

УДК 539.17

ФОТОРАСЩЕПЛЕНИЕ ЯДЕР $^{206, 207, 208}\text{Pb}$: ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ОЦЕНЕННЫЕ СЕЧЕНИЯ ФОТОНЕЙТРОННЫХ РЕАКЦИЙ

© 2022 г. В. В. Варламов^{1, *}, А. И. Давыдов², В. Н. Орлин¹

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
“Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова”,

Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобелыцына, Москва, Россия

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

“Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова”, физический факультет, Москва, Россия

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

Поступила в редакцию 15.11.2021 г.

После доработки 06.12.2021 г.

Принята к публикации 22.12.2021 г.

Новые сечения парциальных фотонейтронных реакций $(\gamma, 1n)$, $(\gamma, 2n)$ и $(\gamma, 3n)$ на ядрах $^{206, 207}\text{Pb}$ оценены с помощью экспериментально-теоретического метода с использованием объективных физических критериев достоверности данных и результатов оценки, выполненной ранее для ядра ^{208}Pb . В соотношениях между сечениями разных реакций ядер $^{206, 207, 208}\text{Pb}$ наблюдается характерная систематика, свидетельствующая о потере заметной части нейтронов из реакции $(\gamma, 1n)$. Это делает экспериментальные данные недостоверными.

DOI: 10.31857/S0367676522040251

ВВЕДЕНИЕ

Данные по сечениям полных и парциальных фотонейтронных реакций широко используются как в фундаментальных и прикладных исследованиях, так и разнообразных приложениях. Такие данные для магического ($Z = 82$) ядра ^{208}Pb популярны при сравнении экспериментальных данных с результатами расчетов в рамках различных моделей. В этой связи для ядра ^{208}Pb выполнено достаточно большое количество разных экспериментов с использованием тормозного γ -излучения [1–3], квазимоноэнергетических аннигиляционных фотонов [4, 5], моноэнергетических меченых фотонов [6], квазимоноэнергетических фотонов, полученных в процессах комптоновского рассеяния релятивистских электронов на пучке мощного лазера [7]. Процедуры получения информации о сечении конкретной реакции в упомянутых экспериментах различались, в связи с чем, заметные расхождения наблюдались [8] не только между полученными в них сечениями парциальных $(\gamma, 1n)$, $(\gamma, 2n)$ и $(\gamma, 3n)$ реакций, но и между сечениями полной фотонейтронной реакции

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

а также между сечениями выхода нейтронов

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

Экспериментальные данные по сечениям выхода $\sigma(\gamma, xn)$ для ядра ^{208}Pb , полученные в разных экспериментах, вместе с результатами их совместной оценки с помощью метода редукции [9] и теоретических расчетов в рамках комбинированной модели фотоядерных реакций (КМФЯР) [10] представлены на рис. 1в. Они свидетельствуют о том, что за исключением сечения, полученного в Ливерморе (США) [4], существенно заниженного по сравнению с остальными, представленные сечения выхода нейтронов $\sigma(\gamma, xn)$ на ядре ^{208}Pb согласуются между собой. То, что полученное в эксперименте [4] сечение $\sigma(\gamma, xn)$ существенно расходится с соответствующим сечением Сакле [5], следует особо отметить, поскольку именно в этих двух экспериментах были получены сечения парциальных реакций $(\gamma, 1n)$ и $(\gamma, 2n)$, которые также существенно расходятся друг с другом. Так, отношения интегральных сечений $R = \sigma_{\text{Сакле}}^{\text{инт}} / \sigma_{\text{Ливермор}}^{\text{инт}}$ для реакций $(\gamma, 1n)$ и $(\gamma, 2n)$ равны, соответственно, $R(1n) = 1.21$ и $R(2n) = 0.77$. В такой ситуации для ядра ^{208}Pb (как и для других исследованных в обеих лабораториях ядер (^{51}V , ^{75}As , ^{89}Y , ^{90}Zr , ^{115}In , 116 , 117 , 118 , 120 , ^{124}Sn , ^{127}I , ^{133}Cs , ^{159}Tb , ^{165}Ho , ^{181}Ta , ^{197}Au , ^{232}Th , ^{238}U)) оказывается затруднительным определение того, какие именно данные являются достоверными и могут быть

