

Систематические погрешности фотоядерных экспериментов для изотопов Pb и ядер As, I и Ta

В. В. Варламов^{1,*}, А. И. Давыдов^{2,†}, В. Н. Орлин¹

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобелева (НИИЯФ МГУ)
Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова
физический факультет, кафедра общей ядерной физики
Россия 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2
(Поступила в редакцию 06.06.2022; подписана в печать 09.06.2022)

Ранее было установлено, что экспериментальные сечения реакций $(\gamma, 1n)$, $(\gamma, 2n)$ и $(\gamma, 3n)$, полученные для большого количества ядер на пучках квазимоноэнергетических аннигиляционных фотонов с помощью метода разделения фотонейтронов по множественности, не удовлетворяют объективным физическим критериям достоверности данных. При использовании экспериментально-теоретического метода оценки были получены новые данные о сечениях парциальных и полных фотонейтронных реакций, удовлетворяющие таким критериям. Было показано, что в большинстве случаев значительные расхождения экспериментальных и оцененных сечений, обусловлены существенными систематическими погрешностями процессов идентификации принадлежности детектируемых нейтронов каналам с различной множественностью. Для некоторых ядер (^{75}As , ^{127}I , ^{181}Ta) были обнаружены систематические погрешности иного типа, обусловленные потерей значительного количества нейтронов из реакции $(\gamma, 1n)$. Выполнена оценка достоверных сечений $\sigma(\gamma, 1n)$, $\sigma(\gamma, 2n)$, $\sigma(\gamma, 3n)$, $\sigma(\gamma, sn) = \sigma(\gamma, 1n) + \sigma(\gamma, 2n) + \sigma(\gamma, 3n)$ и $\sigma(\gamma, xn) = \sigma(\gamma, 1n) + 2\sigma(\gamma, 2n) + 3\sigma(\gamma, 3n)$ на изотопах $^{206,207,205}\text{Pb}$. Показано, что для обоих исследованных ядер, как и для ядра ^{208}Pb , исследованного ранее, также наблюдаются характерные для ядер ^{75}As , ^{127}I , ^{181}Ta соотношения сечений разных реакций, свидетельствующие о недостоверности экспериментальных данных.

PACS: 25.20.-x. УДК: 539.17.

Ключевые слова: ^{75}As , ^{127}I , ^{181}Ta , $^{206,207,205}\text{Pb}$, гигантский дипольный резонанс, сечения парциальных фотонейтронных реакций, множественность нейтронов, физические критерии достоверности данных, экспериментально-теоретический метод оценки сечений новые достоверные сечения реакций, достоверность экспериментальных данных.

ВВЕДЕНИЕ

Хорошо известна проблема существенных систематических расхождений результатов разных фотоядерных экспериментов. Абсолютное большинство данных по сечениям парциальных фотонейтронных реакций $(\gamma, 1n)$, $(\gamma, 2n)$ и $(\gamma, 3n)$ получено на пучках квазимоноэнергетических аннигиляционных фотонов с помощью метода разделения нейтронов по множественности в двух лабораториях (Ливермор (США) и Сакле (Франция)) [1, 2]. Эксперименты были выполнены практически для всех стабильных ядер, и результаты распределились практически поровну. В каждой лаборатории было получено приблизительно одинаковое количество (~ 250) наборов данных для сечений парциальных реакций с определенным количеством образующихся нейтронов — $\sigma(\gamma, 1n)$, $\sigma(\gamma, 2n)$ и $\sigma(\gamma, 3n)$, полной фотонейтронной реакции

$$\sigma(\gamma, sn) = \sigma(\gamma, 1n) + \sigma(\gamma, 2n) + \sigma(\gamma, 3n) \quad (1)$$

и выхода нейтронов

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

Для 19 ядер (^{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), эксперименты для которых были выполнены в обеих лабораториях, были обнаружены расхождения между сечениями $\sigma(\gamma, 1n)$ и $\sigma(\gamma, 2n)$, достигающие 100% величины [3–5]. Направленность расхождений разная: сечения реакции $(\gamma, 1n)$ имеют большие величины в Сакле, а реакции $(\gamma, 2n)$ — в Ливерморе. В табл. 1 приведены значения отношений интегральных сечений обеих парциальных реакций $\sigma_{C/L}^{\text{Инт}} = \sigma_{\text{Сакле}}^{\text{Инт}} / \sigma_{\text{Ливермор}}^{\text{Инт}}$, рассчитанные в совпадающих областях энергий налетающих фотонов [6]. Обнаруженные систематические расхождения, намного превосходящие по величине статистические погрешности экспериментов, оцениваемые в $\sim 10\%$ величины, сделали весьма актуальным вопрос о том, какие именно данные являются достоверными и должны быть (могут быть) рекомендованы для использования в исследованиях и приложениях.

Для ответа на этот вопрос были предложены [7, 8] объективные физические критерии достоверности данных по сечениям парциальных фотонейтронных реакций, представляющие собой отношения F_i сечений конкретной парциальной реакции $\sigma(\gamma, in)$ к сечению выхода нейтронов $\sigma(\gamma, xn)$

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

* Varlamov@depni.sinp.msu.ru

† AlexDavydovMet@gmail.com

Таблица 1. Систематика отношений величин интегральных сечений $\sigma_{C/L}^{инт}$, рассчитанных в совпадающих областях энергий фотонов для реакций $(\gamma, 1n)$ и $(\gamma, 2n)$, по данным Ливермора и Сакле [6]

