

Систематические погрешности экспериментальных сечений парциальных фотонейтронных реакций: ЯДРА ^{75}As , ^{127}I и ^{181}Ta

В. В. Варламов¹, А. И. Давыдов^{2*}

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына

²Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

(Статья поступила 18.03.2020; подписана в печать 19.03.2020)

Проблема достоверности сечений парциальных фотонейтронных реакций на ядрах ^{75}As , ^{127}I и ^{181}Ta , полученных в экспериментах на пучках квазиодноэнергетических аннигиляционных фотонов, рассматривается с использованием объективных физических критериев. Показано, что экспериментальные данные по сечениям реакций $(\gamma, 1n)$ и $(\gamma, 2n)$, полученные для указанных трех ядер с помощью метода разделения нейтронов по множественности, не являются достоверными, поскольку содержат значительные систематические погрешности. Установлено также, что в дополнение к погрешностям, обусловленным недостоверным определением множественности нейтронов по их измеряемой энергии, в экспериментальных данных присутствуют значительные погрешности иной природы. На основании сравнения экспериментальных данных с сечениями парциальных реакций, оцененными с помощью экспериментально-теоретического метода, показано, что дополнительные погрешности обусловлены потерей значительной части нейтронов (в случаях ядер ^{127}I и ^{181}Ta — преимущественно из реакции $(\gamma, 1n)$, в случае ядра ^{75}As — из обеих реакций $(\gamma, 1n)$ и $(\gamma, 2n)$).

PACS: 25.20.-x

УДК: 539.172.3

Ключевые слова: физические критерии достоверности данных, фотонейтронные реакции, систематические погрешности, экспериментально-теоретический метод оценки сечений.

Большинство данных по сечениям парциальных фотонейтронных реакций, прежде всего, $(\gamma, 1n)$, $(\gamma, 2n)$ и $(\gamma, 3n)$, получено с помощью метода разделения фотонейтронов по множественности на пучках квазиодноэнергетических аннигиляционных фотонов в Ливерморе (США) и Сакле (Франция) [1, 2, 3, 4]. Между результатами обеих упомянутых лабораторий имеются существенные систематические расхождения [5, 6, 7]. Так, для сечений реакций $(\gamma, 1n)$ и $(\gamma, 2n)$ на 19 ядрах (^{51}V , ^{75}As , ^{89}Y , ^{90}Zr , ^{115}In , $^{116,117,118,120,124}\text{Sn}$, ^{127}I , ^{133}Cs , ^{159}Tb , ^{165}Ho , ^{181}Ta , ^{197}Au , ^{208}Pb , ^{232}Th , ^{238}U), исследованных в обеих лабораториях, установлено [5, 6, 7], что, как правило, сечения реакции $(\gamma, 1n)$ имеют большие (на $\sim 60 - 100\%$) величины в Сакле, а сечения реакции $(\gamma, 2n)$ — напротив, большие в Ливерморе.

При этом для указанных 19 ядер отношения интегральных сечений реакций $R_{S/L}^{int} = R_S^{int}/R_L^{int}$, полученных в Сакле и Ливерморе, изменяются от 0.69 до 1.34, а их среднее значения составляют 1.07 в случае реакции $(\gamma, 1n)$ и 0.84 в случае реакции $(\gamma, 2n)$.

В этой систематике исследуемые в настоящей работе ядра ^{75}As , ^{127}I и ^{181}Ta занимают особые места: в случае ядер ^{127}I и ^{181}Ta наблюдаются наибольшие значения отношения $R_{S/L}^{int}(\gamma, 1n) - 1.34$ и 1.25 соответственно, тогда как значения отношения $R_{S/L}^{int}(\gamma, 2n) -$ весьма невелики (1.07 и 0.89, соответственно). При

этом в случае ядра ^{75}As , напротив, рассматриваемые отношения близки — $R_{S/L}^{int}(\gamma, 1n) \approx R_{S/L}^{int}(\gamma, 2n) = 1.22$. Экспериментальные данные для указанных ядер объединяет весьма примечательная особенность: сечения реакций $(\gamma, 1n)$

$$(\gamma, Sn) = (\gamma, 1n) + (\gamma, 2n) + (\gamma, 3n) + \dots \quad (1)$$

$$(\gamma, Xn) = (\gamma, 1n) + 2(\gamma, 2n) + 3(\gamma, 3n) + \dots, \quad (2)$$

полученные в Сакле и Ливерморе, существенно различаются уже в области энергий до энергетического порога V_{2n} реакции $(\gamma, 2n)$, в которой никаких проблем разделения нейтронов различной множественности нет, присутствуют нейтроны, образующиеся только в реакции $(\gamma, 1n)$, и данные по всем трем реакциям должны быть идентичны. Характерный пример расхождений экспериментальных сечений реакции (γ, Xn) ^{181}Ta [8, 9, 10] приводится на рис. 1.