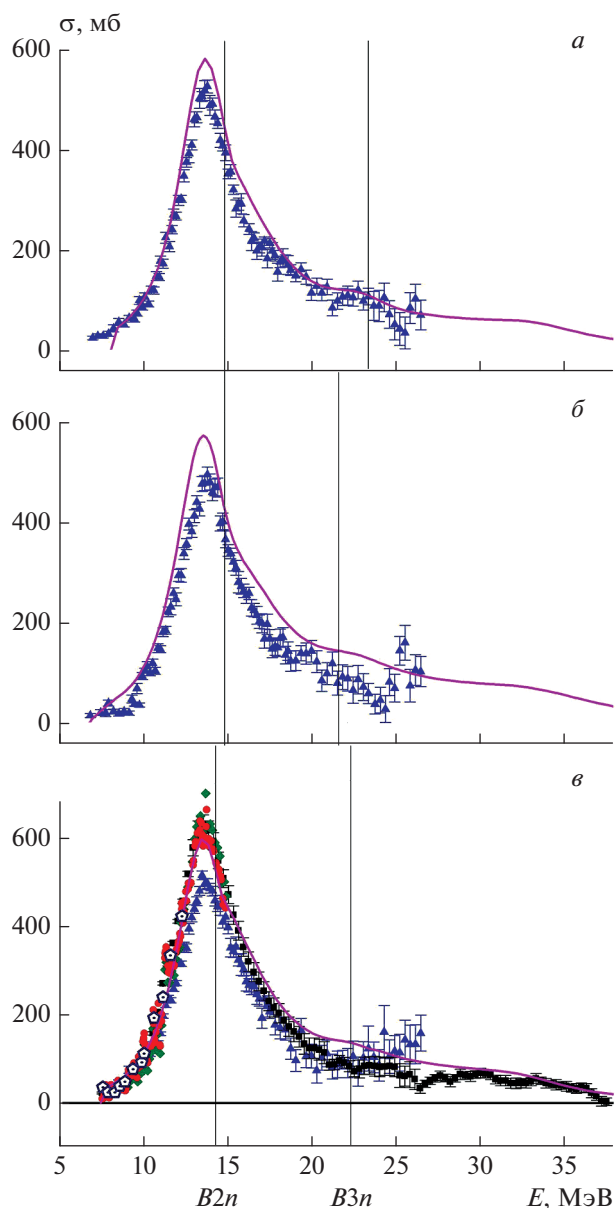


Рис. 1. Сравнение экспериментальных данных (Ливермор [4] – треугольники, Сакле [5] – квадраты, меченые фотоны [6] – ромбы, γ -кванты комптоновского рассеяния на лазерном пучке [7] – пятиугольники) с данными, оцененными с помощью метода редукции ([8] – кружки) и результатами расчетов в рамках КМФЯР ([10] – линии): *a* – ^{206}Pb , *б* – ^{207}Pb , *в* – ^{208}Pb .

рекомендованы для использования в исследованиях и приложениях [8]. При этом важно отметить, что в случае всех трех изотопов $^{206}, ^{207}, ^{208}\text{Pb}$ экспериментальные сечения $\sigma(\gamma, xn)$, полученные в эксперименте [4], оказываются существенно заниженными по сравнению с соответствующими результатами расчетов в рамках КМФЯР.

В случае ядра ^{208}Pb достоверность экспериментальных данных [4, 5] была исследована [11] с использованием экспериментально-теоретического метода оценки, основанного на объективных физических критериях достоверности данных [12, 13]. Оцененные сечения парциальных реакций различной множественности i были получены с помощью соотношений

$$\begin{aligned} \sigma^{\text{оцен}}(\gamma, in) &= F_i^{\text{теор}} \sigma^{\text{эксп}}(\gamma, xn) = \\ &= [\sigma^{\text{теор}}(\gamma, in) / \sigma^{\text{теор}}(\gamma, xn)] \sigma^{\text{эксп}}(\gamma, xn), \end{aligned} \quad (3)$$

в которых критерии достоверности данных – отношения

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

рассчитывались в КМФЯР [10] и определяли соотношения сечений парциальных реакций при условии, что их соответствующая сумма равна экспериментальному сечению $\sigma^{\text{эксп}}(\gamma, xn)$.