Ядро	$\sigma_{C/L}^{инт}(1n)$	$\sigma_{C/L}^{инт}(2n)$
^{51}V	1.07	0.79
^{75}As	1.21	1.22
^{89}Y	1.25	0.87
^{90}Zr	1.26	0.73
^{115}In	0.97	0.76
^{116}Sn	1.10	0.92
^{117}Sn	1.02	0.93
^{118}Sn	1.07	0.86
^{120}Sn	1.00	0.86
^{124}Sn	0.93	0.94
^{127}I	1.34	1.07
^{133}Cs	1.10	0.88
^{159}Tb	1.07	0.71
^{165}Ho	1.20	1.05
^{181}Ta	1.25	0.89
^{197}Au	1.00	0.69
^{208}Pb	1.21	0.77
^{232}Th	0.84	0.69
^{238}U	0.76	0.79
Средние значения		
$\langle \sigma_{C/L}^{инт}(1n) \rangle$	1.08	
$\langle \sigma_{C/L}^{инт}(2n) \rangle$		0.84

Согласно определению, значения таких отношений не должны превышать пределов 1.00, 0.50, 0.33, соответственно, $i = 1, 2, 3$. Превышения отношениями $F_i^{эксп}$ указанных пределов означают наличие значительных систематических погрешностей в процессах распределения нейтронов между экспериментальными сечениями реакций, вследствие чего эти сечения не являются достоверными. При этом отношения $F_i^{эксп}$ должны быть определено положительными (поскольку включают в себя только сечения реакций, имеющие размерность площади).

Исследования большого количества ядер, прежде всего из числа упомянутых выше 19, показали, что в целом сечения парциальных реакций, полученные в обеих лабораториях, физическим критериям не соответствуют [9–13]. Во многих случаях в экспериментальных сечениях реакции $(\gamma, 1n)$ наблюдаются физически запрещенные отрицательные значения, а в сечениях реакции $(\gamma, 2n)$ — значения, которым соответствуют отношения $F_i^{эксп}$, превышающие упомянутые физические предельные значения.

При этом было установлено [5, 6], что для многих ядер расхождения между сечениями выхода фото-нейтронов (2), полученными не только в Ливерморе

и Сакле, но и во многих других лабораториях при использовании разных фотонных пучков и нейтронных детекторов, оказываются весьма небольшими, не превышающими $\sim 12\%$ величины. Это означает, что существенные расхождения данных по сечениям парциальных реакций, к тому же не соответствующих физическим критериям достоверности, обусловлены определенными проблемами экспериментального определения принадлежности детектируемого нейтрона реакции той или иной множественности.

В этой связи был предложен [7, 8] метод оценки того, как должны (могут) выглядеть достоверные сечения парциальных реакций, соответствующие экспериментально определенным сечениям выхода нейтронов $\sigma(\gamma, xn)$, данные для которых достаточно хорошо согласуются в разных экспериментах. Оцененные сечения парциальных реакций $\sigma^{оцен}(\gamma, in)$

$$\sigma^{оцен}(\gamma, in) = F_i^{теор} \sigma^{эксп}(\gamma, xn) \quad (4)$$

определялись с помощью экспериментального сечения $\sigma^{эксп}(\gamma, xn)$, практически не зависящего от проблем экспериментального определения множественности нейтронов (поскольку оно включает в себя вклады всех образующихся нейтронов) и отношений $F_i^{теор}$, рассчитываемых в комбинированной модели фотоядерных реакций (КМФЯР) [14, 15], также от этих проблем не зависящих.

Для большого количества (~ 50) ядер, в том числе для большинства из 19 ядер, упомянутых выше, были оценены сечения парциальных и полных фото-нейтронных реакций и детально проанализированы их расхождения с экспериментально полученными сечениями. Было установлено, что в большинстве случаев эти расхождения (и, соответственно, расхождения между результатами экспериментов, выполненных в Ливерморе и Сакле) обусловлены недостоверными распределениями нейтронов между реакциями с разной множественностью. Основной причиной является неоднозначность процедуры определения этой множественности по измеряемой энергии нейтронов, поскольку энергии нейтронов, испускаемых в разных реакциях, оказываются весьма близкими, а их энергетические спектры — пересекающимися. Вследствие этого, недостоверная идентификация заметного количества нейтронов из реакции $(\gamma, 1n)$ как нейтронов из реакции $(\gamma, 2n)$, приводит к существенному занижению (вплоть до появления физически запрещенных отрицательных значений) сечения $\sigma(\gamma, 1n)$. Это, в свою очередь, приводит к недостоверному завышению (вплоть до появления значений, для которых отношения $F_i^{эксп}$ превышают упомянутые выше физические достоверные пределы) сечения $\sigma(\gamma, 2n)$.

Для большинства исследованных ядер обсуждаемые систематические расхождения сечений парциальных реакций наблюдаются в областях энергий налетающих фотонов E_γ , превышающих энергетические пороги $B2n$ реакций, в которых наблюдается конкуренция реакций $(\gamma, 1n)$ и $(\gamma, 2n)$. При меньших энерги-

ях осуществляется только реакция $(\gamma, 1n)$, проблемы определения множественности нейтронов отсутствуют: сечения реакций $(\gamma, 1n)$, (γ, sn) и (γ, xn) должны быть идентичными. Так, например, в случае ядра ^{159}Tb сечения $\sigma^{\text{экссп}}(\gamma, xn)$, определенные в Ливерморе [16] и Сакле [17], практически совпадают до энергии $B2n$, а соответствующие интегральные сечения, рассчитанные до энергии 30 МэВ, различаются всего на $\sim 2\%$ (3187 и 3194 МэВ·мб). При этом интегральное сечение реакции $(\gamma, 1n)$ оказывается на 37% бóльшим с Сакле (1936 и 1413 МэВ·мб), а реакции $(\gamma, 2n)$ — на 46% бóльшим в Ливерморе (887 и 606 МэВ·мб).