При сравнении экспериментальных данных по сечениям реакций $(\gamma, 1n)$ и $(\gamma, 2n)$ на ядре ^{181}Ta с данными, оцененными с помощью экспериментально-теоретического метода, было показано [8], что экспериментальные сечения обеих парциальных реакций, полученные в Сакле [9], содержат относительно небольшие систематические погрешности, обусловленные недостоверным распределением нейтронов между ними [11]. Было установлено, что подобные относительно небольшие систематические погрешности присутствуют и в сечениях реакций, полученных в Ливерморе [10]. При этом было показано, что в эксперименте Ливермора присутствуют и значительные систематические погрешности иной природы. Такой вывод

*E-mail: alexdavydovmet@gmail.com

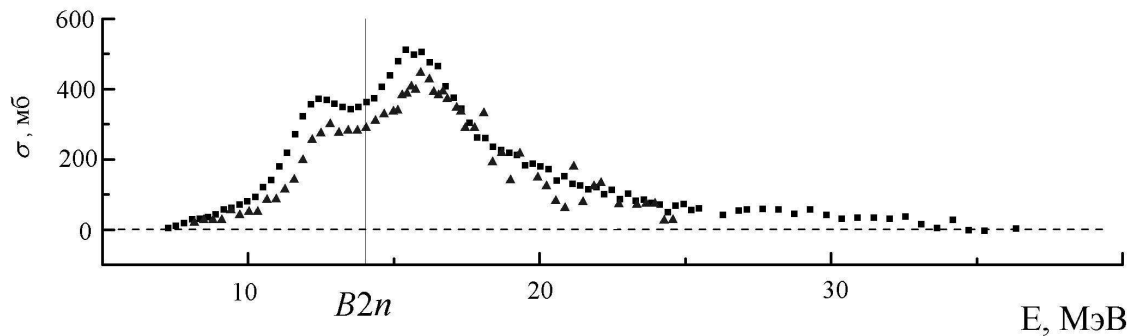


Рис. 1: Сравнение [8] экспериментальных данных по сечению реакции $^{181}\text{Ta}(\gamma, Xn)$, полученных в Сакле (квадраты [9]) и Ливерморе (треугольники [10])

был основан на детальном сравнении экспериментальных данных по сечениям парциальных фотонейтронных реакций с данными, оцененными [8] с помощью экспериментально-теоретического метода. В качестве таких критериев достоверности было предложено [11] использовать отношения F_i сечений конкретных парциальных реакций $\sigma(\gamma, in)$ к сечению реакции выхода нейтронов (γ, Xn) .

$$F_i = \sigma(\gamma, in) / \sigma(\gamma, Xn) \quad (3)$$

В соответствии с определением отношения F_i ни при каких физических условиях не должны превышать пределов 1.00, 0.50, 0.33, ..., соответственно для $i = 1, 2, 3, \dots$. Большие величины положительных отношений F_i^{exp} , полученных по экспериментальным данным, означают, что разделение нейтронов между парциальными реакциями было выполнено с систематическими погрешностями, а, следовательно, не являются достоверными.

Экспериментально-теоретический метод оценки сечений парциальных реакций, свободных от систематических погрешностей метода экспериментального разделения нейтронов по множественности, предусматривает разделение на вклады парциальных реакций экспериментального сечения реакции выхода нейтронов (2), по существу не зависящего от проблем экспериментального разделения нейтронов по множественности, поскольку оно учитывает все испускаемые в реакции нейтроны. Оцененные сечения парциальных реакций

$$\sigma^{eval}(\gamma, in) = F_i^{theor} \times \sigma^{exp}(\gamma, in) \quad (4)$$

получаются с использованием переходных функций множественности нейтронов

$$F_i^{theor} = \sigma^{theor}(\gamma, in) / \sigma^{theor}(\gamma, Xn), \quad (5)$$

