

ВЫХОДЫ ОСКОЛКОВ ПРИ ФОТОДЕЛЕНИИ АКТИНИДНЫХ ЯДЕР

Ю. П. Гангровский^a, П. Зузаан^b, А. Г. Белов^a, З. Блащак^c,
В. И. Жеменик^{a,2}, Б. Н. Марков^a, Г. В. Мышинский^a

^a Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

^b Центр ядерных исследований МонГУ, Улан-Батор

^c Университет им. А. Мицкевича, Познань, Польша

² Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев

Измерены выходы реакций образования изотопов ^{101}Mo , ^{135}I , ^{135m}Cs при фотоделении актинидных ядер ^{232}Th , ^{238}U , ^{237}Np . Эти осколки деления характеризуются рядом особенностей ядерной структуры или имеют практическое применение. Измерения были проведены на тормозном излучении микротрона Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флерова ОИЯИ при энергии электронов 22 МэВ. Измерения выходов осколков производились активационным методом с использованием HPGe-детектора γ -излучения.

The fission fragment yields of isotopes ^{101}Mo , ^{135}I , ^{135m}Cs were measured at the photofission of actinide nuclei ^{232}Th , ^{238}U , ^{237}Np . These fission fragments have some peculiarities in nuclear structure or in practical using. The measurements were performed on the microtron bremsstrahlung at the Flerov Laboratory of Nuclear Reactions, JINR, at the electron energy 22 MeV. The activation method with an HPGe detector was used in these measurements of the yields.

PACS: 25.20.-x

Фотоядерные реакции занимают особое место в ядерной физике. Это объясняется целым рядом их особенностей. Во-первых, взаимодействие γ -излучения с ядрами является целиком электромагнитным, что позволяет провести достаточно корректное описание этого процесса [1]. Поэтому данные о структуре изучаемых в таких реакциях ядер наиболее определенные и в меньшей степени зависящие от модельных представлений. Во-вторых, высокая интенсивность и большая проникающая способность γ -излучения, получаемого на современных ускорителях электронов, позволяет достигать достаточно больших выходов исследуемых нуклидов или проводить измерения с нуклидами, характеризующимися предельно низкими выходами. Одним из направлений исследований фотоядерных реакций является фотоделение ядер. В этом процессе со сравнимыми выходами образуется большое количество осколков в широком диапазоне Z и A [2]. Эти осколки находят разнообразное применение как в фундаментальных исследованиях, так и в практических работах. Выходы необходимых для этого осколков зависят, естественно, и от делящегося ядра мишени, и от сорта и энергии бомбардирующих частиц. Поэтому всесторонние исследования в этом направлении представляют большой интерес и имеют

важное практическое значение. Они расширяют систематику сечений фотоядерных реакций, а их сравнение с расчетами приносит новую информацию о структуре изучаемых ядер и взаимодействии с ними электромагнитного излучения.

Цель представленной работы — измерение абсолютных выходов ряда осколков при фотоделении тяжелых актинидных ядер ^{232}Th , ^{238}U , ^{237}Np с использованием активационной методики при энергиях возбуждения в районе гигантского дипольного резонанса. В качестве объектов исследований выбраны осколки, либо находящие практическое применение, либо характеризующиеся какими-нибудь особенностями ядерной структуры (они отмечены в табл. 1). Все эти осколки образуются либо непосредственно при разрыве исходного делящегося ядра, либо после цепочки β -распадов предшествующих ядер.

Таблица 1. Спектроскопические характеристики изучаемых осколков деления

Осколок	Особенность	$T_{1/2}$	E_γ , кэВ	I_γ , %
^{101}Mo	Большая квадрупольная деформация	14,6 мин	191	25
^{135}I	Медицинский препарат для диагностики раковых опухолей	6,5 ч	1280	34
^{135m}Cs	Изомер с высоким спином (19/2)	53 мин	846	96

Измерения выходов реакций фотоделения проводились на тормозном излучении электронов. Источником тормозного излучения являлся выведенный пучок электронов микротрона МТ-25 [3] Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флерова ОИЯИ. Для этого пучок электронов направлялся на тормозную мишень (охлаждаемый водой вольфрамовый диск толщиной 2 мм), за которой располагался алюминиевый поглотитель электронов толщиной 30 мм. Тормозная мишень служила также коллектором тока электронов, который измерялся с помощью интегратора электрического заряда. Облучаемые мишени помещались на расстоянии 30 мм от алюминиевого поглотителя. В качестве мишеней использовались слои из окислов исследуемых элементов толщиной 3 мг/см², нанесенные на алюминиевую подложку толщиной 20 мкм. Вылетевшие из мишени осколки тормозились в сборниках из алюминия толщиной 20 мкм, находящихся в непосредственном контакте с облучаемыми мишенями. После облучения сборники переносились в помещение, защищенное от тормозного излучения микротрона, для измерения их γ -спектров. В случае изомера ^{135m}Cs из-за его малого выхода предварительно проводилось химическое выделение цезия (процедура выделения описана в работе [4]).