Однако обнаружилось, что для нескольких ядер существенные расхождения между оцененными и экспериментальными сечениями реакций $(\gamma, 1n)$, (γ, sn) и (γ, xn) наблюдаются и в области энергий фотонов $E_\gamma < B2n$. Это свидетельствует о присутствии в экспериментальных данных систематических погрешностей, не связанных с проблемами распределения нейтронов между реакциями с разной множественностью.

1. СИСТЕМАТИЧЕСКИЕ ПОГРЕШНОСТИ СЕЧЕНИЙ $\sigma(\gamma, 1n)$

При детальном исследовании систематических расхождений сечений парциальных реакций была обнаружена [8] весьма странная форма сечения реакции $^{181}\text{Ta}(\gamma, 1n)^{180}\text{Ta}$, полученного в Ливерморе [18] (рис. 1). В этом сечении отсутствуют нейтроны в области энергий налетающих фотонов, превышающих $E_\gamma \sim 17.5$ МэВ. В то же время, в сечении, полученном в Сакле [17], а также в сечении, рассчитанном в КМФЯР [14, 15], значительное количество нейтронов наблюдается вплоть до энергий $E_\gamma \sim 30.0$ МэВ.

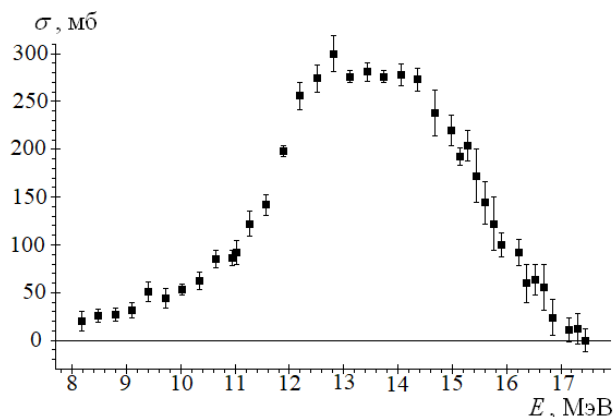


Рис. 1. Сечение реакции $^{181}\text{Ta}(\gamma, 1n)^{180}\text{Ta}$ [18]

При этом было обнаружено [8], что между величинами сечений реакций $(\gamma, 1n)$, $(\gamma, 2n)$, (γ, sn) и (γ, xn) , полученными в Ливерморе [18] для ядра ^{181}Ta , наблюдается весьма характерная систематика (2). Отношения интегральных сечений $\sigma_{\text{оцен}}^{\text{инт}} [8] / \sigma_{\text{Л}}^{\text{инт}} [18]$, рассчи-

танных для реакций $(\gamma, 1n)$, (γ, sn) и (γ, xn) , оказываются очень большими и равными, соответственно, 1.46, 1.30, 1.24, тогда как для реакции $(\gamma, 2n)$ — такое отношение маленькое 1.05. Рассматриваемые реакции различаются между собой вкладами реакции $(\gamma, 1n)$. В сечении $\sigma(\gamma, xn)$ сечение $\sigma(\gamma, 1n)$ имеет некоторый вклад, определяемый тем, что к нему добавляется вклад $2\sigma(\gamma, 2n)$, в сечении $\sigma(\gamma, sn)$ вклад $\sigma(\gamma, 1n)$ возрастает, поскольку к нему добавляется лишь вклад $1\sigma(\gamma, 2n)$; в самом сечении $\sigma(\gamma, 1n)$ его собственный вклад, естественно, максимален — 100%; в сечении $\sigma(\gamma, 2n)$ вклад сечения $\sigma(\gamma, 1n)$, естественно, отсутствует (0%). Это означает, что чем больше оказывается вклад $\sigma(\gamma, 1n)$ в сечениях других реакций, тем больше экспериментальные сечения отличаются от оцененных сечений. В случае отсутствия вклада $\sigma(\gamma, 1n)$ экспериментальное сечение $\sigma(\gamma, 2n)$ оказывается практически равным оцененному сечению. Это означает, что наблюдаемые расхождения сечений реакций $\sigma(\gamma, xn)$, $\sigma(\gamma, sn)$ и $\sigma(\gamma, 1n)$, полученных в Ливерморе [18], с оцененными сечениями обусловлены недостоверным (необоснованным, ошибочным) занижением именно сечения $\sigma(\gamma, 1n)$. В сочетании с описанным выше фактом отсутствия в сечении реакции $(\gamma, 1n)$ нейтронов в области энергий налетающих фотонов, превышающих $E_\gamma \sim 17.5$ МэВ (рис. 1) это занижение может быть интерпретировано только как следствие потери значительного количества нейтронов, образующихся в реакции $^{181}\text{Ta}(\gamma, 1n)^{180}\text{Ta}$.

Данные, приведенные в табл. 2, свидетельствуют о том, что аналогичные характерные соотношения между сечениями реакций, полученными в экспериментах Ливермора [20–22], наблюдаются [19] и в случаях ядер ^{75}As , ^{127}I и ^{208}Pb . При этом соответствующие отношения интегральных сечений, полученные по данным Сакле, в целом весьма близки к 1, а относительно небольшие их различия соответствуют систематическим погрешностям идентификации нейтронов с разными множественностями в реакциях $(\gamma, 1n)$ и $(\gamma, 2n)$ [19].

Следует отметить, что все 4 обсуждаемых ядра (^{75}As , ^{127}I , ^{181}Ta и ^{208}Pb) объединяют существенные расхождения между сечениями выхода нейтронов $\sigma(\gamma, xn)$ в области энергий до порогов $B2n$, которые обусловлены потерей значительного количества нейтронов из реакции $(\gamma, 1n)$ в экспериментах Ливермора. Причиной такой потери могут быть определенные проблемы с эффективностью регистрации нейтронов разных энергий, обусловленные техническими особенностями экспериментальной установки.

