

Фоторасщепление изотопа  $^{124}\text{Sn}$ В. В. Варламов<sup>1</sup>, Б. С. Ишханов<sup>1,2</sup>, А. А. Кузнецов<sup>1</sup>, В. Н. Орлин<sup>1</sup>, А. А. Просняков<sup>2\*</sup><sup>1</sup>Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобелыцина МГУ имени М. В. Ломоносова. Россия, 119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2<sup>2</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра общей ядерной физики. Россия, 119991, ГСП-2, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

(Статья поступила 20.02.2018; Подписана в печать 13.03.2018)

В работе на основе экспериментально-теоретического подхода получены оцененные сечения фотонейтронных реакций на изотопе  $^{124}\text{Sn}$ . Переходные функции множественности, использованные в процедуре оценки, рассчитаны на основе комбинированной модели фотонуклонных реакций (КМФР) и программы TALYS. Исследовано влияние параметров выбранных моделей на оцененные сечения фотонейтронных реакций.

PACS: 25.20.-x. УДК: 539.172.3.

Ключевые слова: фотоядерные реакции, оцененные сечения, модели атомных ядер.

## ВВЕДЕНИЕ

Особенности фоторасщепления изотопов Sn привлекают повышенный интерес, т.к. эти изотопы имеют магическое число протонов  $Z = 50$ , что соответствует в одночастичной модели оболочек заполнению ядерного состояния  $1g_{9/2}$ . Число нейтронов в ядре изменяется в широких пределах от самого легкого известного изотопа  $^{99}\text{Sn}$  ( $N = 49$ ) до самого тяжелого  $^{137}\text{Sn}$  ( $N = 87$ ), что соответствует заполнению нейтронами одночастичных состояний  $1g_{7/2}$ ,  $2d_{5/2}$ ,  $2d_{3/2}$ ,  $3s_{1/2}$ ,  $1h_{11/2}$ . Согласно одночастичной модели оболочек в изотопе  $^{124}\text{Sn}$  последние нейтроны начинают заполнять подоболочку  $1h_{11/2}$ . Эти особенности одночастичной модели оболочек однозначно сказываются на особенностях фоторасщепления изотопа  $^{124}\text{Sn}$  в области энергий Гигантского Дипольного Резонанса (ГДР).

## 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

ГДР на изотопе  $^{124}\text{Sn}$  был исследован в экспериментах на пучках тормозного  $\gamma$ -излучения [1] и квази-моноэнергетических аннигиляционных фотонов в Ливерморе (США) [2] и Сакле (Франция) [3]. Основными каналами распада изотопа  $^{124}\text{Sn}$  являются реакции с испусканием нейтронов и протонов. При этом доминируют каналы реакций с испусканием нейтронов. Каналы реакций с протоном в конечном состоянии составляют менее 5% интегрального сечения. В табл. I приведены пороги основных каналов реакций в области ГДР на изотопе  $^{124}\text{Sn}$ .

Методика проведения измерения сечений фотоядерных реакций подробно описывалась ранее [4]. Полные и парциальные сечения реакций, полученные на

