

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

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

<sup>2</sup>Научно-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  $^{112}\text{Cd}$ , 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  $^{112}\text{Cd}$  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  $^{112}\text{Cd}$ . 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  $^{112}\text{Cd}$  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  $^{112}\text{Cd}$ 

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  $\gamma$ -квантов остаточной активности образовавшихся изотопов.

Спектры  $\gamma$ -квантов остаточной активности облученной мишени измерялись в диапазоне энергий от 35 кэВ до 3,7 МэВ. Общая продолжительность измерения спектров составила 470 часов. Спектры  $\gamma$ -квантов записывались в память анализатора каждые 3,5 секунды. Предварительно шкала анализатора была откалибрована с помощью набора стандартных источников и получена зависимость эффективности регистрации  $\gamma$ -квантов детектором от энергии. Энергетическое разрешение HPGE-детектора составляло 0,8 кэВ для  $\gamma$ -квантов с энергией 150 кэВ и 1,9 кэВ для  $\gamma$ -квантов с энергией 1332 кэВ. На рис. 2 в качестве примера приводится часть спектра  $\gamma$ -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  $^{112}\text{Cd}$ . В спектре  $\gamma$ -квантов было обнаружено  $\sim 50$  максимумов, соответствующих образованию различных радиоактивных изотопов в облученной мишени. Анализ  $\gamma$ -спектров остаточной активности облученной мишени проводился по энергиям  $\gamma$ -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

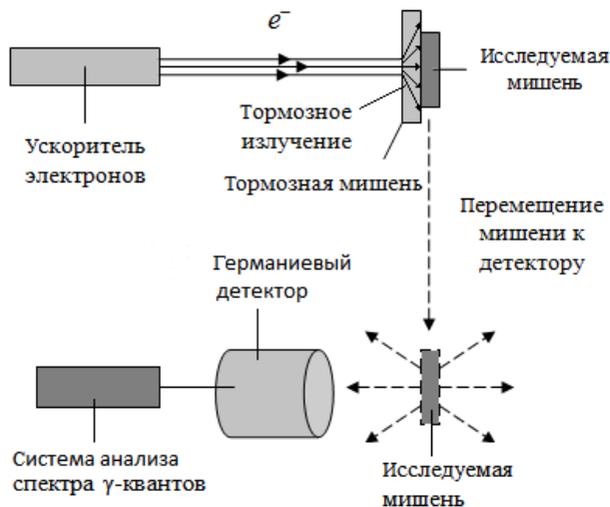


Рис. 1: Схема γ-активационного эксперимента

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),  $S_\gamma$  — количество γ-квантов зарегистрированных в максимумах спектров,  $\varepsilon_\gamma$  — эффективность регистрации детектором γ-квантов данной энергии,  $T_{1/2}$  — период полураспада образующегося изотопа,  $I_\gamma$  — 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  $^{112}\text{Cd}$ . При облучении изотопа  $^{112}\text{Cd}$  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  $^{111}\text{Cd}$  ( $E^* = 369, 2$  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  $^{111}\text{Ag}$

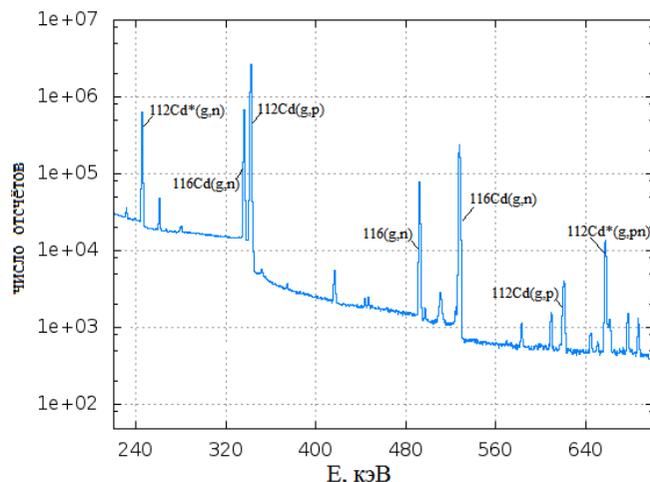


Рис. 2: Пример спектра γ-квантов облученной мишени через два дня после окончания облучения. Время измерения 6 суток

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

3. Образование изомерного состояния  $^{110}\text{Ag}$  ( $E^* = 117, 6$  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  $^{112}\text{Cd}$  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  $^{112}\text{Cd}$  по программе TALYS [5] и на основе комбинированной модели (КМ) [4]. Во всех случаях наблюдается удовлетворительное описание экспериментальных данных.