2. НОВЫЕ ОЦЕНЕННЫЕ СЕЧЕНИЯ ПАРЦИАЛЬНЫХ И ПОЛНЫХ РЕАКЦИЙ НА ИЗОТОПАХ $^{206,207}\text{Pb}$

В том же эксперименте, в котором было исследовано ядро ^{208}Pb [22], были получены и данные

Таблица 2. Систематика отношений $\sigma_{\text{оцен}}^{\text{инт}}/\sigma_{\text{Л}}^{\text{инт}}$ величин оцененных и экспериментальных интегральных сечений реакций $(\gamma, 1n)$, $(\gamma, 2n)$, (γ, sn) и (γ, xn) , рассчитанных [8, 19] для ядер ^{75}As , ^{127}I , ^{181}Ta и ^{208}Pb

	^{75}As	^{127}I	^{181}Ta	^{208}Pb
	$\sigma_{\text{оцен}}^{\text{инт}}$ [19]/ $\sigma_{\text{Л}}^{\text{инт}}$ [20]	$\sigma_{\text{оцен}}^{\text{инт}}$ [19]/ $\sigma_{\text{Л}}^{\text{инт}}$ [21]	$\sigma_{\text{оцен}}^{\text{инт}}$ [8]/ $\sigma_{\text{Л}}^{\text{инт}}$ [18]	$\sigma_{\text{оцен}}^{\text{инт}}$ [19]/ $\sigma_{\text{Л}}^{\text{инт}}$ [22]
(γ, xn)	1.27	1.20	1.24	1.20
(γ, sn)	1.30	1.25	1.30	1.30
$(\gamma, 1n)$	1.34	1.33	1.46	1.40
$(\gamma, 2n)$	1.14	0.98	1.05	0.85

Таблица 3. Интегральные сечения $\sigma^{\text{инт}}$ (в единицах МэВ·мб) оцененных, экспериментальных и нормированных сечений фотонейтронных реакций на ядре $^{206,207}\text{Pb}$

Реакция	[22]	Оценка	[22] — нормировка
^{206}Pb			
$E^{\text{инт}} = B2n = 14.8 \text{ MeV}$			
(γ, xn)	1761.9 ± 8.2	1992.2 ± 9.3	1992.2 ± 9.3
$(\gamma, 2n)$	1761.3 ± 8.2	1992.2 ± 28.4	1991.6 ± 9.3
$(\gamma, 1n)$	1757.6 ± 9.2	1992.2 ± 28.4	1987.2 ± 10.4
$E^{\text{инт}} = B3n = 23.2 \text{ MeV}$			
(γ, xn)	3224.6 ± 17.5	3643.9 ± 19.8	3643.9 ± 19.8
(γ, sn)	2799.1 ± 14.6	3201.0 ± 33.5	3162.8 ± 16.4
$(\gamma, 1n)$	2322.1 ± 21.4	2758.3 ± 31.9	2623.9 ± 24.2
$(\gamma, 2n)$	426.4 ± 9.8	442.7 ± 10.4	481.8 ± 10.9
^{207}Pb			
$E^{\text{инт}} = B2n = 14.8 \text{ MeV}$			
(γ, xn)	1641.6 ± 8.8	1982.9 ± 10.6	1982.9 ± 10.6
(γ, sn)	1640.3 ± 8.7	1983.2 ± 29.6	1981.3 ± 10.5
$(\gamma, 1n)$	1633.1 ± 10.3	1982.9 ± 29.6	1972.6 ± 12.4
$E^{\text{инт}} = B3n = 21.6 \text{ MeV}$			
(γ, xn)	2853.7 ± 18.8	3444.3 ± 22.7	3444.3 ± 22.7
(γ, sn)	2440.3 ± 15.2	3022.4 ± 34.9	2945.6 ± 18.3
$(\gamma, 1n)$	2002.1 ± 23.5	2598.9 ± 32.5	2416.9 ± 28.3
$(\gamma, 2n)$	413.4 ± 11.2	423.4 ± 12.8	498.7 ± 13.4

по сечениям $\sigma(\gamma, 1n)$, $\sigma(\gamma, 2n)$, $\sigma(\gamma, sn) = \sigma(\gamma, 1n) + \sigma(\gamma, 2n)$ и $\sigma(\gamma, xn) = \sigma(\gamma, 1n) + 2\sigma(\gamma, 2n)$ для изотопов $^{206,207}\text{Pb}$. При этом, тогда как в случае ядра ^{208}Pb , наряду с результатами [22] имеются и результаты ещё нескольких разных экспериментов, в случае изотопов $^{206,207}\text{Pb}$ эксперимент [22] является единственным.

Результаты этого эксперимента для ядер $^{206,207,208}\text{Pb}$, выполненного в Ливерморе, были проанализированы [4] вместе с сечениями для ядер $^{\text{ест}}\text{Zr}$, ^{127}I , ^{141}Pr , ^{197}Au и $^{\text{ест}}\text{Pb}$ специально с целью анализа причин расхождений экспериментальных данных Ливермор и Сакле и выработки рекомендаций по их устранению. Сечения фотонейтронных реакций были повторно измерены при энергиях вблизи максимума ГДР. Наличие «ощутимых (appreciable)» расхождений

было констатировано, в качестве возможных причин были названы (возможные) ошибки (погрешности) использованных процедур определения потока фотонов и эффективности регистрации нейтронов.