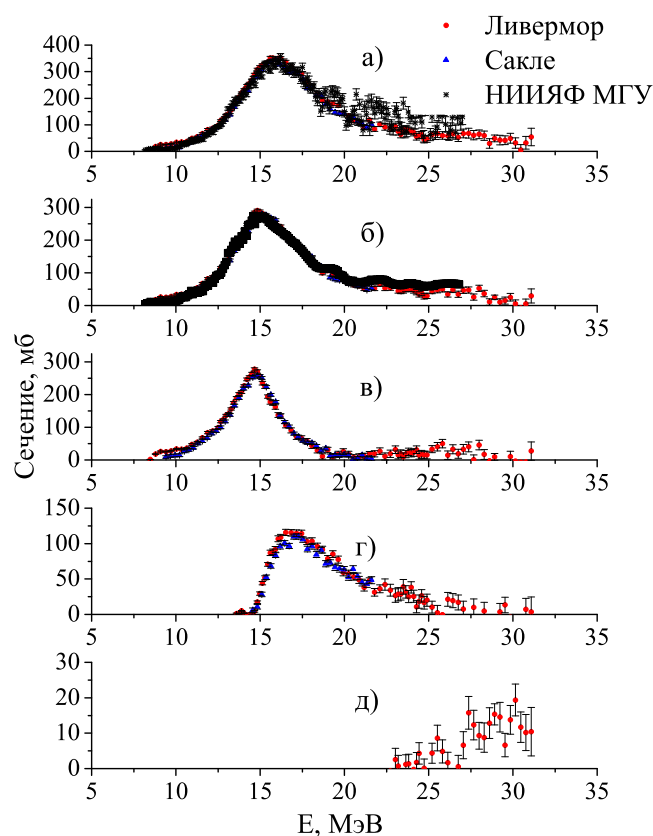


Рис. 1: Сечения реакций: а —  $\sigma(\gamma, Xn)$ , б —  $\sigma(\gamma, Sn)$ , в —  $\sigma(\gamma, 1n)$ , г —  $\sigma(\gamma, 2n)$ , д) —  $\sigma(\gamma, 3n)$ , измеренные в Ливерморе [2], Сакле [3] и НИИЯФ МГУ (Москва) [5]

пучках тормозного излучения квази-моноэнергетических аннигиляционных фотонов, приведены на рис. 1. В табл. II приведены полученные в этих экспериментах результаты.

Сравнивая результаты экспериментов Сакле [3] и Ливермора [2], следует учитывать, что первые получены в диапазоне энергий от порога реакций до

\*E-mail: [aa.prosnyakov@physics.msu.ru](mailto:aa.prosnyakov@physics.msu.ru)

Таблица I: Пороги фотоядерных реакций на изотопе  $^{124}\text{Sn}$

Реакция	$(\gamma, 1n)$	$(\gamma, 2n)$	$(\gamma, 1p)$	$(\gamma, 1p1n)$	$(\gamma, 3n)$
$E_{\text{порог}}, \text{МэВ}$	8.5	14.4	12.1	20.0	23.2

Таблица II: Полные и парциальные сечения фотонейтронных реакций на изотопе  $^{124}\text{Sn}$  в области энергий ГДР:  $E_m$  — положение максимума сечения,  $\sigma_m$  — сечение в максимуме,  $\Gamma$  — ширина сечения,  $E_{\gamma\text{max}}$  — верхняя граница энергии облучения,  $\sigma_{\text{int}}$  — интегральное сечение

Реакция	$E_m, \text{МэВ}$	$\sigma_m, \text{мб}$	$\Gamma, \text{мб}$	$E_{\gamma\text{max}}, \text{МэВ}$	$\sigma_{\text{int}}, \text{МэВмб}$	Ссылка
$(\gamma, Xn)$	16.2	340	9.0	31.10	2790	[2]
$(\gamma, Xn)$	15.92	344.9	5.5	21.60	2060	[3]
$(\gamma, Xn)$	15.601	351.48	5.5	27.00	2900	[5]
$(\gamma, Sn)$	15.2	270	5.5	31.10	2010	[2]
$(\gamma, Sn)$	15.1	278.8	5.0	22.70	1558	[3]
$(\gamma, Sn)$	14.827	290.090	4.5	27.00	1440	[5]
$(\gamma, 1n)$	14.83	257.6	3.5	21.60	1056	[2]
$(\gamma, 1n)$	14.672	272.52	3.5	31.10	1285	[3]
$(\gamma, 2n)$	17.27	110	5	21.60	502	[2]
$(\gamma, 2n)$	16.53	115.750	5.5	31.10	670	[3]
$(\gamma, 3n)$	30.157	19.36	>7.0	31.10	55	[2]

21.6 МэВ, в то время, как вторые получены в более широком диапазоне энергий  $\gamma$ -квантов до 31.1 МэВ.