Было установлено [11], что оцененные сечения $\sigma^{\text{оцен}}(\gamma, 1n)$ и $\sigma^{\text{оцен}}(\gamma, 2n)$ на ядре ^{208}Pb заметно отличаются от данных [5] и существенно расходятся с данными [4]. Поскольку сечения полных и парциальных фотонейтронных реакций для изотопов $^{206}, ^{207}\text{Pb}$ были получены только в эксперименте Ливермора [4], настоящая работа посвящена оценке сечений этих реакций с использованием экспериментально-теоретического метода и результатов выполненной ранее оценки соответствующих данных для изотопа ^{208}Pb .

ОЦЕНКА СЕЧЕНИЙ ФОТОНЕЙТРОННЫХ РЕАКЦИЙ НА ЯДРАХ $^{206}, ^{207}\text{Pb}$

Ядро ^{207}Pb

Достоверность экспериментальных данных [4] для ядра ^{207}Pb была исследована с помощью физических критериев $F_i^{\text{эксп}}$, определяемых по аналогии с отношениями $F_i^{\text{теор}}$ (4) и обладающих характерными свойствами:

- отношения F_i должны иметь положительные значения;
- для множественностей $i = 1, 2, 3$ отношения F_i должны иметь значения, меньшие, соответственно, 1,00, 0,50, 0,33 (превышения означают, что в экспериментальных сечениях присутствуют систематические погрешности).

Сравнение экспериментальных $F_{1,2}^{\text{эксп}}$ [4] и теоретических $F_{1,2}^{\text{теор}}$ [10] отношений (рис. 2) свидетельствует о том, что:

- при энергиях фотонов $E > \sim 17$ МэВ, наблюдаются многочисленные физически запрещенные отрицательные значения отношения $F_i^{\text{эксп}}$;

– в той же области энергий наблюдаются многочисленные недостоверные значения отношения $F_2^{\text{эксп}}$, превышающие предел 0.50;

– во всей исследованной энергии фотонов наблюдаются значительные расхождения между отношениями $F_{1,2}^{\text{эксп}}$ и $F_{1,2}^{\text{теор}}$.

Очевидно, что к достоверности экспериментальных данных [4] могут быть предъявлены серьезные претензии, которые делают оценку достоверных сечений парциальных реакций для ядра ^{207}Pb весьма актуальной. В экспериментально-теоретическом методе оценки (3) в качестве исходной экспериментальной информации используется сечение выхода нейтронов (2) [11–28]. Однако из данных рис. 1 следует, что в случаях [4] для изотопов $^{206, 207}\text{Pb}$ такие сечения не должны использоваться непосредственно. Поскольку в случае ^{208}Pb экспериментальное [4] сечение $\sigma^{\text{эксп}}(\gamma, xn)$ существенно занижено по сравнению со всеми остальными обсуждаемыми сечениями, при оценке данных для этого ядра [11] использовалось сечение $\sigma^{\text{эксп}}(\gamma, xn)$ [5], которое согласуется с результатами расчета [10]. Очевидно, что в случаях ядер $^{206, 207}\text{Pb}$ экспериментальные данные [4] могут быть использованы в процедуре оценки лишь после их соответствующей нормировки на сечения $\sigma^{\text{теор}}(\gamma, xn)$, рассчитанные в КМФЯР [10].

В связи со сказанным, для использования в процедуре оценки (3) экспериментальное сечение $\sigma^{\text{эксп}}(\gamma, xn)$ [4] нормировалось на сечение $\sigma^{\text{теор}}(\gamma, xn)$, рассчитанное в КМФЯР. На основании данных об интегральных сечениях обеих реакций на ядре ^{207}Pb , рассчитанных в области энергий фотонов до порога $B2n = 14.8$ реакции $(\gamma, 2n)$, для коэффициента нормировки было получено значение $K_{\text{норм}} = \sigma_{\text{теор}}^{\text{инт}}(\gamma, xn) / \sigma_{\text{эксп}}^{\text{инт}}(\gamma, xn) = 1846.6 / 1529.8 = 1.21$.