рассчитанных в рамках комбинированной модели фотоядерных реакций [12, 13]. При сравнении оценен-

ных с помощью экспериментально-теоретического метода сечений парциальных реакций ядер ^{181}Ta , ^{197}Au и ^{209}Bi [14, 15, 16] с результатами измерений выходов соответствующих реакций, выполненных на пучке тормозного γ -излучения с помощью активационного метода, был сформулирован третий общий физический критерий достоверности данных:

1. Отношения F_i^{exp} не должны превосходить упомянутые верхние пределы;
2. $\sigma(\gamma, in)$ и F_i^{exp} не должны содержать отрицательных значений;
3. расхождения между F_i^{exp} и F_i^{theor} не должны быть существенными.

В работах [6, 7, 8, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22] показано, что экспериментальные сечения парциальных фотонейтронных реакций, полученные для большого числа средних и тяжелых ядер ($^{63,65}\text{Cu}$, ^{80}Se , $^{91,94}\text{Zr}$, ^{115}In , $^{112\sim 124}\text{Sn}$, ^{127}I , ^{133}Cs , ^{138}Ba , ^{159}Tb , ^{181}Ta , $^{186\sim 192}\text{Os}$, ^{197}Au , ^{208}Pb , ^{209}Bi и некоторых других) при использовании метода разделения нейтронов по множественности, не являются достоверными. Во многих областях энергий фотонов наблюдаются отрицательные значения отношений F_1^{exp} , отрицательные значения F_2^{exp} или, напротив, значения F_i^{exp} , превышающие физически допустимые пределы, существенные расхождения между F_i^{exp} и F_i^{theor} . Были получены оцененные сечения (4) парциальных реакций, удовлетворяющие критериям достоверности данных.

Было показано [8], что, в случае ядра ^{181}Ta отношения между оцененными и экспериментальными сечениями реакций оказываются кардинально различными для данных Сакле [9] и Ливермора [10] (табл. 1). $\sigma_{eval}^{int} / \sigma_{exp}^{int}$, полученные по данным Сакле близки к 1, тогда как полученные по данным Ливермора отличаются от 1 весьма характерным образом. Чем большей оказывается доля сечения парциальной реакции $(\gamma, 1n)$

Таблица 1: Отношения интегральных сечений σ^{int} полных и парциальных реакций для ядра ^{181}Ta , рассчитанных [8] до энергии $E^{int} = 25.00$ МэВ по оцененным данным и экспериментальным данным Сакле и Ливермора

Реакция	Данные для ^{181}Ta , полученные [8] до энергии $E^{int} = 25.00$ МэВ	
	$\sigma_{eval}^{int}[8]/\sigma_{exp}^{int}[9]$	$\sigma_{eval}^{int}[8]/\sigma_{exp}^{int}[10]$
(γ, Xn)	1.00	1.24
(γ, Sn)	0.96	1.30
$(\gamma, 1n)$	0.88	1.46
$(\gamma, 2n)$	1.16	1.05
Данные для ^{127}I , полученные [23] до энергии $E^{int} = 25.83$ МэВ		
	$\sigma_{eval}^{int}[8]/\sigma_{exp}^{int}[24]$	$\sigma_{eval}^{int}[8]/\sigma_{exp}^{int}[25]$
(γ, Xn)	0.99	1.20
(γ, Sn)	1.00	1.25
$(\gamma, 1n)$	1.00	1.33
$(\gamma, 2n)$	0.94	0.98
Данные для ^{75}As , полученные [26] до энергии $E^{int} = 26.20$ МэВ		
	$\sigma_{eval}^{int}[26]/\sigma_{exp}^{int}[27]$	$\sigma_{eval}^{int}[26]/\sigma_{exp}^{int}[28]$
(γ, Xn)	0.99	1.27
(γ, Sn)	1.00	1.30
$(\gamma, 1n)$	1.00	1.34
$(\gamma, 2n)$	0.94	1.14