Полное сечение поглощения  $\gamma$ -квантов в области энергий ГДР:

$$\sigma(\gamma, \text{abs}) \approx \sigma(\gamma, Sn) = \sigma(\gamma, 1n) + \sigma(\gamma, 2n) + \sigma(\gamma, np) + \sigma(\gamma, 3n). \quad (1)$$

На практике обычно измеряется сечение выхода реакции:

$$\sigma(\gamma, Xn) = \sigma(\gamma, 1n) + 2\sigma(\gamma, 2n) + \sigma(\gamma, np) + 3\sigma(\gamma, 3n). \quad (2)$$

В целом можно отметить хорошее согласие в сечениях реакции  $(\gamma, Xn)$ , измеренных на пучках квазимоноэнергетических фотонов. Некоторое различие наблюдается в области энергий выше 18 МэВ. В этой области в эксперименте на пучке тормозного излучения в сечении наблюдаются отдельные резонансы, которые проявляются и в квазимоноэнергетических экспериментах, однако гораздо менее отчетливо.

На рис. 1, б, в, г показаны сечения реакций  $\sigma(\gamma, Sn)$ ,  $\sigma(\gamma, 1n)$ ,  $\sigma(\gamma, 2n)$ , извлеченные из измерений на квазимоноэнергетических фотонах. В целом эти сечения также согласуются между собой. Однако сечение реакции  $\sigma(\gamma, 1n)$  в области энергий 17 – 21 МэВ, измеренное в Ливерморе [2], превышает на ~ 20% сечение, измеренное в Сакле [3], в то время как сечение реакции  $\sigma(\gamma, 2n)$  в Ливерморе [2] на столько же меньше соответствующего сечения, измеренного в Сакле [3].

## 2. ОЦЕНЕННЫЕ СЕЧЕНИЯ ФОТОЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ

В работах [6-8] было показано, что указанные различия в сечениях обусловлены недостаточно достоверным определением вкладов различных каналов реакций из-за систематических погрешностей использованного метода разделения нейтронов по множественности и зависимости эффективности регистрации нейтронов, образующихся в реакциях  $(\gamma, 1n)$ ,  $(\gamma, 2n)$  и  $(\gamma, 3n)$  от их энергии.

Для анализа и оценки сечений реакций различной множественности в работах [9, 10] был развит экспериментально-теоретический метод получения оцененных сечений таких реакций. Для этого получают  $F^{\text{теор}}$ -функции, описывающие отношения теоретически рассчитанных сечений реакций  $\sigma(\gamma, 1n)$ ,  $\sigma(\gamma, 2n)$ ,  $(\gamma, 3n)$  к теоретически рассчитанному сечению выхода реакции  $\sigma(\gamma, Xn)$ :

$$\begin{aligned} F_1^{\text{теор}} &= \frac{\sigma^{\text{теор}}(\gamma, 1n)}{\sigma^{\text{теор}}(\gamma, Xn)}, \\ F_2^{\text{теор}} &= \frac{\sigma^{\text{теор}}(\gamma, 2n)}{\sigma^{\text{теор}}(\gamma, Xn)}, \\ F_3^{\text{теор}} &= \frac{\sigma^{\text{теор}}(\gamma, 3n)}{\sigma^{\text{теор}}(\gamma, Xn)}. \end{aligned} \quad (3)$$

$F^{\text{теор}}$ -функции могут быть рассчитаны на основе различных моделей. В частности, на рис. 2–3 показаны результаты таких расчетов для:

- комбинированной модели фотонуклонных реакций (КМФР) [10],
- модели TALYS [11].

На рис. 2 показано сравнение сечений реакции выхода  $\sigma(\gamma, Xn)$ , рассчитанных в моделях КМФР [10] и TALYS [11], с экспериментально измеренным в Ливерморе сечением.

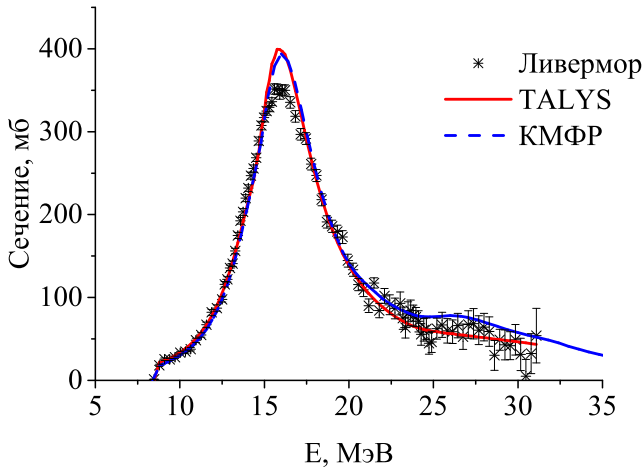


Рис. 2: Сравнение сечения реакции  $\sigma(\gamma, Xn)$ , измеренного в Ливерморе [2], с результатами теоретических расчетов на основе КМФР [10] и TALYS [11]

Как показали результаты расчетов, несмотря на некоторое различие теоретически рассчитанных сечений реакции выхода  $(\gamma, Xn)$ , оба подхода хорошо описывают нейтронные каналы распада ГДР (рис. 3).