Фотонуклонные реакции для изотопа  $^{112}\text{Cd}$  имеют лишь несколько сильных линий в γ-спектре, что позволяет, несмотря на малое содержание изотопа  $^{116}\text{Cd}$ , 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  $(\gamma, n)$ ,  $(\gamma, 2n)$ ,  $(\gamma, sn)$  и  $(\gamma, p)$  в моделях [4, 5] для изотопов  $^{112}\text{Cd}$  и  $^{116}\text{Cd}$  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

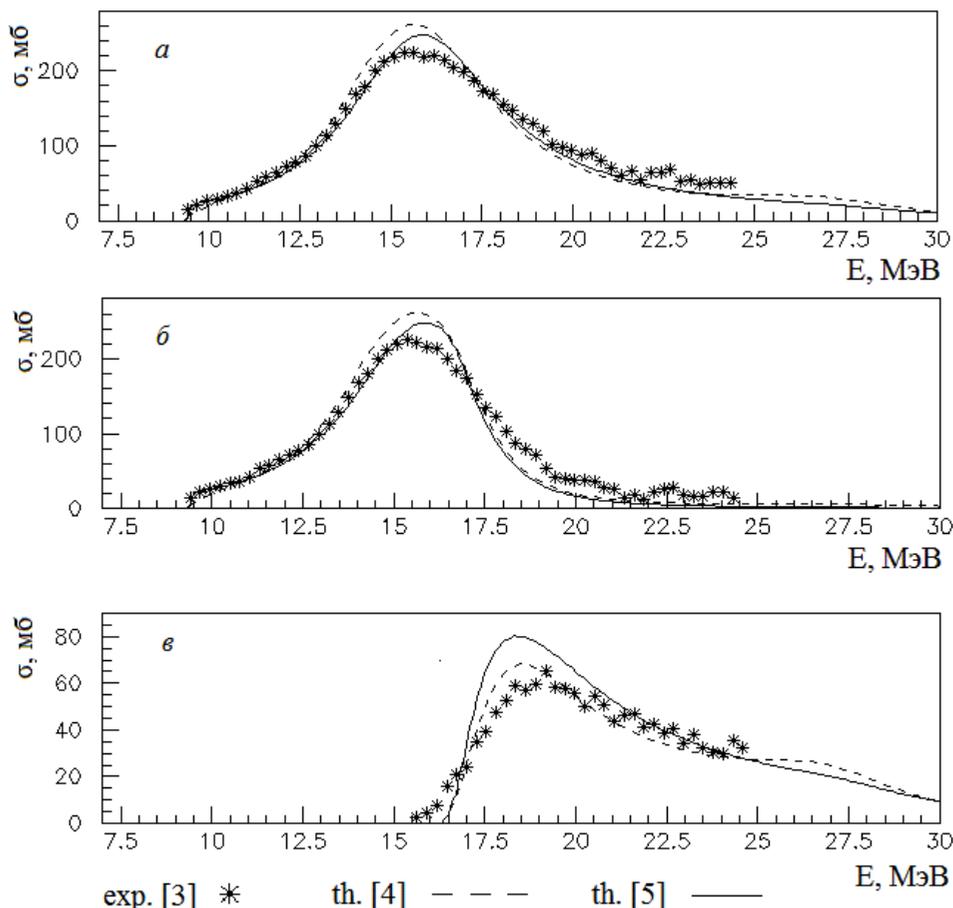


Рис. 3: Сравнение экспериментальных данных, полученных на естественной смеси [3] и теоретических расчетов [4, 5] для сечений реакций на <sup>112</sup>Cd: а) (γ,sn), б) (γ,n) и в) (γ,2n)

(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 (γ, 2n) для <sup>116</sup>Cd находится при больших значениях по сравнению с <sup>112</sup>Cd. Это объясняется более высоким порогом реакции для <sup>112</sup>Cd (см. табл. 2).

Таблица 2: Пороги фотонуклонных реакций изотопов <sup>112,116</sup>Cd, МэВ

Изотоп	γ, n	γ, 2n	γ, 3n	γ, p	γ, pn
<sup>112</sup> Cd	9.2	15.2	24.6	9.4	17.8
<sup>116</sup> 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 <sup>112</sup>Cd(γ, n)<sup>111</sup>Cd\*,

<sup>112</sup>Cd(γ, p)<sup>111</sup>Ag, <sup>112</sup>Cd(γ, pn)<sup>110</sup>Ag\*, <sup>116</sup>Cd(γ, n)<sup>115</sup>Cd и <sup>116</sup>Cd(γ, n)<sup>115</sup>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 <sup>116</sup>Cd(γ, n)<sup>115</sup>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 <sup>112</sup>Cd(γ, n) и <sup>112</sup>Cd(γ, 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-

