

Фоторасщепление ^{112}Cd С. С. Бельшев^{1,2,*}, Б. С. Ишханов^{1,2,†}, В. Н. Орлин^{2,‡}, К. А. Стопани^{2,§}, В. В. Ханкин^{2,¶}, Н. В. Шведунов^{2,**}¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
физический факультет, кафедра общей физики.

Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

²Научно-исследовательский институт ядерной физики МГУ имени М. В. Ломоносова.

Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 5

(Статья поступила 06.05.2013; подписана в печать 29.05.2013)

Представлены результаты измерений выходов реакций фоторасщепления изотопа ^{112}Cd , облученного тормозным излучением с максимальной энергией 55 МэВ. Полученные результаты сравниваются с теоретическими расчетами.

PACS: 24.30.Cz.

УДК:539.172.

Ключевые слова: фоторасщепление, кадмий, Cd.

1. ВВЕДЕНИЕ

Изучение фоторасщепления ядер, расположенных вблизи замкнутой протонной оболочки $Z=50$, представляет интерес, т.к. дает информацию о роли одночастичных возбуждений в низкорасположенных состояниях атомных ядер. Соотношение выходов различных каналов реакции зависит от механизма возбуждения и распада ядерных состояний в области энергий $\sim 10-50$ МэВ.

Целью настоящей работы является измерение выходов различных фотоядерных реакций на изотопе ^{112}Cd и сравнение полученных экспериментальных данных с результатами теоретических расчетов.

2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперимент выполнен на 55 МэВ разрезном микротроне РМ-55 [1]. Мишень представляла собой образец из обогащенного изотопа ^{112}Cd . Процентное содержание различных изотопов в исследуемой мишени приведено в табл. 1. Облучение проводилось на пучке тормозного излучения с максимальной энергией 55 МэВ. Тормозное излучение генерировалось в вольфрамовой мишени толщиной 2,2 мм. Исследуемая мишень в процессе облучения располагалась непосредственно за тормозной мишенью. Схема проведения эксперимента приведена на рис. 1.

Облучение мишени из обогащенного изотопа ^{112}Cd продолжалось 80 минут. Через 3 минуты после окончания облучения мишень была перенесена к детектору из сверхчистого германия и началось измере-

Таблица 1: Изотопный состав мишени из обогащенного ^{112}Cd

Изотоп Cd	Содержание изотопа, %
106	<0.01
108	<0.01
110	0.09
111	0.18
112	97.9
113	0.85
114	0.89
116	0.09

ние спектров γ -квантов остаточной активности образовавшихся изотопов.

Спектры γ -квантов остаточной активности облученной мишени измерялись в диапазоне энергий от 35 кэВ до 3,7 МэВ. Общая продолжительность измерения спектров составила 470 часов. Спектры γ -квантов записывались в память анализатора каждые 3,5 секунды. Предварительно шкала анализатора была откалибрована с помощью набора стандартных источников и получена зависимость эффективности регистрации γ -квантов детектором от энергии. Энергетическое разрешение HPGE-детектора составляло 0,8 кэВ для γ -квантов с энергией 150 кэВ и 1,9 кэВ для γ -квантов с энергией 1332 кэВ. На рис. 2 в качестве примера приводится часть спектра γ -квантов из облученной мишени, измеренного через 2 дня после окончания облучения в течение 6 дней. На спектре отмечены основные спектральные линии фотонуклонных распадов с испусканием нейтрона и с испусканием протона из ядра ^{112}Cd . В спектре γ -квантов было обнаружено ~ 50 максимумов, соответствующих образованию различных радиоактивных изотопов в облученной мишени. Анализ γ -спектров остаточной активности облученной мишени проводился по энергиям γ -квантов распадающихся изотопов и их периодам по-