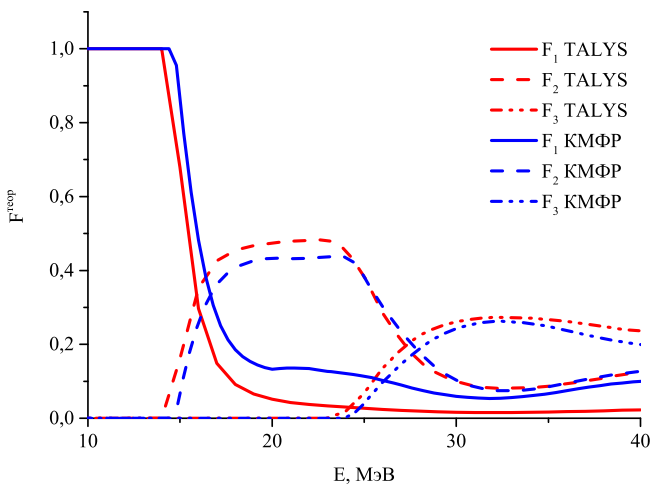


Рис. 3: Рассчитанные  $F_{1,2,3}^{\text{теор}}$ -функции на основе моделей КМФР [10] и TALYS [11]

На основе теоретически рассчитанных  $F_i^{\text{теор}}$ -функций ( $i = 1, 2, 3$ ) и экспериментального сечения выхода  $\sigma^{\text{эксп}}(\gamma, Xn)$  были оценены сечения реакций  $\sigma^{\text{оцен}}(\gamma, 1n)$ ,  $\sigma^{\text{оцен}}(\gamma, 2n)$ ,  $\sigma^{\text{оцен}}(\gamma, 3n)$ , показан-

ные на рис. 4:

$$\begin{aligned} \sigma^{\text{оцен}}(\gamma, 1n) &= F_1^{\text{теор}} \sigma^{\text{эксп}}(\gamma, Xn), \\ \sigma^{\text{оцен}}(\gamma, 2n) &= F_2^{\text{теор}} \sigma^{\text{эксп}}(\gamma, Xn), \\ \sigma^{\text{оцен}}(\gamma, 3n) &= F_3^{\text{теор}} \sigma^{\text{эксп}}(\gamma, Xn). \end{aligned} \quad (4)$$