в сечении более полной реакции $(\gamma, Xn) \rightarrow (\gamma, Sn) \rightarrow (\gamma, n)$, тем большим оказывается отличие этого последнего от оцененного ($1.24 \rightarrow 1.30 \rightarrow 1.46$). При этом в переходе к сечению $\sigma(\gamma, 2n)$, в котором доля сечения $\sigma(\gamma, 1n)$, естественно, равна 0, отношение $\sigma_{eval}^{int}/\sigma_L^{int}$ резко уменьшается до значения 1.05. Наблюдающееся в эксперименте некоторое занижение сечения $\sigma(\gamma, 2n)$ оказывается почти в 10 раз меньшим по сравнению с занижением сечения $\sigma(\gamma, 1n)$. Причины этого не ясны, однако именно очень большое физически недостоверное занижение сечения реакции $^{181}\text{Ta}(\gamma, 1n)^{180}\text{Ta}$ [10] является причиной существенного (на 25 %) занижения и сечения реакции $^{181}\text{Ta}(\gamma, Xn)$.

В случаях ядер ^{127}I и ^{75}As отношения $\sigma_{eval}^{int}/\sigma_{exp}^{int}$ при переходах между различными реакциями, несмотря на некоторое различие абсолютных величин, изменяются полностью аналогично тому, что наблюдается для ядра ^{181}Ta . Единственным очевидным отличием обсуждаемых данных является то, что отношения $\sigma_{eval}^{int}/\sigma_{exp}^{int}$ для реакции $\sigma(\gamma, 2n)$ в случае ядер ^{181}Ta и ^{127}I оказываются весьма малыми (5% и 2% соответственно), в то время как в случае ядра ^{75}As это отношение имеет достаточно большую величину (14%). Это означает, что в экспериментах, выполненных в Ливерморе для ядер ^{181}Ta и ^{127}I , значительное количество нейтронов было утеряно из реакции $\sigma(\gamma, 1n)$, тогда как в экспери-

менте для ядра ^{75}As были утеряны нейтроны из обеих парциальных реакций $\sigma(\gamma, 1n)$ и $\sigma(\gamma, 2n)$.

Таким образом, экспериментальные данные, полученные в Сакле, относительно мало отличаются от оцененных данных вследствие не вполне корректной процедуры определения множественности нейтронов по их измеряемой энергии. В то же время данные, полученные в Ливерморе, являются абсолютно недостоверными вследствие потери значительного количества нейтронов.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы выражают благодарность Б.С. Ишханову и В.Н. Орлину за большую помощь в проведении теоретических расчетов, получении, представлении и обсуждении данных. Работа поддержана Исследовательским контрактом №20501 (Координационный Исследовательский Проект №F41032) Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ) и грантом Фонда развития теоретической физики и математики «БАЗИС» №18-2-6-93-1.

[1] Berman B.L., Fultz S.S. // Rev. Mod. Phys. 1975. **47**. P. 713.

[2] Dietrich S.S., Berman B.L. // Data Nucl. Data Tables.