*E-mail: belyshev@depni.sinp.msu.ru

†E-mail: bsi@depni.sinp.msu.ru

‡E-mail: orlinvn@yandex.ru

§E-mail: hatta@depni.sinp.msu.ru

¶E-mail: v-k32@yandex.ru

**E-mail: shvedunov@mail.ru

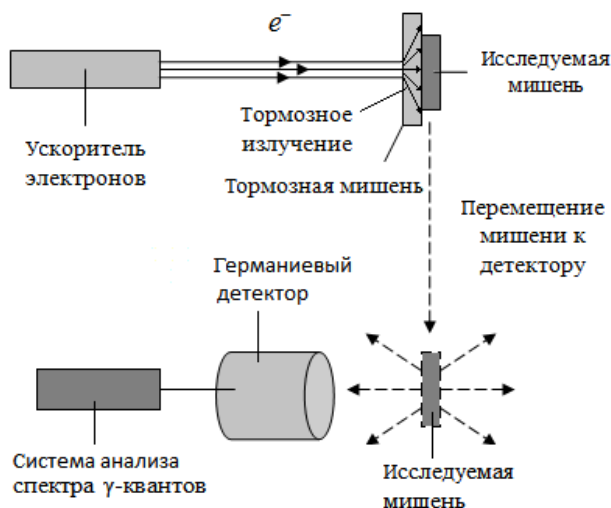


Рис. 1: Схема γ-активационного эксперимента

лураспада, с помощью ранее разработанной системы автоматического анализа спектров γ-квантов [2]. Выходы реакций $Y(T)$ рассчитывались по формуле

$$Y(T) = \frac{S_\gamma \ln 2}{T_{1/2} \varepsilon_\gamma I_\gamma f(t_{irr}, t_{pause}, t_{meas})},$$

где T — верхняя граница тормозного спектра ($T = 55$ МэВ), S_γ — количество γ-квантов зарегистрированных в максимумах спектров, ε_γ — эффективность регистрации детектором γ-квантов данной энергии, $T_{1/2}$ — период полураспада образующегося изотопа, I_γ — относительная доля γ-перехода, $f(t_{irr}, t_{pause}, t_{meas})$ — временной фактор, зависящий от времени облучения t_{irr} , времени между концом облучения и началом измерения t_{pause} , времени измерения t_{meas} , определяется соотношением:

$$f(t_{irr}, t_{pause}, t_{meas}) = (1 - \exp(-\lambda t_{irr})) \times \exp -\lambda t_{pause} (1 - \exp(-\lambda t_{meas})).$$

В результате анализа спектров γ-квантов были обнаружены радиоактивные изотопы, образующиеся в результате различных реакций на ^{112}Cd . При облучении изотопа ^{112}Cd γ-квантами с энергией до 55 МэВ, основные каналы распада гигантского дипольного резонанса (ГДР) $^{112}\text{Cd}(\gamma, n)^{111}\text{Cd}$ и $^{112}\text{Cd}(\gamma, 2n)^{110}\text{Cd}$ приводят к образованию стабильных изотопов $^{110,111}\text{Cd}$. Поэтому стало возможным наблюдать редкие моды распада:

1. Образование изомерного состояния ^{111}Cd ($E^* = 369, 2$ кэВ, $J^p = \frac{11}{2}^-$, $T_{1/2} = 48, 5$ мин) в результате реакции $^{112}\text{Cd}(\gamma, n)^{111}\text{Cd}^*$.
2. Образование основного состояния ^{111}Ag

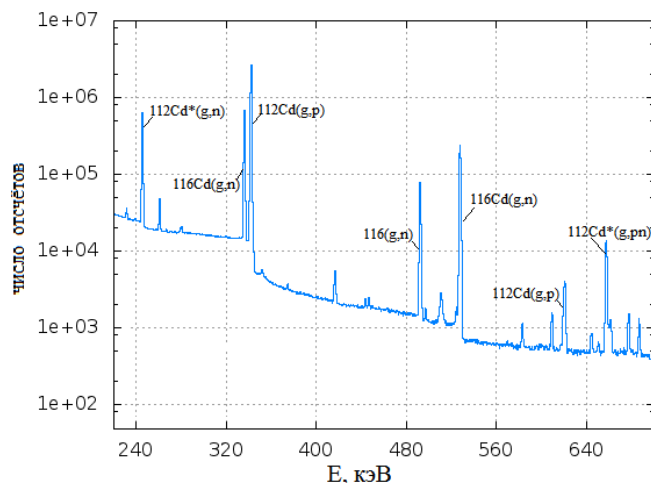


Рис. 2: Пример спектра γ-квантов облученной мишени через два дня после окончания облучения. Время измерения 6 суток

($J^p = \frac{1}{2}^-$, $T_{1/2} = 7, 45$ д.) в результате реакции $^{112}\text{Cd}(\gamma, p)^{111}\text{Ag}$.