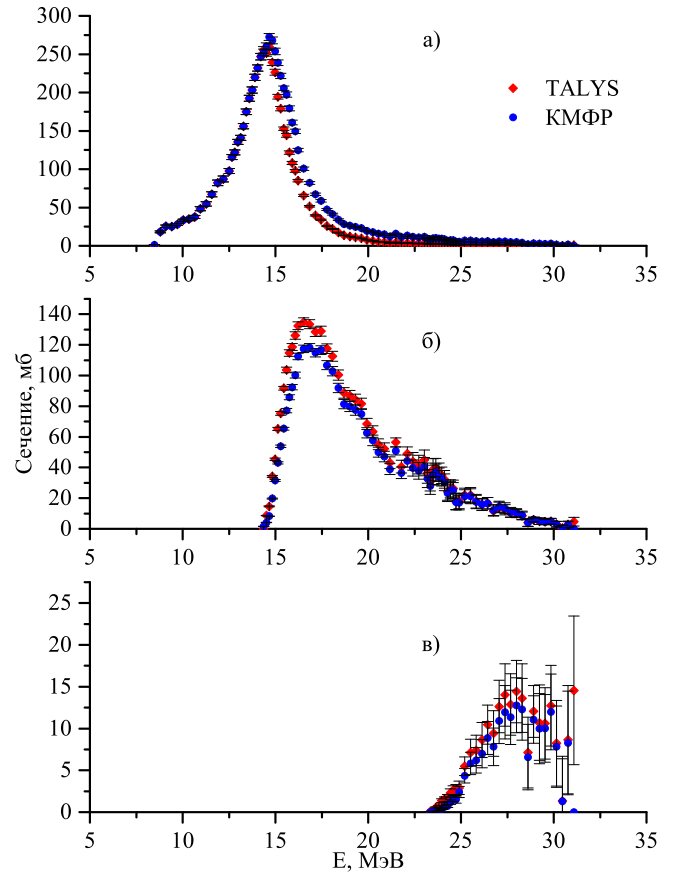


Рис. 4: Оцененные сечения реакций: а —  $\sigma^{\text{оцен}}(\gamma, 1n)$ , б —  $\sigma^{\text{оцен}}(\gamma, 2n)$ , в —  $\sigma^{\text{оцен}}(\gamma, 3n)$ , полученные с использованием отношений  $F_i^{\text{теор}}$ , рассчитанных на основе моделей КМФР [10] и TALYS [11]

В табл. III приведены основные характеристики оцененных сечений реакций  $(\gamma, Sn)$ ,  $(\gamma, 1n)$ ,  $(\gamma, 2n)$ ,  $(\gamma, 3n)$  на ядре  $^{124}\text{Sn}$  в области энергий до 31.1 МэВ, полученные на основе экспериментальных данных для сечения реакции выхода  $(\gamma, Xn)$ , измеренного в Ливерморе.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проанализированы сечения парциальных фотонейтронных реакций на изотопе  $^{124}\text{Sn}$ . На основе выполненного анализа и теоретического анализа в рамках различных моделей описания Гигантского Дипольного Резонанса показано, что экспериментальное сечение реакции  $(\gamma, 1n)$ , полученное в Сакле [3], приблизительно на 20% превышает сечение,

Таблица III: Основные характеристики оцененных сечений на ядре  $^{124}\text{Sn}$ , рассчитанные до энергии 31.1 МэВ [7]:  $E_m$  — положение максимума сечения,  $\sigma_m$  — сечение в максимуме,  $\Gamma$  — ширина сечения,  $\sigma_{\text{int}}$  — интегральное сечение

Реакция	$E_m$ , МэВ		$\sigma_m$ , мб	$\Gamma$ , мб	$\sigma_{\text{int}}$ , МэВмб
$(\gamma, Xn)$	15.6		351.5	5.5	2790
$(\gamma, Sn)$	КМФР	15.4	272.0	4.6	1974
	TALYS	15.3	254.9	4.7	1873
$(\gamma, 1n)$	КМФР	14.6	265.4	3.2	1342
	TALYS	14.4	256.5	2.9	1157
$(\gamma, 2n)$	КМФР	17.6	109.6	4.3	739
	TALYS	17.4	126.3	4.4	875
$(\gamma, 3n)$	КМФР				53
	TALYS				63

полученное в Ливерморе [2], тогда как для сечения реакции  $(\gamma, 2n)$  наблюдается обратное соотношение. На основе экспериментально–теоретического метода оценки сечений фотоядерных реакций рассчитаны оцененные сечения реакций, которые в пределах 20% точности согласуются с экспериментальными. На основе полученных результатов можно сделать вывод, что систематические ошибки в сечениях фотонейтронных реакций  $\sigma(\gamma, 1n)$ ,  $\sigma(\gamma, 2n)$ , полученных в экспериментах

с пучком квазимоноэнергетических аннигиляционных фотонов, составляют  $\approx 20\%$ . Для увеличения точности определения парциальных сечений фотоядерных реакций необходимы эксперименты, в которых регистрируются непосредственно продукты парциальных реакций. Такая возможность открывается с использованием наведённой активности, которая позволяет идентифицировать исследуемые реакции по спектрам  $\gamma$ -распадов образующихся радиоактивных изотопов.