В качестве основной рекомендации по устранению обсуждаемых расхождений данных для ядер $^{206,207,208}\text{Pb}$ была предложена процедура корректировки данных — увеличение сечений, полученных в Ливерморе, с использованием коэффициента 1.22. Следует отметить, что рекомендации [4] по устранению обсуждаемых расхождений были непоследовательными и противоречивыми. Так, предлагалось данные Сакле для ядер $^{\text{ест}}\text{Rb}$, ^{89}Sr , ^{89}Y , ^{90}Zr , ^{127}I , ^{197}Au и ^{208}Pb уменьшить путем умножения на коэффициент 0.82–0.93, данные для ядра ^{89}Y и изотопов

$^{90,91,92,94}\text{Zr}$ считать согласующимися, а данные Ливермора для ядер $^{206,207,208}\text{Pb}$ и ^{209}Bi увеличить путем умножения на коэффициент 1.22.

При анализе достоверности экспериментальных сечений парциальных реакций на ядре ^{208}Pb было установлено [8], что данные эксперимента Ливермора [22], в отличие от данных Сакле [23], физическим критериям достоверности не удовлетворяют. В этой связи оценка достоверных сечений реакций была выполнена с помощью экспериментально-теоретического метода (4) при использовании сечения выхода нейтронов $\sigma^{\text{эксп}}(\gamma, xn)$, полученного в Сакле [23], которое к тому же согласуется с результатами теоретических расчетов в КМФЯР [14, 15]. Справедливость такого выбора подтверждается сравнением результатов разных экспериментов, выполненных для ядра ^{208}Pb . На рис. 2 в. представлены сечения реакции выхода нейтронов $\sigma^{\text{эксп}}(\gamma, xn)$, полученные для этого ядра с помощью аннигиляционных и меченых фотонов, γ -квантов от обратного комптоновского рассеяния релятивистских электронов на пучке мощного лазера, сечение, оцененное с помощью метода редукции [24] по результатам экспериментов, полученных на разных фотонных пучках, а также — сечение $\sigma^{\text{теор}}(\gamma, xn)$, рассчитанное в КМФЯР. Хорошо видно, что все обсуждаемые сечения реакции (γ, xn) , за исключением полученного в Ливерморе [22], согласуются между собой, а сечение [22] оказывается существенно заниженным, что полностью согласуется с данными, приведенными на рис. 2 в. При проведении оценки с помощью экспериментально-теоретического метода [8] было установлено, что отношение интегральных сечений реакции выхода нейтронов $\sigma^{\text{эксп}}(\gamma, xn)$, полученных в Сакле и Ливерморе, равно 1.22 в полном соответствии с коэффициентом, рекомендованном ранее [4].

Данные для ядра ^{208}Pb (рис. 2 в) существенно занижены по сравнению с результатами расчетов в КМФЯР, согласующимися со всеми другими известными данными для этого ядра. В связи с этим экспериментальные сечения реакции $\sigma^{\text{эксп}}(\gamma, xn)$, полученные для ядер $^{206,207}\text{Pb}$ (рис. 2 а и б) в единственном эксперименте Ливермора [22], не могут быть использованы в процедуре оценки (4) непосредственно, поскольку оба также оказываются существенно заниженными по сравнению с результатами расчетов в КМФЯР. Следует отметить, что для обоих ядер $^{206,207}\text{Pb}$ экспериментальные сечения в области энергий налетающих фотонов до $B2n$ оказываются существенно заниженными по сравнению с теоретически рассчитанными. Поскольку результаты других экспериментов для ядер $^{206,207}\text{Pb}$ отсутствуют, для проведения оценки достоверных сечений парциальных реакций на этих ядрах, результаты эксперимента [22] $\sigma^{\text{эксп}}(\gamma, xn)$ были нормированы на соответствующие теоретические сечения $\sigma^{\text{теор}}(\gamma, xn)$. По результатам расчетов интегральных сечений реакции были получены коэффициенты нормировки 1.13 для ядра ^{206}Pb и 1.21 — ^{207}Pb .

Оцененные в таком подходе сечения реакций на яд-

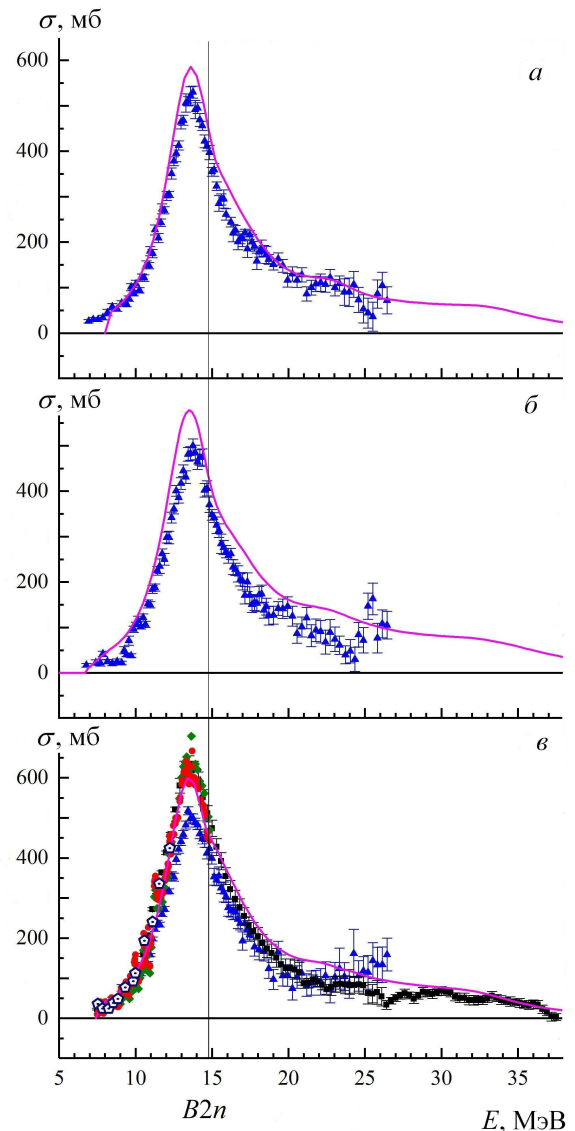


Рис. 2. Сравнение экспериментальных ([22] — треугольники, [23] — квадраты, [25] — ромбы, [26] — пятиугольники), оцененных ([24] — кружки) и рассчитанных теоретически ([14, 15] — линии) сечений реакций выхода нейтронов $\sigma^{\text{эксп}}(\gamma, xn)$ на изотопах Pb: а — ^{206}Pb , б — ^{207}Pb , в — ^{208}Pb

рах $^{206,207}\text{Pb}$ приведены на рис. 3 и 4. Следует отметить, что использованный метод оценки (4) позволил для обоих ядер в областях энергий экспериментальных сечений выхода нейтронов $\sigma^{\text{эксп}}(\gamma, xn)$ впервые оценить сечения реакции $(\gamma, 3n)$, которые не были получены в эксперименте [22].