Идентификация образующихся в реакциях (γ, f) осколков проводилась по их характерному γ -излучению и периоду полураспада. Для изучения были выбраны осколки, интересные с точки зрения их ядерной структуры (^{101}Mo , ^{135m}Cs) или области возможного практического применения (^{135}I) (их характеристики [5] представлены в табл. 1). Спектры γ -излучения через выбранные промежутки времени измерялись HPGe-детектором объемом 60 см³ с разрешением 2,8 кэВ для γ -линии 1332 кэВ ^{60}Co . Таким образом определялись период полураспада осколка и энергии относящихся к нему γ -линий. Анализ измеренных спектров γ -излучения позволил определить площади γ -линий, связанных с распадом осколков, образующихся в фотоядерных реакциях (γ, f). Из этих площадей были получены выходы реакций, отнесенные на один осколок делящегося ядра [4]:

$$[Y] = \frac{\lambda S}{\varepsilon K_\gamma} \frac{1}{(1 - e^{-\lambda t_1}) e^{-\lambda t_2} (1 - e^{-\lambda t_3})},$$

где λ — постоянная полураспада; S — площадь пика выбранной линии в γ -спектре; ε — эффективность регистрации γ -излучения данной γ -линии; K_γ — выход данной γ -линии при β -распаде осколка; t_1, t_2, t_3 — соответственно времена облучения, охлаждения и измерения.

Эти выходы — числа образующихся осколков, отнесенные к полному числу осколков ($1/f$), представлены в табл. 2. Последнее определялось по известному выходу осколка ^{140}La — 5% [2] по его γ -линии с энергией 1596 кэВ.

Таблица 2. Выходы осколков в реакциях фотоделения ядер $1/f$, %

Осколок	$^{232}\text{Th}(\gamma, f)$	$^{238}\text{U}(\gamma, f)$	$^{237}\text{Np}(\gamma, f)$
^{101}Mo	3,5(4)	3,7(4)	2,8(5)
^{135}I	4,8(5)	5,8(5)	3,9(6)
^{135m}Cs	$< 10^{-4}$	0,00015(10)	0,00035(18)

Из таблицы можно видеть заметную разницу выходов высокоспинового изомера ^{135m}Cs для различных мишеней и сравнительно слабое различие выходов для других осколков — ^{101}Mo и ^{135}I . Это различие объясняется, по-видимому, разными способами образования этих осколков. Если ^{135m}Cs практически полностью образуется непосредственно после разрыва ядра и в данной работе измеряется его независимый выход, то в случае других осколков измеряется кумулятивный выход, включающий вклады осколков в цепочке β -распадов всех предшествующих нуклидов. Сумма выходов этих нуклидов мало отличается для исследованных делящихся ядер, и это уравнивает их вклад в образование ^{101}Mo и ^{135}I .

Особенностью фотоядерных реакций является большой пробег в облучаемом веществе тормозного излучения. Это позволяет использовать достаточно толстые мишени (весом до нескольких граммов), что значительно увеличивает выходы реакции по сравнению с представленными в табл. 2.

Полученные данные о выходах образующихся осколков и их зависимостях от нуклонного состава делящегося ядра могут быть использованы при планировании новых экспериментов с γ -излучением. Они позволяют оптимизировать условия получения необходимых для исследований осколков деления тяжелых ядер.

Авторы выражают благодарность Ю. Ц. Оганяну, С. Н. Дмитриеву и Ю. Э. Пенионжквичу за внимание к работе.

Работа поддержана РФФИ (гранты 11-02-92200-Монг-а и 12-02-00361-а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ииханов Б. С., Капитонов И. М. Взаимодействие электромагнитного излучения с атомными ядрами. М.: Изд-во Моск. гос. ун-та, 1979.
2. Гангрский Ю. П., Далхсурен Б., Марков Б. Н. Осколки деления ядер. М.: Энергоатомиздат, 1985.
3. Капица С. П., Мелехин В. Н. Микротрон. М.: Наука, 1969.
4. Гангрский Ю. П. и др. ОИЯИ, Р15-2009-156. Дубна, 2009.
5. Browne E., Firestone R. B. Table of Radioactive Isotopes. N. Y., 1986.

Получено 26 октября 2012 г.