Такое значение согласуется с рекомендациями [29] специального исследования, выполненного в Ливерморе для нескольких ядер с целью исследования расхождений полученных результатов с данными Сакле. Наличие расхождений было констатировано, а в качестве их причин назывались возможные ошибки в определении потока налетающих фотонов и эффективности используемых детекторов. Для согласования величин сечений реакции $(\gamma, 1n)$ для ядер $^{206, 207, 208}\text{Pb}$, полученных в Сакле и Ливерморе, была рекомендована нормировка последних с коэффициентом 1.22. Вместе с тем в случае ядра ^{208}Pb рекомендовалось уменьшение (0.93) данных Сакле. Противоречащие друг другу рекомендации означают, что упомянутые выше возможные ошибки в определении потоков фотонов и эффективностей детекторов могут оказы-

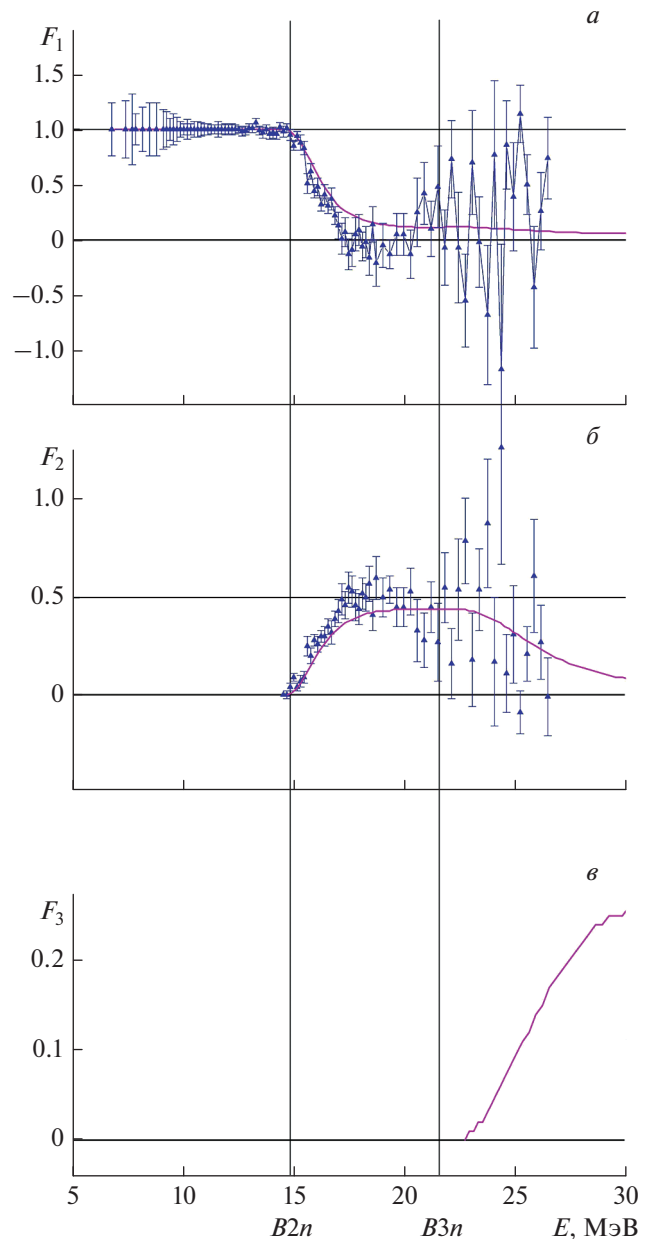


Рис. 2. Экспериментальные $F_i^{\text{эксп}}$ ([4] – треугольники) и теоретические $F_i^{\text{теор}}$ ([9] – линии) отношения сечений парциальных реакций и сечения выхода нейтронов (4) для ядра ^{207}Pb .

вать существенное (и разнонаправленное) влияние на процессы определения абсолютных величин сечений исследуемых реакций.