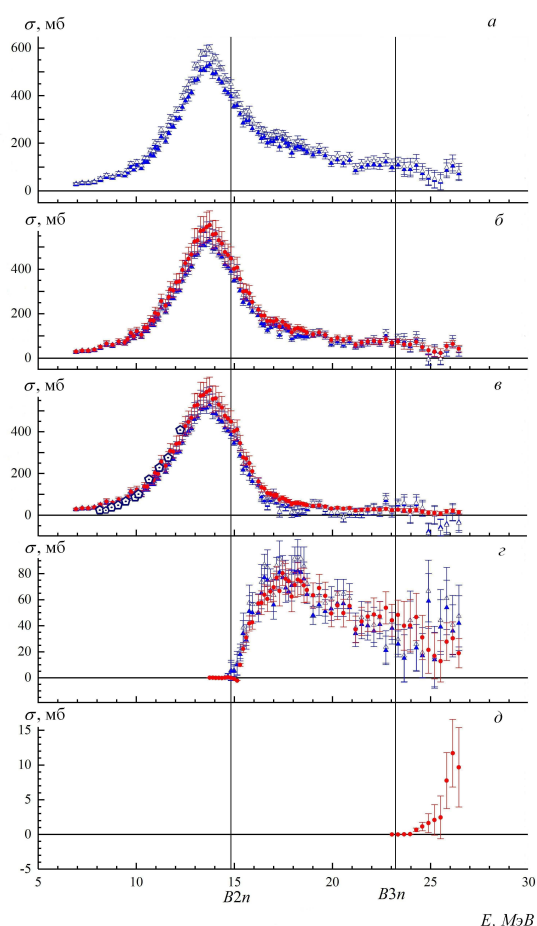


Рис. 3. Новые оцененные (кружки), экспериментальные (заполненные треугольники) и нормированные (незаполненные треугольники) сечения реакций на ядре ^{206}Pb : *a* — $\sigma(\gamma, xn)$, *б* — $\sigma(\gamma, sn)$, *в* — $\sigma(\gamma, 1n)$, *г* — $\sigma(\gamma, 2n)$, *д* — $\sigma(\gamma, 3n)$

Соответствующие интегральные сечения реакций представлены в табл. 3. Экспериментальные и оцененные сечения реакций сравниваются также с сечениями, которые получены в результате простой нормировки, выполненной с использованием приведенных выше коэффициентов 1.13 для ядра ^{206}Pb и 1.21 — ^{207}Pb . Данные рис. 4 и 5 и табл. 3 свидетельствуют о том, что простая нормировка экспериментальных сечений, аналогичная предложенной ранее [4], обсуждаемые проблемы систематических расхождений данных по реакциям $(\gamma, 1n)$ и $(\gamma, 2n)$ не решает. При разной направленности расхождений нормировка, уменьшая расхождения данных по реакции $(\gamma, 1n)$, увеличивает расхождения данных по реакции $(\gamma, 2n)$.

Отношения $\sigma_{\text{оцен}}^{\text{инт}}/\sigma_{\text{эксп}}^{\text{инт}}$ оцененных и экспериментальных интегральных сечений, рассчитанные для ядер $^{206,207,208}\text{Pb}$ в областях энергий налетающих фотонов до порогов B_{3n} реакции $(\gamma, 3n)$ приведены в табл. 4 и оказываются полностью аналогичными со-

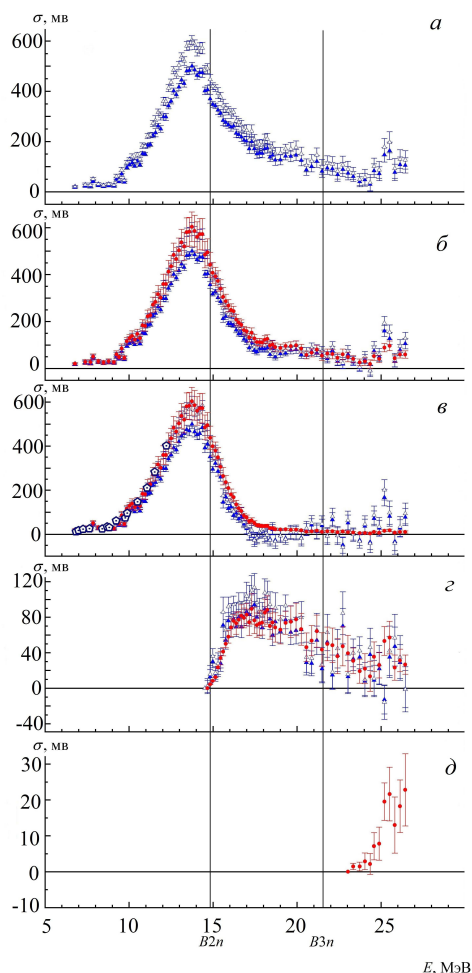


Рис. 4. Новые оцененные (кружки), экспериментальные (заполненные треугольники) и нормированные (незаполненные треугольники) сечения реакций на ядре ^{207}Pb : *a* — $\sigma(\gamma, xn)$, *б* — $\sigma(\gamma, sn)$, *в* — $\sigma(\gamma, 1n)$, *г* — $\sigma(\gamma, 2n)$, *д* — $\sigma(\gamma, 3n)$

