

P15-2007-191

Ж. Бадамсамбуу¹, А. Г. Белов, Ю. П. Гангрский, П. Зузаан¹,
Нгуен Мань Шат²

ФУНКЦИИ ВОЗБУЖДЕНИЯ И ВЫХОДЫ ОСКОЛКОВ
ПРИ ФОТОДЕЛЕНИИ ²³⁸U

¹Центр ядерных исследований, МонГУ, Улан-Батор, Монголия

²Институт физики и электроники, центр ядерной физики, Ханой,
Вьетнам

Бадамсамбуу Ж. и др. P15-2007-191
Функции возбуждения и выходы осколков при фотоделении ^{238}U

Измерены выходы и сечения реакций образования изотопов ^{92}Sr , ^{97}Zr , ^{97}Nb и ^{135}I при фотоделении ^{238}U . Эти осколки деления характеризуются рядом особенностей ядерной структуры и практического применения. Измерения были проведены на тормозном излучении микротрона Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флерова ОИЯИ в диапазоне энергий электронов 10–22 МэВ. Измерения выходов осколков производились активационным методом с использованием Ge(Li)-детектора γ -излучения.

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

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2007

Badamsambuu J. et al. P15-2007-191
Excitation Functions and Yields at the Photofission of ^{238}U

The yields and reaction cross-sections of ^{92}Sr , ^{97}Zr , ^{97}Nb and ^{135}I at the photofission of ^{238}U were measured. These fission-fragments have some peculiarities in nuclear structure or in practical using. The measurements were performed on the bremsstrahlung of FLNR JINR microtron, in the electron energy range 10–22 MeV. The activation method with Ge(Li) detector was used in these measurements.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2007

ВВЕДЕНИЕ

Фотоядерные реакции занимают особое место в ядерной физике. Это объясняется рядом их особенностей. Во-первых, взаимодействие γ -излучения с ядрами является целиком электромагнитным, что позволяет провести корректное описание этого процесса [1]. Поэтому данные о структуре изучаемых в таких реакциях ядер являются наиболее определенными и мало зависящими от модельных представлений. Во-вторых, высокая интенсивность и большая проникающая способность γ -излучения, получаемого на современных ускорителях электронов, позволяет достигать больших выходов исследуемых нуклидов.

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 . 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 взаимодействии электромагнитного излучения с ядрами.

Таблица 1. Спектроскопические характеристики изучаемых изотопов

Изотоп	Особенность	$T_{1/2}$, ч	$E\gamma$, кэВ	$I\gamma$, %
^{92}Sr	Заселение магнитных дипольных возбуждений при β -распаде	2,71	1383,93	0,9
^{97}Zr	Образование изомера с низким спином	16,91	743	0,93
^{97}Nb	Возбуждение электрических квадрупольных колебаний	1,2	658,8	0,98
$^{135}\text{I}^*$	Медицинский препарат для диагностики раковых опухолей	6,5	1260,4	0,289

Целью представленной работы является измерение абсолютных выходов ряда осколков и сечений реакций их образования при фотоделении ^{238}U 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-либо особенностями ядерной структуры (они отмечены в табл. 1).

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕТОДИКА

Измерения абсолютных выходов и сечений реакций фотоделений проводились на тормозном излучении электронов. Источником тормозного излучения являлся выведенный пучок электронов микротрона МТ-25 Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флерова ОИЯИ. Для этого пучок электронов направлялся на охлаждаемый водой вольфрамовый диск толщиной 2 мм (тормозную мишень), за которым располагался алюминиевый поглотитель толщиной 30 мм. Тормозная мишень служила также коллектором тока электронов, который измерялся с помощью интегратора электрического заряда. Прохождение диапазона энергий тормозного излучения от 10 до 22 МэВ происходило в три этапа, что было связано с конструктивными особенностями МТ-25: 22–19 МэВ, 19–14 МэВ, 14–10 МэВ.

Облучаемые мишени помещались на расстоянии 30 мм от алюминиевого поглотителя. В качестве производящей мишени использовался слой окиси урана (U_3O_8) толщиной 3 мг/см^2 , нанесенный на алюминиевую подложку толщиной 20 мкм. Вылетевшие из мишени осколки тормозились в сборниках. Время облучения в зависимости от энергии электронов менялось от 30 мин до 2 ч. После облучения сборники охлаждались от 3 до 5 ч.

Идентификация образующихся в реакциях (γ , f) осколков проводилась по их γ -излучению и периоду полураспада. Для изучения были выбраны четыре различных осколка, интересных с точки зрения их ядерной структуры (^{92}Sr , ^{97}Zr и ^{97}Nb) и практического применения (^{135}I). Их спектроскопические характеристики, а также особенности ядерной структуры и области возможного практического применения представлены в табл. 1. Спектры γ -излучения через выбранные промежутки времени измерялись Ge(Li)-детектором объемом 60 см^3 с разрешением 2,8 кэВ для линии 1332 кэВ ^{60}Co .