Сечения парциальных реакций $(\gamma, 1n)$, $(\gamma, 2n)$ и $(\gamma, 3n)$, оцененные с помощью экспериментально-теоретического метода (3) при использовании полученного коэффициента нормировки $K_{\text{норм}} = 1.21$,

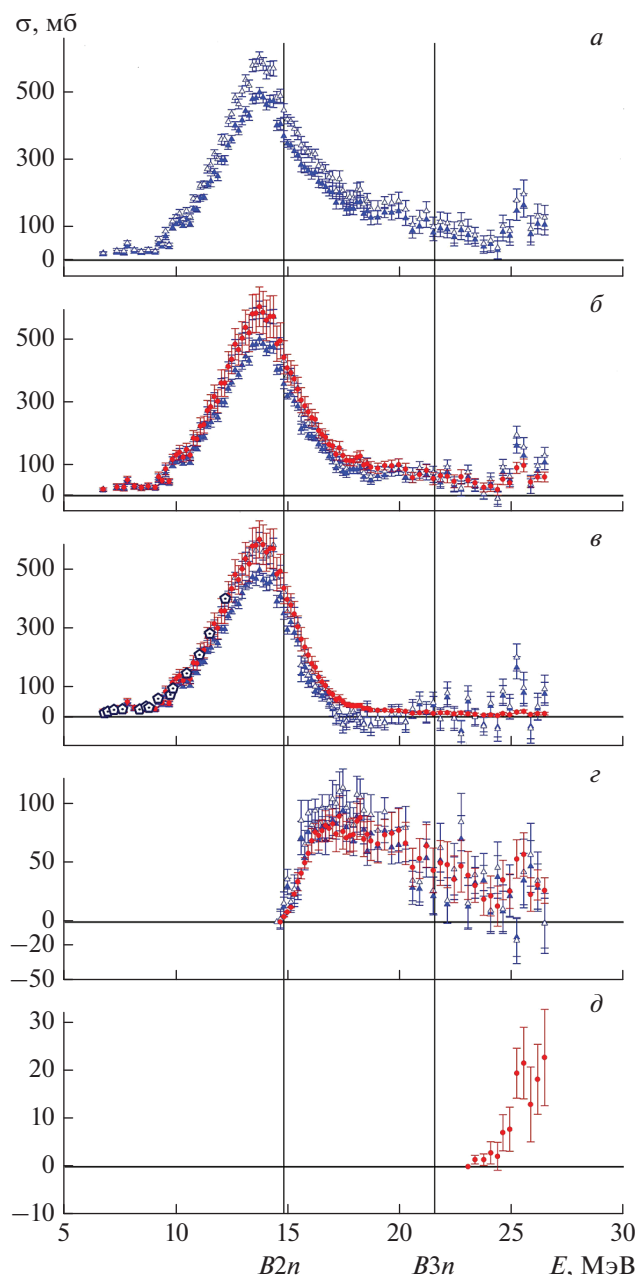


Рис. 3. Сравнение оцененных (кружки), экспериментальных ([4] – заполненные треугольники, [7] – пятиугольники) и нормированных (незаполненные треугольники) сечений реакций на ядре ^{206}Pb : $\sigma(\gamma, xn)$ (а), $\sigma(\gamma, sn)$ (б), $\sigma(\gamma, 1n)$ (в), $\sigma(\gamma, 2n)$ (г), $\sigma(\gamma, 3n)$ (д).

приведены на рис. 3, данные об интегральных сечениях реакций представлены в табл. 1.

Предложенный метод оценки (3) позволяет оценивать сечения реакций различной множественности в области энергий сечения выхода $\sigma_{\text{экс}}^{\text{инт}}(\gamma, xn)$. В этой связи в области энергий фотонов до 26.4 МэВ было оценено сечение реакции $(\gamma, 3n)$, которое не было определено экспериментально [4].

Новые оцененные сечения реакций для ядра ^{206}Pb были получены аналогичным способом. В случае ядра ^{206}Pb (рис. 1а) экспериментальные данные [4] и результаты расчета [10] различаются меньше, чем это наблюдается для ядер ^{207}Pb (рис. 1б) и ^{208}Pb (рис. 1в): коэффициент нормировки, рассчитанный для области энергий фотонов до $B2n = 14.8$ МэВ, имеет значение $K_{\text{норм}} = \sigma_{\text{теор}}^{\text{инт}}(\gamma, xn) / \sigma_{\text{экс}}^{\text{инт}}(\gamma, xn) = 1927.4 / 1705.9 = 1.13$. Сечения парциальных реакций $(\gamma, 1n)$, $(\gamma, 2n)$ и $(\gamma, 3n)$, оцененные (3) при использовании $\sigma_{\text{экс}}^{\text{инт}}(\gamma, xn)$ нормированного с помощью коэффициента $K_{\text{норм}} = 1.13$ приведены на рис. 4. Соответствующие данные об интегральных сечениях реакций представлены в табл. 2. Аналогично тому, как это было сделано в случае ядра ^{207}Pb , $\sigma(\gamma, 3n)$ было оценено в области энергий фотонов до 26.4 МэВ.