3. Образование изомерного состояния ^{110}Ag ($E^* = 117, 6$ кэВ, $J^p = 1^+$, $T_{1/2} = 249, 76$ д.) в результате реакции $^{112}\text{Cd}(\gamma, pn)^{110}\text{Ag}^*$.

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Измерение выходов фотоядерных реакций на изотопе ^{112}Cd выполнено впервые.

Ранее на пучке квазимонохроматичных фотонов были измерены сечения реакций $\sigma(\gamma, n)$, $\sigma(\gamma, 2n)$ и сечение полного поглощения $\sigma(\gamma, sn) = \sigma(\gamma, n) + \sigma(\gamma, 2n)$ на естественной смеси изотопов кадмия [3].

Полученные результаты приведены на рис. 3. Здесь же для сравнения приведены сечения реакций $\sigma(\gamma, n)$, $\sigma(\gamma, 2n)$ и $\sigma(\gamma, sn)$, рассчитанные для изотопа ^{112}Cd по программе TALYS [5] и на основе комбинированной модели (КМ) [4]. Во всех случаях наблюдается удовлетворительное описание экспериментальных данных.

Фотонуклонные реакции для изотопа ^{112}Cd имеют лишь несколько сильных линий в γ-спектре, что позволяет, несмотря на малое содержание изотопа ^{116}Cd , наблюдать в спектре также наиболее интенсивные линии $^{116}\text{Cd}(\gamma, n)^{115}\text{Cd}$, и $^{116}\text{Cd}(\gamma, n)^{115}\text{Cd}^*$.

Расчеты сечений для каналов (γ, n) , $(\gamma, 2n)$, (γ, sn) и (γ, p) в моделях [4, 5] для изотопов ^{112}Cd и ^{116}Cd представлены на рис. 4. Как видно из рисунка, для фотонейтронных каналов имеется хорошее совпадение между моделями. Также из рисунка видно, что с изменением массового числа A сечения меняются мало. Сечение в максимуме ГДР расположено в области 15 МэВ и совпадает с положением пиков сечений