1988. **38**. P. 199.
- [3] *Varlamov A.V., Varlamov V.V., Rudenko D.S., Stepanov M.E.* // International Nuclear Data Committee. INDC(NDS)-394. IAEA NDS. Vienna. Austria. 1999.
- [4] Международная электронная база данных по ядерным реакциям: ЦДФЭ НИИЯФ МГУ; СЯЦ МАГАТЭ; НЦЯД США
- [5] *Wolynes E., Martins M.N.* // Revista Brasileira de Fisica. 1987. **17** P. 56.
- [6] *Варламов В.В., Ишханов Б.С., Орлин В.Н.* // ЯФ. 2012. **75** С. 1414.
- [7] *Varlamov V.V., Ishkhanov B.S., Orlin V.N., Stopani K.A.* // Eur. Phys. J. A. 2014. **50** P. 114.
- [8] *Варламов В.В., Ишханов Б.С., Орлин В.Н., Песков Н.Н., Степанов М.Е.* // ЯФ. 2013. **76** С. 1484.
- [9] *Bergere R., Beil H., Veysiere A.* // Nucl. Phys. A. 1968. **121** P. 463.
- [10] *R.L. Bramblett, J.T. Caldwell, G.F. Auchampaugh, S.C. Fultz* // Phys. Rev. 1963. **129** P. 2723.
- [11] *В.В. Варламов, Б.С. Ишханов, В.Н. Орлин, В.А. Четверткова* // Известия РАН, серия физическая. 2010. **74** С. 875.
- [12] *Б.С. Ишханов, В.Н. Орлин* // ЭЧАЯ. 2007. **38** С. 460.
- [13] *Б.С. Ишханов, В.Н. Орлин* // ЯФ. 2008. **71** С. 517.
- [14] *Б.С. Ишханов, В.Н. Орлин, С.Ю. Трошицев* // ЯФ. 2012. **75** С. 283.
- [15] *Belyshev S.S., Filipescu D.M., Gheorghe I. et al.* // Eur. Phys. J. A. 2015. **51** P. 67.
- [16] *Varlamov V.V., Ishkhanov B.S., Orlin V.N.* // Phys. Rev. C. 2017. **96**, 044606.
- [17] *Ishkhanov B. S., Orlin V.N., Varlamov V.V.* // EPJ Web of Conferences. 2012. **38** P. 1203.
- [18] *Варламов В.В., Ишханов Б.С., Орлин В.Н., Песков Н.Н., Степанов М.Е.* // ЯФ. 2013. **76** С. 1484.
- [19] *Варламов В.В., Макаров М.А., Песков Н.Н., Степанов М.Е.* // ЯФ. 2015. **78** С. 678.
- [20] *Варламов В.В., Макаров М.А., Песков Н.Н., Степанов М.Е.* // ЯФ. 2015. **7** С. 797.
- [21] *Варламов В.В., А.И. Давыдов, М.А. Макаров, В.Н. Орлин, Н.Н. Песков* // Изв. РАН, сер. физ. 2016. **80** С. 351.
- [22] *Варламов В.В., Ишханов Б.С., Орлин В.Н., Песков Н.Н., Степанов М.Е.* // ЯФ. 2016. **79** С. 315.
- [23] *Varlamov V., Davydov A., Orlin V.* // Phys. Rev. (в печати).
- [24] *Bramblett R.L., Caldwell J.T., Berman B.L., Harvey R.R., Fultz S.C.* // Phys. Rev. 1966. **148** P. 1198.
- [25] *Bergere R., Beil H., Carlos P., Veysiere A.* // Nucl. Phys. A. 1969. **133** P. 417.
- [26] *Varlamov V., Davydov A., Kaidarova V., Orlin V.* // Phys. Rev. C. 2019. **99** P. 2.
- [27] *Carlos P., Beil H., Bergere R., Fagot J., Lepretre A., Veysiere A., Solodukhov G.V.* // Nucl. Phys. A. 1976. **258** P. 365.
- [28] *Berman B.L., Bramblett R.L., Caldwell J.T., Davis H.S., Kelly M.A., Fultz S.C.* // Phys. Rev. 1969. **177** P. 1745.

Systematic uncertainties of experimental cross sections of partial photoneutron reactions: nuclei: ^{75}As , ^{127}I and ^{181}Ta

V. V. Varlamov^{1,a}, A. I. Davydov^{2,b}

¹*Skobeltsyn Research Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia*

²*Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia*

E-mail: ^avarlamov@depni.sinp.msu.ru, ^balexavydovmet@gmail.com

The problem of reliability of the photoneutron partial reaction cross sections for ^{75}As , ^{127}I and ^{181}Ta obtained in experiments used the beams of quasimonoenergetic annihilation photons was considered using the objective physical criteria. It was shown that the experimental data for $(\gamma, 1n)$ and $(\gamma, 2n)$ reactions cross sections for three mentioned nuclei obtained using the method of neutron multiplicity sorting are not reliable because contain significant systematic uncertainties. It was found that additionally to uncertainties of unreliable determination of neutron multiplicity basing on its measured energy the significant uncertainties of different nature exist. Using the comparison of experimental cross sections with those evaluated using experimental-theoretical method it was shown that additional uncertainties are due to the loss of noticeable part of neutrons from the reaction $(\gamma, 1n)$ in the cases of ^{127}I and ^{181}Ta and from the both $(\gamma, 1n)$ and $(\gamma, 2n)$ reactions in the case of ^{75}As .

PACS: 25.20.-x.

Keywords: physical data reliability criteria, systematic uncertainties, photoneutron reactions, experimental-theoretical evaluation method.

Received 18 March 2019.

Сведения об авторах

1. Варламов Владимир Васильевич — доктор физ.-мат. наук, профессор e-mail: varlamov@depni.sinp.msu.ru.

2. Давыдов Александр Иванович — аспирант, e-mail: alexavydovmet@gmail.com.