СРАВНЕНИЕ ОЦЕНЕННЫХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ СЕЧЕНИЙ РЕАКЦИЙ НА ЯДРАХ $^{206}, ^{207}, ^{208}\text{Pb}$

Приведенные на рис. 3 и 4 и в табл. 1 и 2 данные свидетельствуют о том, что в случаях обоих исследованных ядер $^{206}, ^{207}\text{Pb}$:

- оцененные сечения парциальных реакций $(\gamma, 1n)$ и $(\gamma, 2n)$ существенно отличаются от экспериментальных данных;

- традиционная простая нормировка экспериментальных данных не решает проблемы их систематических расхождений с оцененными данными.

Данные табл. 1, полученные в области энергий до порога $B3n = 21.6$ МэВ реакции $(\gamma, 3n)$ на ядре ^{207}Pb , свидетельствуют о том, что в случае реакции $(\gamma, 1n)$ оцененное интегральное сечение равно 2598.9 МэВ мб и на 30% превышает экспериментальное интегральное сечение (2002.1 МэВ мб). Нормировка (умножение на коэффициент 1.21) уменьшает это расхождение (2598.9/2416.9) до 7%, но в то же время в случае реакции $(\gamma, 2n)$ от практического совпадения (423.4/413.4) приводит к расхождению на 18% (498.7/423.4). Данные табл. 2, полученные в области энергий до порога $B3n = 23.2$ МэВ реакции $(\gamma, 3n)$, свидетельствуют о том, что и на ядре ^{206}Pb простая нормировка уменьшает расхождение данных для $(\gamma, 1n)$ реакции (2758.3/2623.9 = 1.05 по сравнению с 2758.3/2322.1 = 1.18), но заметно увеличивает расхождение данных для $(\gamma, 2n)$ реакции (481.8./442.7 = 1.10 по сравнению с 442.7/426.4 = 1.03).

Таблица 1. Интегральные сечения (в единицах МэВ мб) оцененных, экспериментальных и нормированных сечений фотонейтронных реакций на ядре ²⁰⁷Pb

Реакция	Ливермор [4]	Оценка	Ливермор-нормировка
$E_{\text{инт}} = B2n = 14.8 \text{ МэВ}$			
(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
$E_{\text{инт}} = B3n = 21.6 \text{ МэВ}$			
(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
$E_{\text{инт}} = 26.4 \text{ МэВ}$			
(γ, xn)	3268.1 ± 30.3	3945.0 ± 36.6	3945.0 ± 36.6
(γ, sn)	2717.5 ± 23.5	3281.4 ± 38.4	3280.3 ± 28.3
($\gamma, 1n$)	2133.6 ± 38.4	2648.9 ± 32.7	2575.4 ± 46.3
($\gamma, 2n$)	550.6 ± 19.2	599.6 ± 19.7	664.7 ± 23.2
($\gamma, 3n$)		32.8 ± 3.8	

Таблица 2. Интегральные сечения (в единицах МэВ мб) оцененных, экспериментальных и нормированных сечений фотонейтронных реакций на ядре ²⁰⁶Pb

Реакция	Ливермор [4]	Оценка	Ливермор-нормировка
$E_{\text{инт}} = B2n = 14.8 \text{ МэВ}$			
(γ, xn)	1761.9 ± 8.2	1992.2 ± 9.3	1992.2 ± 9.3
(γ, sn)	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
$E_{\text{инт}} = B3n = 23.2 \text{ МэВ}$			
(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
$E_{\text{инт}} = 26.4 \text{ МэВ}$			
(γ, xn)	3478.5 ± 27.2	3930.6 ± 30.8	3930.6 ± 30.8
(γ, sn)	2947.5 ± 21.5	3368.4 ± 36.2	3330.7 ± 24.3
($\gamma, 1n$)	2321.7 ± 33.8	2816.6 ± 32.6	2623.9 ± 38.2
($\gamma, 2n$)	532.6 ± 16.7	541.8 ± 15.6	601.6 ± 18.9
($\gamma, 3n$)		10.0 ± 1.9	