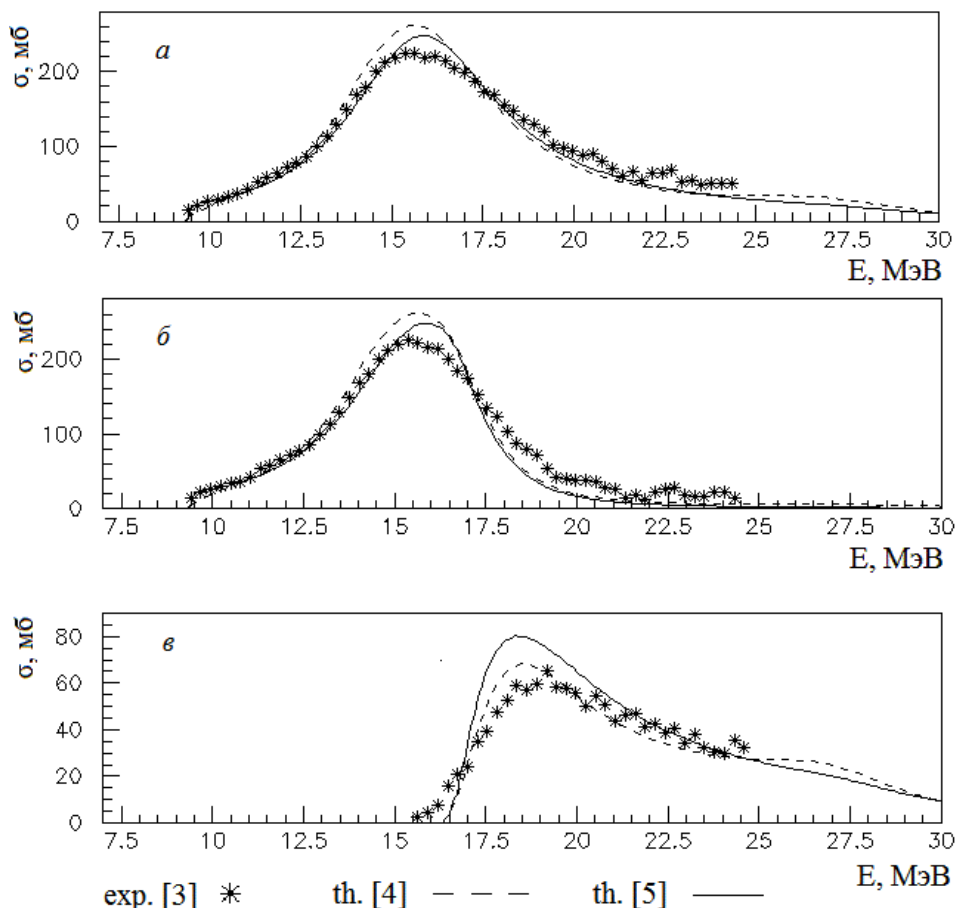


Рис. 3: Сравнение экспериментальных данных, полученных на естественной смеси [3] и теоретических расчетов [4, 5] для сечений реакций на ^{112}Cd : а) (γ, sn) , б) (γ, n) и в) $(\gamma, 2n)$

(γ, n) . Максимум $2n$ сдвинут в область 18 МэВ и поэтому результат анализа сильно зависит от разделения каналов с различной множественностью испускаемых нейтронов. Однако максимум $(\gamma, 2n)$ для ^{116}Cd находится при больших значениях по сравнению с ^{112}Cd . Это объясняется более высоким порогом реакции для ^{112}Cd (см. табл. 2).

Таблица 2: Пороги фотонуклонных реакций изотопов $^{112,116}\text{Cd}$, МэВ

Изотоп	γ, n	$\gamma, 2n$	$\gamma, 3n$	γ, p	γ, pn
^{112}Cd	9.2	15.2	24.6	9.4	17.8
^{116}Cd	8.1	13.7	22.2	10.7	18.3

На основе моделей [4, 5] используя соотношение

$$Y(T) = \alpha \int_{E_{tr}}^{55 \text{ МэВ}} \sigma(E)W(T, E)dE$$

где E_{tr} — пороговая энергия для данной реакции, $\sigma(E)$ — сечение реакции, были рассчитаны выходы реакций $^{112}\text{Cd}(\gamma, n)^{111}\text{Cd}^*$,

$^{112}\text{Cd}(\gamma, p)^{111}\text{Ag}$, $^{112}\text{Cd}(\gamma, pn)^{110}\text{Ag}^*$, $^{116}\text{Cd}(\gamma, n)^{115}\text{Cd}$ и $^{116}\text{Cd}(\gamma, n)^{115}\text{Cd}^*$.

Тормозной спектр $W(T, E)$ был рассчитан по программе GEANT для вольфрамовой мишени толщиной 2,2 мм [6].

Полученные результаты приведены в табл. 3. В первом столбце табл. 3 приведена реакция, в которой образовался соответствующий изотоп. Во втором столбце приведены пороги реакций, в третьем столбце — число линий в спектре γ -квантов, по которому идентифицировалась каждая реакция. В четвертом столбце — выходы реакций, отнормированные на суммарный выход реакции $^{116}\text{Cd}(\gamma, n)^{115}\text{Cd}$ в основном и изомерном состояниях. В пятом столбце — результаты расчета на основе КМ [4]. В шестом столбце приведены результаты расчета по программе TALYS [5].

В модели [4] нельзя рассчитывать отдельно каналы распада в основное и изомерное состояния. Для каналов $^{112}\text{Cd}(\gamma, n)$ и $^{112}\text{Cd}(\gamma, pn)$ можно видеть только распады в изомерные состояния, поэтому для данных каналов нет оценки по модели [4].

Расчет выхода реакции с образованием протонов в конечном состоянии в программе TALYS [5] да-