ответствующим данным для ядер ^{75}As , ^{127}I и ^{181}Ta (табл. 2). Это означает, что и в случае исследованных ядер $^{206,207}\text{Pb}$ в эксперименте [22] значительные количества нейтронов из реакции $(\gamma, 1n)$ были потеряны. В этой связи экспериментальные данные для ядер, полученные в экспериментах Ливермора [18, 20–22] не являются достоверными и не могут быть рекомендованы для использования в исследованиях и приложениях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты выполненных ранее исследований достоверности экспериментальных сечений фотонейтронных реакций и оценки с помощью экспериментально-теоретического метода данных, удовлетворяющих физическим критериям достоверности, для ядер ^{75}As , ^{127}I , ^{181}Ta и ^{208}Pb использованы для оценки новых сечений парциальных и полных реакций для ядер $^{206,207}\text{Pb}$. Все

Таблица 4. Отношения $\sigma_{\text{оцен}}^{\text{инт}}/\sigma_{\text{эксп}}^{\text{инт}}$ (в единицах МэВ·мб) оцененных и экспериментальных интегральных сечений фотонейтронных реакций на ядрах $^{206,207,208}\text{Pb}$ (для ядра ^{208}Pb — по данным [8]), рассчитанных в областях энергий до порогов $B3n$ реакций ($\gamma, 3n$)

	^{206}Pb	^{207}Pb	^{208}Pb
(γ, xn)	1.13 (3643.9/3224.6)	1.21 (3444.3/2853.7)	1.20 (3820.8/3186.7)
(γ, sn)	1.15 (3201.4/2799.1)	1.24 (3022.4/2440.3)	1.30 (3270.9/2508.2)
$(\gamma, 1n)$	1.19 (2758.3/2322.1)	1.30 (2598.9/2002.1)	1.40 (2699.6/1922.0)
$(\gamma, 2n)$	1.02 (442.7/426.4)	1.02 (423.4/413.4)	0.85 (571.2/670.9)

обсуждаемые ядра объединяют существенные расхождения между оцененными сечениями и экспериментальными сечениями Ливермора (а также между сечениями Ливермора и Сакле) выхода нейтронов $\sigma(\gamma, xn)$ в областях энергий налетающих фотонов до соответствующих порогов $B2n$ реакции ($\gamma, 2n$). Установлено, что для всех 6 ядер соотношения между сечениями реакций $\sigma(\gamma, 1n)$, $\sigma(\gamma, 2n)$, $\sigma(\gamma, sn) = \sigma(\gamma, 1n) + \sigma(\gamma, 2n)$ и $\sigma(\gamma, xn) = \sigma(\gamma, 1n) + 2\sigma(\gamma, 2n)$, получен-

ными в Ливерморе, свидетельствуют о том, что в этих экспериментах значительные количества нейтронов из реакции ($\gamma, 1n$) были потеряны. В этой связи, данные Ливермора для ядер ^{75}As [20], ^{127}I [21], ^{181}Ta [18], $^{206,207,208}\text{Pb}$ [22] не могут считаться достоверными и быть рекомендованы для использования в исследованиях и приложениях.

Работа выполнена в Отделе электромагнитных процессов и взаимодействий атомных ядер НИИЯФ.