ПРИЧИНЫ РАСХОЖДЕНИЙ ОЦЕНЕННЫХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ СЕЧЕНИЙ РЕАКЦИЙ НА ЯДРАХ ^{206, 207, 208}Pb

Данные, приведенные в табл. 1 и 2, свидетельствуют о том, что для ядер ^{206, 207}Pb наблюдаются весьма характерные соотношения расхождений между оцененными и экспериментальными сечениями исследуемых реакций, полностью аналогичные тем, которые ранее были установлены

сначала для ядра ¹⁸¹Ta [11], а впоследствии для ядер ⁷⁵As, ¹²⁷I и ²⁰⁸Pb [30]. В табл. 3 приводятся данные об отношениях интегральных сечений реакций (γ, xn), (γ, sn), ($\gamma, 1n$) и ($\gamma, 2n$), рассчитанных для всех 6 упомянутых выше ядер в областях энергий фотонов до $B3n$ по данным Ливермора, к соответствующим данным, полученным для оцененных сечений. Следует отметить, что сечения перечисленных “сложных” реакций отличаются друг от

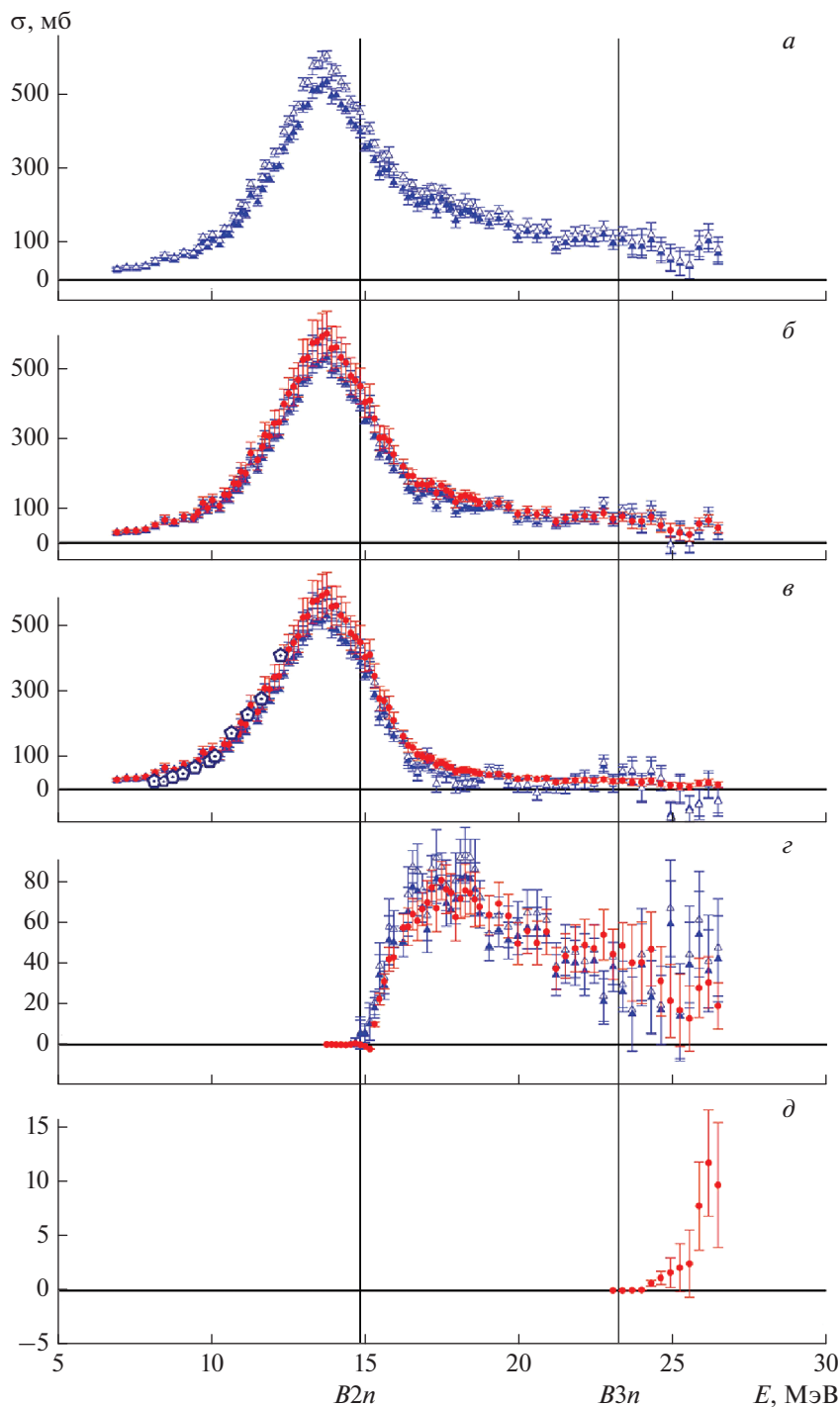


Рис. 4. Сравнение оцененных (кружки), экспериментальных ([4] – заполненные треугольники, [7] – пятиугольники) и нормированных (незаполненные треугольники) сечений реакций на ядре ^{206}Pb : $\sigma(\gamma, xn)$ (а), $\sigma(\gamma, sn)$ (б), $\sigma(\gamma, 1n)$ (в), $\sigma(\gamma, 2n)$ (г), $\sigma(\gamma, 3n)$ (д).

друга, прежде всего тем, что в них различный вклад вносит “простая” реакция $(\gamma, 1n)$:

– в сечении выхода $\sigma(\gamma, xn)$ этот вклад имеет определенное значение, поскольку $\sigma(\gamma, 1n)$ суммируется с $2\sigma(\gamma, 2n)$;

– в сечении полной фотонейтронной реакции $\sigma(\gamma, sn)$ обсуждаемый вклад возрастает, поскольку $\sigma(\gamma, 1n)$ суммируется только с $\sigma(\gamma, 2n)$;