Для построения спектров тормозного излучения было использовано полиномиальное представление спектров тормозного излучения для электронов с энергией 10–20 МэВ [2]. Была разработана программа на языке Fortran. Алгоритм программы позволял получать спектры тормозного излучения с энергией γ -квантов от 1 МэВ до 0,95 (до 95 %) энергии электронов. С использованием полученных спектров, параметров электронного пучка [3] и углового

распределения тормозного излучения [4] были рассчитаны спектры γ -квантов, попадающих на мишени. Примеры рассчитанных спектров представлены на рис. 1.

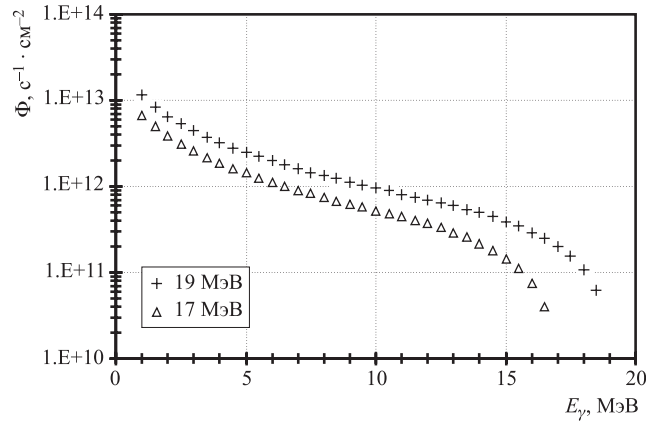


Рис. 1. Формы тормозного спектра при различных энергиях электронов

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

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:

$$\Upsilon = \frac{\lambda \cdot S}{\varepsilon \cdot K_\gamma} \cdot \frac{1}{(1 - e^{-\lambda t_1}) \cdot e^{-\lambda t_2} \cdot (1 - e^{-\lambda t_3})}, \quad (1)$$

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 числам попадающих на мишень γ -квантов тормозного излучения, — представлены в табл. 2.

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

Таблица 2. Выходы осколков деления [$\times 10^{-10}$ 1/e]

Осколки	Граничная энергия тормозного спектра, МэВ									
	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10
^{92}Sr	2,13	3,33	3,64	3,76	3,84	3,76	3,22	1,97	1,39	1,15
^{97}Zr	2,28	3,52	3,76	3,93	3,91	4,08	3,93	2,39	1,46	0,97
^{97}Nb	2,33	3,53	3,82	4,07	4,22	4,69	2	1,12	1,04	1,13
$^{135}\text{I}^*$	2,48	3,76	4,08	4,36	4,57	4,58	3,96	2,31	1,49	1,23
$^{135}\text{I}^{**}$	2,44	3,75	3,98	4,19	4,33	3,53	4,02	2,07	1,81	1,20
$^{135}\text{I}^{***}$	2,49	3,82	3,74	3,99	4,06	3,17	3,97	2,19	1,74	1,28

3. ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Измеренные зависимости выходов осколков от граничной энергии тормозного излучения позволили получить и аналогичные зависимости для сечений с образованием выбранных осколков функций возбуждения. Связь между этими характеристиками реакций определяется выражением

$$Y = N \int_{E_{th}}^{E_{max}} \sigma(E) \Phi(E) dE, \quad (2)$$

где N — количество ядер, содержащихся в мишени; $\sigma(E)$ — сечение фотоделения; $\Phi(E)$ — интенсивность потока γ -квантов в интервале энергий $E_{th} - E_{max}$; E_{max} — максимальная энергия γ -квантов; E_{th} — пороговая энергия фотоделения.

Измеренные зависимости выходов осколков от граничной энергии тормозного излучения представлены на рис. 2.

Из выражения (2) можно определить сечение реакции фотоделения в единичном интервале энергии γ -квантов

$$\sigma = \frac{Y_2 - Y_1}{N \left(\int_{E_{th}}^{E_2} \Phi_2(E) dE - \int_{E_{th}}^{E_1} \Phi_1(E) dE \right)}, \quad (3)$$

где Y_1, Y_2 — соответственно выходы фотоделения для выбранных интервалов энергии γ -квантов.