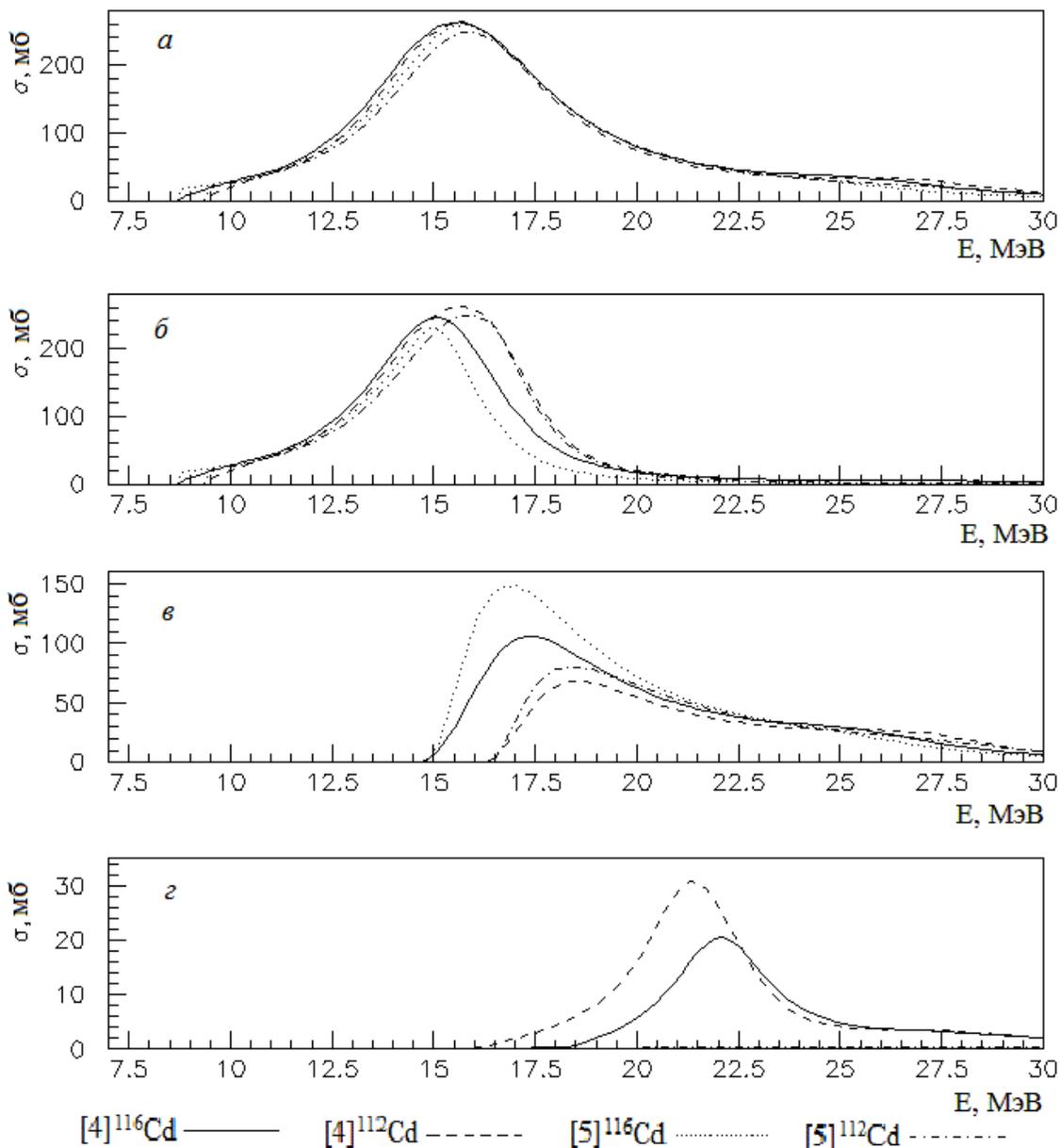


Рис. 4: Рассчитанные по моделям [4, 5] сечения фотонуклонных реакций для изотопов  $^{112,116}\text{Cd}$ : а)  $(\gamma,sn)$ , б)  $(\gamma,n)$ , в)  $(\gamma,2n)$ , г)  $(\gamma,p)$

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  $^{112}\text{Cd}$ ). Распад состояния  $T_{>}$  по нейтронному каналу на низколежащие состояния ядра  $^{111}\text{Cd}$  запрещен правилами отбора по изоспину. Поэтому распад состояния  $T_{>}$  в ядре  $^{112}\text{Cd}$  происходит преимущественно с испусканием протонов, что увеличивает выход реакций  $(\gamma,p)$  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  $(\gamma,p)$  — в КМ [4]. Канал  $(\gamma,pn)$  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 <sup>†</sup>	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

<sup>†</sup>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).

### $^{112}\text{Cd}$ isotope photodisintegration

S. S. Belyshev<sup>1,2,a</sup>, B. S. Ishkhanov<sup>1,2,b</sup>, V. N. Orlin<sup>2,c</sup>, K. A. Stopani<sup>2,d</sup>, V. V. Khankin<sup>2,e</sup>, N. V. Shvedunov<sup>2,f</sup>

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

<sup>2</sup>*Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow 119191, Russia*  
*E-mail: <sup>a</sup>belyshev@depni.sinp.msu.ru, <sup>b</sup>bsi@depni.sinp.msu.ru, <sup>c</sup>orlinvn@yandex.ru, <sup>d</sup>hatta@depni.sinp.msu.ru, <sup>e</sup>v-k32@yandex.ru, <sup>f</sup>shvedunov@mail.ru*

The results of measurements of reaction yields for photodisintegration of  $^{112}\text{Cd}$  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