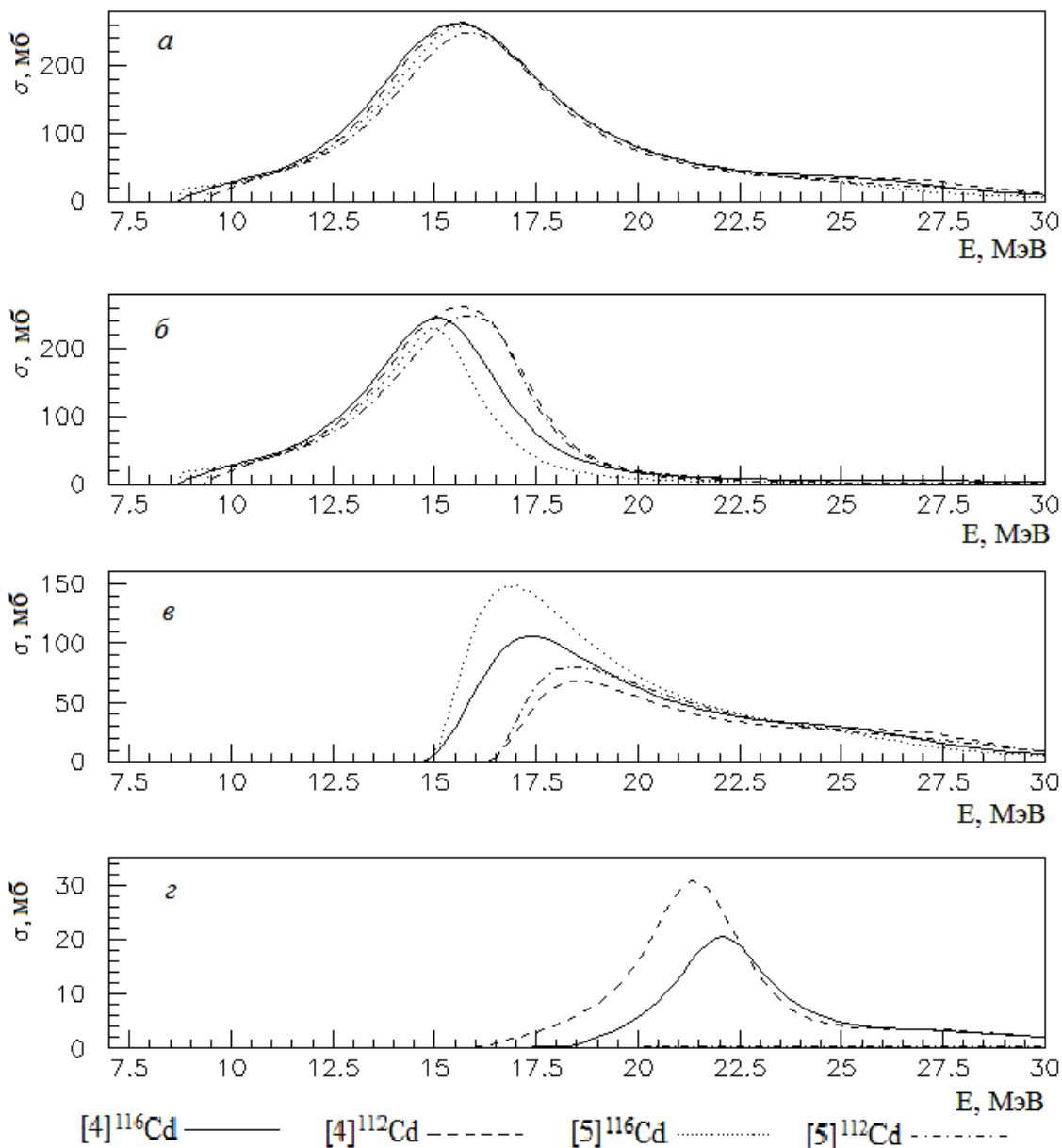


Рис. 4: Рассчитанные по моделям [4, 5] сечения фотонуклонных реакций для изотопов $^{112,116}\text{Cd}$: а) (γ,sn) , б) (γ,n) , в) $(\gamma,2n)$, г) (γ,p)

ет на порядок заниженное по сравнению с комбинированной моделью [4] сечения. Причина в том, что в программе TALYS не учитываются особенности распада состояний гигантского резонанса с изоспином $T_{>} = T_0 + 1$ ($T_0 = 8$ — изоспин основного состояния ядра ^{112}Cd). Распад состояния $T_{>}$ по нейтронному каналу на низколежащие состояния ядра ^{111}Cd запрещен правилами отбора по изоспину. Поэтому распад состояния $T_{>}$ в ядре ^{112}Cd происходит преимущественно с испусканием протонов, что увеличивает выход реакций (γ,p) с протоном в конечном состоянии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые обнаружены распады $^{112}\text{Cd}(\gamma,n)^{111}\text{Cd}^*$, $^{112}\text{Cd}(\gamma,p)^{111}\text{Ag}$, $^{112}\text{Cd}(\gamma,pn)^{110}\text{Ag}^*$. Данные для фотонейтронных каналов хорошо описываются в модели [5], а для канала (γ,p) — в КМ [4]. Канал (γ,pn) имеет высокий порог реакции, а также в тормозном спектре в данной области энергий относительно мало фотонов, этим объясняется небольшой полученный выход данной реакции.

