 10^{-6}$
^{28}Mg	$(0,85 \pm 0,15) \cdot 10^{-6}$	$(0,93 \pm 0,30) \cdot 10^{-6}$	$\leq 1,2 \cdot 10^{-6}$
^{38}S	$\leq 2,5 \cdot 10^{-5}$	-	$\leq 1,0 \cdot 10^{-5}$
^{59}Fe	$\leq 1,0 \cdot 10^{-7}$	-	$\leq 2,6 \cdot 10^{-6}$

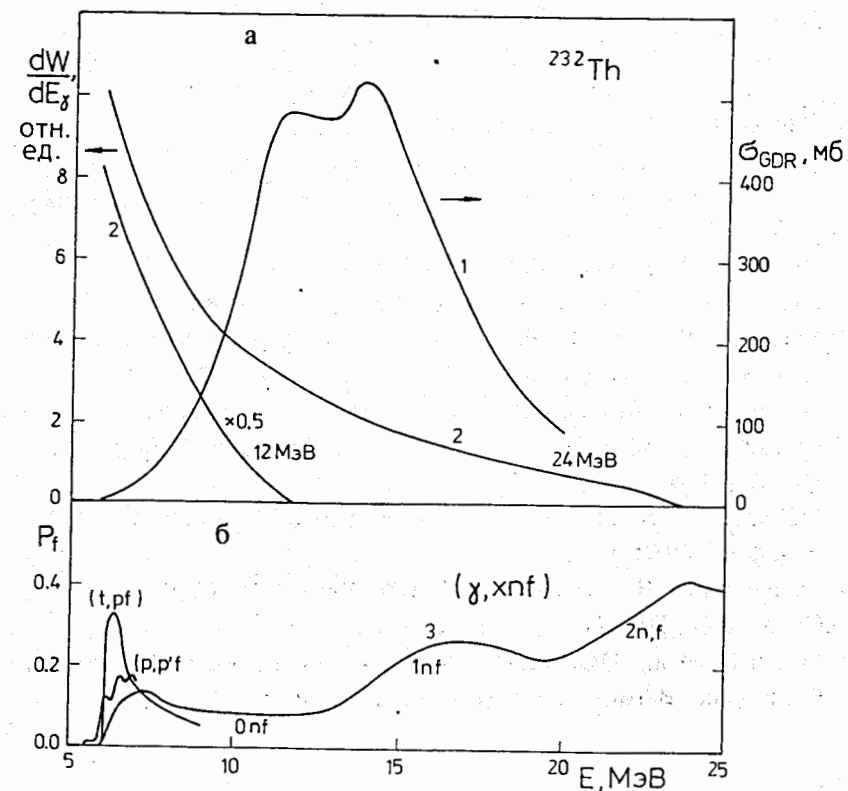


Рис.3. Гигантский резонанс в сечении фотопоглощения ^{232}Th по данным [12] (кривая 1), спектр тормозного излучения (2) и вероятность деления P_f по данным [13-16] (3)

Литература

1. Vorobiev A.A. et al., Phys. Lett. B, 1972, vol.40, p.102.
2. Iyer R.H. and Cobble J.W., Phys. Rev., 1968, vol.172, p.1186.
3. GÖnenwine F., Proc. 2-nd Intern. Conf. on Dynamical Aspects of Nucl. Fission, Smolenice, 1993, E7-94-19, Dubna, p.47.
4. Карамян С.А. и др., ЯФ, 1967, Т. 5, С.959.
5. Горбачев В.М., Замятнин Ю.С., Лбов А.А., Взаимодействие излучений с ядрами тяжелых элементов и деление ядер. Справочник. М.: Атомиздат, 1976.
6. Карамян С.А. и др., Изв. РАН, сер.физ., 1997, Т.61, С.2233.
7. Poenaru D.N. et al., At. Data Nucl. Data Tables, 1991, vol.48, p.231.
8. Гангрский Ю.П. и др., ЯФ, 1986, Т.44, С.294.
9. Piessens M. et al., Nucl. Phys. A, 1993, vol.556, p.88.
10. Karamian S.A. et al., Proc. Intern. Workshop on Research with Fission Fragments. Singapore: World Scientific, 1997, p.199.
11. Solyakin G.F., Kravtsov A.V., Phys. Rev. C, 1996, vol.54, p.1798.
12. Dietrich S.S., Berman B.L., At. Data Nucl. Data Tables, 1988, vol.38, p.199.
13. McLane V. et al., Neutron Cross Sections. Handbook. N.Y.: Academic, 1988, vol.2.
14. Смиренкин Г.Н., Солдатов А.С., ЯФ, 1996, Т.59, С.203.
15. Cramer J.D., Britt H.C., Nucl. Sci. Eng., 1970, vol.41, p.177.
16. Jansen H. et al., Dynamics of Nucl. Fission and Related Collective Phenomena. Berlin: Verlag-Springer, 1981, p.95.

Карамян С.А. и др.

P15-98-246

Измерение выхода легких ядер при фотоделении ^{232}Th

Выход радионуклидов ^{24}Na и ^{28}Mg определен по их γ -активности с использованием радиохимии после активации чистых мишеней Th тормозным излучением с граничной энергией 12, 16,5 и 24 МэВ. Выполнен тщательный анализ возможных источников фона и сделан вывод о том, что выход указанных легких ядер составляет около 10^{-6} на акт деления ^{232}Th и довольно слабо зависит от энергии возбуждения делящегося ядра. Такое поведение, не обнаруженное в ранее опубликованных работах, дает основание для уточнения механизма эмиссии третьего фрагмента.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций им. Г.Н.Флерова и в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 1998

Перевод авторов

Karamian S.A. et al.

P15-98-246

Measurements of the Light Nuclei Yields at Photon-Induced ^{232}Th Fission

Yields of the ^{24}Na and ^{28}Mg radionuclides have been detected by their γ -activity using the radiochemical isolation procedure after the activation of the purified Th target by bremsstrahlung at the end-point energies $E_e = 12, 16.5$ and 24 MeV. The possible backgrounds are carefully analysed and the conclusion is drawn that the yield of mentioned light nuclei is about 10^{-6} per fission of ^{232}Th with a flat dependence on the excitation energy of a fissile nucleus. Such a behaviour, which wasn't revealed in the previous works, is significant for the understanding of the third fragment-emission mechanism.

The investigation has been performed at the Flerov Laboratory of Nuclear Reactions and at the Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 1998