- [1] *Dietrich S.S., Berman B.L.* // At. Data Nucl. Data Tables. 1988. **38**. P. 199.
- [2] Международная база данных по ядерным реакциям (EXFOR) Центра данных фотоядерных экспериментов НИИЯФ МГУ (<http://cdfc.sinp.msu.ru/exfor/index.php>), International Atomic Energy Agency Nuclear Data Section database «Experimental Nuclear Reaction Data (EXFOR)» (<http://www-nds.iaea.org/exfor>), USA National Nuclear Data Center database «CSISRS and EXFOR Nuclear Reaction Experimental Data» (<http://www.nndc.bnl.gov/exfor/exfor00.htm>).
- [3] *Wolynec E., Martins M.N.* // Revista Brasileira de Fisica. 1987. **17**. P. 56.
- [4] *Berman B.L., Pywell R.E., Dietrich S.S., Thompson M.N., McNeill K.G., Jury J.W.* // Phys. Rev. 1987. **C36**. P. 1286.
- [5] *Varlamov V.V., Ishkhanov B.S.* // Study of consistency between (γ, xn) , $(\gamma, n) + (\gamma, np)$ and $(\gamma, 2n)$ reaction cross sections using data systematics. INDC(CCP)-433, IAEA NDS. Vienna, 2002.
- [6] *Варламов В.В., Песков Н.Н., Руденко Д.С., Степанов М.Е.* // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерные константы. 2003. **1–2**. С. 48.
- [7] *Варламов В.В., Ишханов Б.С., Орлин В.Н., Четвертова В.А.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2010. **74**. С. 875. (Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2010. **74**. P. 833).
- [8] *Варламов В.В., Ишханов Б.С., Орлин В.Н., Трошчиев С.Ю.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2010. **74**. С. 884. (Varlamov V.V., Ishkhanov B.S., Orlin V.N., Troshchiev S.Yu. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2010. **74**. P. 842).
- [9] *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).
- [10] *Варламов В.В., Ишханов Б.С., Орлин В.Н., Песков Н.Н., Степанов М.Е.* // ЯФ. 2013. **76**. С. 1484. (Varlamov V.V., Ishkhanov B.S., Orlin V.N., Peskov N.N., Stepanov M.E. // Phys. Atom. Nucl. 2013. **76**. P. 1403).
- [11] *Варламов В.В., Ишханов Б.С.* // ЯФ. 2017. **80**. С. 554. (Varlamov V.V., Ishkhanov B.S. // Phys. Atom. Nucl. 2017. **80**. P. 957).
- [12] *Varlamov V.V., Ishkhanov B.S., Orlin V.N., Stopani K.A.* // Eur. Phys. J. 2014. **A50**. P. 114.
- [13] *Varlamov V.V.* // Phys. Part. Nucl. 2019. **50**. P. 637.
- [14] *Ишханов Б.С., Орлин В.Н.* // ЭЧАЯ. 2007. **38**. С. 460. (Ishkhanov B.S., Orlin V.N. // Phys. Part. Nucl. 2007. **38**. P. 232).
- [15] *Ишханов Б.С., Орлин В.Н.* // ЯФ. 2008. **71**. С. 517. (Ishkhanov B.S., Orlin V.N. // Phys. Atom. Nucl. 2008. **71**. P. 493).
- [16] *Bramblett R.L., Caldwell J.T., Harvey R.R., Fultz S.C.* // Phys. Rev. 1964. **133**. P. B869.
- [17] *Bergere R., Beil H., Veyssiere A.* // Nucl. Phys. 1968. **A121**. P. 463.
- [18] *Bramblett R.L., Caldwell J.T., Auchampaugh G.F., Fultz S.C.* // Phys. Rev. 1963. **129**. P. 2723.
- [19] *Варламов В.В., Давыдов А.И.* // ЯФ. 2021. **84**. С. 370. (Varlamov V.V., Davydov A.I. Phys. Atom. Nucl. // 2021. **84**. P. 603).
- [20] *Berman B.L., Bramblett R.L., Caldwell J.T., Davis H.S., Kelly M.A., Fultz S.C.* // Phys. Rev. 1969. **177**. P. 1745.
- [21] *Bramblett R.L., Caldwell J.T., Berman B.L., Harvey R.R., Fultz S.C.* // Phys. Rev. 1966. **143**. P. 1198.
- [22] *Harvey R.R., Caldwell J.T., Bramblett R.L., Fultz S.C.*

- // Phys. Rev. 1964. **136**. P. B126.
[23] *Veyssiere A., Beil H., Bergere R., Carlos P., Lepretre A.*
// Nucl. Phys. 1970. **A 159**. P. 561.
[24] *Varlamov V. V., Efimkin N. G., Ishkhanov B. S., Sapunenko V. V.* Evaluation of photonuclear reaction cross sections using the reduction method for large systematic uncertainties. INDC(CCP)–393, IAEA NDS, Vienna, Austria, 1994.
[25] *Young L. M.* / Ph. D. Thesis. University of Illinois, 1972.
[26] *Kondo T., Utsunomiya H., Goriely S. et al.* // Phys. Rev. 2012. **C86**. P. 014316.

Systematical uncertainties of photonuclear experiments for Pb isotopes and As, I, and Ta nuclei

V. V. Varlamov^{1,b}, A. I. Davydov^{2,a}, V. N. Orlin¹

¹Lomonosov Moscow State University, Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics
Moscow 119991, Russia ²Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics. Moscow 119991, Russia
E-mail: ^aAlexDavydovMet@gmail.com, ^bvarlamov@depni.sinp.msu.ru

It was found before that experimental $(\gamma, 1n)$, $(\gamma, 2n)$ and $(\gamma, 3n)$ reactions cross sections obtained for many nuclei using the beams of quasimonoeenergetic annihilation photons and the method for photoneutron multiplicity sorting do not satisfy to objective physical criteria of data reliability. Using the experimental-theoretical method of evaluation the new data on partial and total photoneutron reaction cross sections satisfying the mentioned criteria were obtained. It was shown that in the majority of cases significant disagreements between evaluated and experimental cross sections are because presence of noticeable systematical uncertainties of the processes of identification of multiplicities of detected neutrons. The new kind uncertainties from the loss of many neutrons from $(\gamma, 1n)$ rreaction were found out for several nuclei (⁷⁵As, ¹²⁷I, ¹⁸¹Ta). The evaluation of reliable cross sections $\sigma(\gamma, 1n)$, $\sigma(\gamma, 2n)$, $\sigma(\gamma, 3n)$, $\sigma(\gamma, sn) = \sigma(\gamma, 1n) + \sigma(\gamma, 2n) + \sigma(\gamma, 3n)$ and $\sigma(\gamma, xn) = \sigma(\gamma, 1n) + 2\sigma(\gamma, 2n) + \sigma(\gamma, 3n)$ was done for ^{206,207}Pb. It was shown that for both isotopes ^{206,207}Pb as well as for ²⁰⁸Pb investigated before similar to ⁷⁵As, ¹²⁷I, ¹⁸¹Ta the competitions between various reactions cross sections testify to unreliability of experimental data.

PACS: 25. 20. -x.

Keywords: ⁷⁵As, ¹²⁷I, ¹⁸¹Ta, ^{206,207,208}Pb, giant dipole resonance, partial photoneutron reaction cross sections, neutron multiplicity, physical data reliability criteria, experimental–theoretical method for reaction cross section evaluation, new reliable cross sections.

Received 06 June 2022.

Сведения об авторах

1. Варламов Владимир Васильевич — доктор физ.-мат. наук, профессор, гл. науч. сотрудник тел.: (495) 939-34-83, e-mail: vvvarlamov@gmail.com.
2. Давыдов Александр Иванович — аспирант; e-mail: alexdavydovmet@gmail.com.
3. Орлин Вадим Николаевич — доктор физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел. : (495) 939-56-31, e-mail: OrlinVN@yandex.ru.