Таблица 3: Пороги, выходы и теоретические расчеты [4, 5] реакций изотопов $^{112,116}\text{Cd}$

Реакция	Порог реакции, МэВ	Количество линий в спектре [†]	Относительный выход реакции		
			Эксперимент	Расчет [4]	Расчет [5]
$^{116}\text{Cd}(\gamma, n)^{115}\text{Cd}$	8.1	4	0.87		0.866
$^{116}\text{Cd}(\gamma, n)^{115}\text{Cd}^*$	8.3	1	0.13	1	0.134
$^{112}\text{Cd}(\gamma, n)^{111}\text{Cd}^*$	9.2	2	0.13	-	0.077
$^{112}\text{Cd}(\gamma, p)^{111}\text{Ag}$	9.4	2	0.029	0.052	0.0022
$^{112}\text{Cd}(\gamma, pn)^{110}\text{Ag}^*$	17.8	15	0.00049	-	0.0003

[†]Количество линий, по которым проводился анализ выходов

- [1] *Karev A. I., Lebedev A. N., Raevsky V.G. et al.* XXII Russian Particle Accelerator Conference RuPAC-2010, Contributions to the Proceedings (Protvino, Russia, RuPAC-2010). P. 316
- [2] *Бельшев С. С., Стопани К. А., Кузнецов А. А. и др.* Вестн. Моск. Ун-та. Физ. Астрон. №4. С. 42. (2011).
- [3] *Lepretre, A., Veil H., Bergere R. et al.* Nucl. Phys. A **219**, 39 (1974).
- [4] *Ишханов Б. С., Орлин В. Н.* ЯФ **74**, 21 (2011) [Phys. Atom. Nucl. **74**, 19 (2011)]
- [5] *Konig A. J., Hilaive S. and Duijvestijn M. C.* Proceedings of the International Conference on Nuclear data for Science and Technology, April 22-27, 2007, (Ed. by *Bersillon O., Crunring F., Bango E., et al.*, EDP Sciences) (Nice, France, 2008), P. 211.
- [6] *Agostinelli S., Allison J., Amako K., et al.* Nucl. Instrum. Methods A **506**, 250 (2003).

^{112}Cd isotope photodisintegration

S. S. Belyshev^{1,2,a}, B. S. Ishkhanov^{1,2,b}, V. N. Orlin^{2,c}, K. A. Stopani^{2,d}, V. V. Khankin^{2,e}, N. V. Shvedunov^{2,f}

¹*Department of General Nuclear Physics, Faculty of Physics, M.V.Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia*

²*Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow 119191, Russia*
E-mail: ^abelyshev@depni.sinp.msu.ru, ^bbsi@depni.sinp.msu.ru, ^corlinvn@yandex.ru, ^dhatta@depni.sinp.msu.ru, ^ev-k32@yandex.ru, ^fshvedunov@mail.ru

The results of measurements of reaction yields for photodisintegration of ^{112}Cd isotope, irradiated by bremsstrahlung radiation with maximal energy 55 MeV are presented in current work. Obtained results are compared with theoretical calculations.

PACS: 24.30.Cz.

Keywords: photodisintegration, cadmium, Cd.

Received 06 May 2013.

Сведения об авторах

1. Бельшев Сергей Сергеевич — младший научный сотрудник; тел.: (495) 939-25-58, e-mail: belyshev@depni.sinp.msu.ru
2. Ишханов Борис Саркисович — докт. физ.-мат. наук, заведующий лабораторией, заведующий отделом; тел.: (495) 939-50-95, e-mail: bsi@depni.sinp.msu.ru
3. Орлин Вадим Николаевич — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, тел.: (495) 939-56-31, e-mail: orlinvn@yandex.ru
4. Стопани Константин Александрович — младший научный сотрудник; тел.: (495) 939-65-35, e-mail: hatta@depni.sinp.msu.ru
5. Ханкин Вадим Валерьевич — ведущий инженер, тел.: (495) 939-24-51, e-mail: v-k32@yandex.ru
6. Шведунов Николай Васильевич — младший научный сотрудник, тел.: (495) 939-24-51, shvedunov@mail.ru