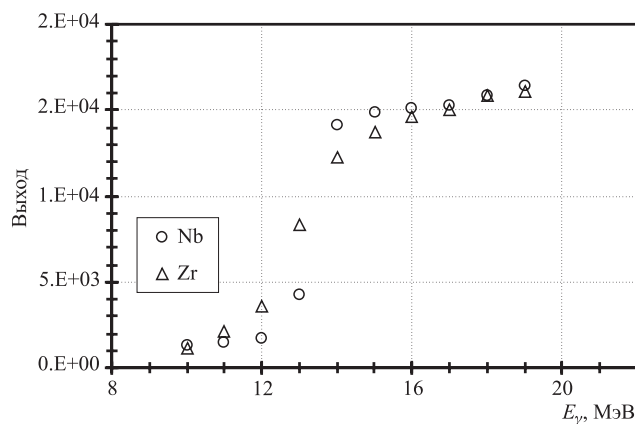


Рис. 2. Зависимости выходов реакции (γ , f) — числа образующихся осколков на 1 мкКи потока электронов от граничной энергии тормозного излучения для осколков ^{97}Zr и ^{97}Nb

Учитывая количество ядер, содержащихся в мишени, перепишем (3) в форме

$$\sigma = \frac{A \cdot (Y_2 - Y_1)}{N_A \cdot m \cdot \theta \cdot \left(\int_{E_{th}}^{E_2} \Phi_2(E) dE - \int_{E_{th}}^{E_1} \Phi_1(E) dE \right)}. \quad (4)$$

$$N = N_A \cdot \frac{m}{A} \cdot \theta, \quad (5)$$

где A — массовое число; N_A — постоянная Авогадро; m — масса мишени; θ — распространенность данного изотопа.

Рассчитанные таким образом абсолютные сечения в зависимости от граничной энергии тормозного излучения представлены на рис. 3. Они имеют вид кривой с максимумом, соответствующим энергии гигантского дипольного резонанса, а сечение в максимуме достигает нескольких мб.

Эти данные о сечениях и их зависимостях от энергии электронов могут быть использованы при планировании новых экспериментов с γ -излучением. Они позволят оптимизировать условия получения необходимых для исследований осколков деления.

В заключение авторы выражают благодарность С. Н. Дмитриеву (ОИЯИ) и Чан Дак Тхену (ИФЭ) за внимание к работе.

Работа поддержана РФФИ (грант 07-02-90005).

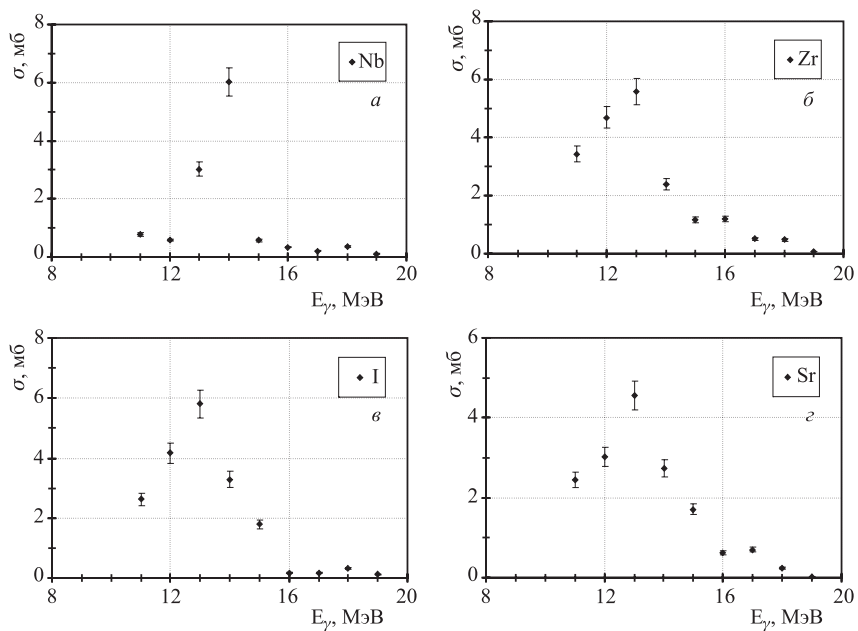


Рис. 3. Зависимости абсолютных сечений реакции (γ, f) от энергии γ -квантов для осколков: а — ^{97}Nb , б — ^{97}Zr , в — ^{135}I , з — ^{92}Sr

ЛИТЕРАТУРА

1. Ишханов Б. С., Капитонов И. М. Взаимодействие электромагнитного излучения с атомными ядрами. М.: Изд-во МГУ, 1979.
2. Жучко В. Е., Зен Чан Ук. ОИЯИ, 11-84-615. Дубна, 1984.
3. Капица С. П., Мелехин В. Н. Микротрон. М.: Наука, 1969.
4. Ковалев В. П. Вторичные излучения ускорителей электронов. М.: Атомиздат, 1979.

Получено 26 декабря 2007 г.

Редактор *М. И. Зарубина*

Подписано в печать 31.01.2008.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 0,56. Уч.-изд. л. 0,67. Тираж 270 экз. Заказ № 56043.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/