[1] Tzara C. A. Compt. Rend. Acad. Sci. 1957. **245**. P. 56.  
 [2] Fultz S. C., Berman B. L., Caldwell J. T. et al. Phys. Rev. 1969. **186** P. 1255.  
 [3] Leprêtre A., Beil H., Bergère R. et al. Nucl. Phys. A. 1974. **219**. P. 39.  
 [4] Кузнецов А. А., Варламов В. В., Ишханов Б. С., Орлин В. Н., Просняков А. А. Учен. зап. физ. фак-та Моск. ун-та. 2017. № 3.  
 [5] Сорокин Ю. И., Юрьев Б. А. Изв. АН СССР. Сер. физ. 1975. **39**. С. 114 (Sorokin Yu. I., Yuryev B. A. Bull Acad. Sci. USSR Phys. Ser. 1975. **39**. P. 98).  
 [6] Варламов В. В., Песков Н. Н., Руденко Д. С. и др. ВАНИТ. Сер.: Ядерные константы. 2003. №.1-2, С. 48.  
 [7] Варламов В. В., Ишханов Б. С., Четверткова В. А. Изв. РАН. Сер. физ. 2010. **74**. С. 875 (Varlamov V. V., Ishkhanov B. S., Chetvertkova V. A. Bull Russ. Acad. Sci. Phys. Ser. 2010. **74**. P. 833).  
 [8] Варламов В. В., Ишханов Б. С., Орлин В. Н. ЯФ 2012. **75**. С. 1414 (Varlamov V. V., Ishkhanov B. S., Orlin V. N. Phys. Atom. Nucl. 2012. **75**. P. 1339).  
 [9] Ишханов Б. С., Орлин В. Н. ЭЧАЯ 2007. **38**. С. 460 (Ishkhanov B. S., Orlin V. N. Phys. Part. Nucl. 2007. **38**. P. 232).  
 [10] Ишханов Б. С., Орлин В. Н. ЯФ 2008. **71**. С. 517. (Ishkhanov B. S., Orlin V. N. Phys. Atom. Nucl. 2008. **71**. P. 493).  
 [11] Konig A. J., Hilaire S., Duijvestijn M. C. Proceedings of the International Conference on Nuclear Data for Science and Technology. April, 22–27, 2007 / edited by Bersillon O. et al. EDP Sciences (Nice, France, 2008). P. 211.

### Photodisintegration of $^{124}\text{Sn}$

V. V. Varlamov<sup>1</sup>, B. S. Ishkhanov<sup>1,2</sup>, A. A. Kuznetsov<sup>1</sup>, V. N. Orlin<sup>1</sup>, A. A. Prosnjakov<sup>2a</sup>

<sup>1</sup>Skobel'syn Institute of Nuclear Physics, Moscow State University, Moscow 119991, Russia

<sup>2</sup>Faculty of Physics, Moscow State University, Moscow 119991, Russia.

E-mail: <sup>a</sup>aa.prosnjakov@physics.msu.ru

In this work the evaluated cross sections of photoneutron reactions on  $^{124}\text{Sn}$  based on the theoretical-experimental approach were obtained. Calculations of the used multiplicity transition functions  $F_i^{\text{theor}}$  were carried out in the frames of the combined model of photonucleon reactions (CMPR) and the TALYS program. The influence of the parameters of mentioned models on the evaluated cross sections of the photoneutron reactions was discussed.

PACS: 25.20.-x

*Keywords:* photonuclear reactions, evaluated cross section, nuclear models.

*Received 20 March 2018.*

#### **Сведения об авторах**

1. Варламов Владимир Васильевич — доктор физ.-мат. наук, гл. науч. сотрудник; тел.: (495) 939 34 83, e-mail: varlamov@depni.sinp.msu.ru.
  2. Ишханов Борис Саркисович — доктор физ.-мат. наук, профессор; тел.: (495) 939 50 95, e-mail: bsi@depni.sinp.msu.ru.
  3. Кузнецов Александр Александрович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-25-58, e-mail: kuznets@depni.sinp.msu.ru.
  4. Орлин Вадим Николаевич — доктор физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-25-58, e-mail: orlinvn@yandex.ru.
  5. Просняков Александр Александрович — студент; тел.: (495) 939-25-58, e-mail: aa.prosnyakov@physics.msu.ru.
-