– в сечении реакции $(\gamma, 1n)$ вклад $\sigma(\gamma, 1n)$, естественно, равен 100%;

Таблица 3. Отношения интегральных сечений $\sigma^{\text{инт}}$ (рассчитанных в единицах МэВ мб) полных и парциальных реакций, полученных для ядер ^{206, 207, 208}Pb, а также ⁷⁵As, ¹²⁷I, ¹⁸¹Ta в областях энергий фотонов до соответствующих значений порогов *B3n*

Реакция	$\sigma^{\text{инт}}_{\text{оцен}} / \sigma^{\text{инт}}_{\text{экс}}$					
	Настоящая работа		[11]	[30]		[11]
	²⁰⁶ Pb	²⁰⁷ Pb	²⁰⁸ Pb	⁷⁵ As	¹²⁷ I	¹⁸¹ Ta
(γ, xn)	1.13 (3643.9/3224.6)	1.21 (3444.3/2853.7)	1.20	1.27	1.20	1.24
(γ, sn)	1.15 (3201.4/2799.1)	1.24 (3022.4/2440.3)	1.30	1.30	1.25	1.30
($\gamma, 1n$)	1.19 (2758.3/2322.1)	1.30 (2598.9/2002.1)	1.40	1.34	1.33	1.46
($\gamma, 2n$)	1.02 (442.7/426.4)	1.02 (423.4/413.4)	0.85	1.14	0.98	1.05

– в сечении реакции ($\gamma, 2n$), вклад $\sigma(\gamma, 1n)$, столь же естественно, равен 0.

Данные табл. 3 определенно свидетельствуют о том, что в случаях всех 6 обсуждаемых ядер, чем большим в экспериментах Ливермора оказывается вклад сечения парциальной реакции ($\gamma, 1n$) в сечения реакций (γ, xn), (γ, sn) и самой ($\gamma, 1n$), тем большим оказываются их занижения по сравнению с соответствующими оцененными сечениями. При этом для реакции ($\gamma, 2n$) обсуждаемые расхождения резко уменьшаются до значений, почти в 10 раз меньших по сравнению с расхождениями для реакции ($\gamma, 1n$). Это означает, что причинами наблюдаемых существенных (20–27%) расхождений в случаях реакции выхода нейтронов (γ, xn) для ядер ⁷⁵As, ¹²⁷I, ¹⁸¹Ta и ²⁰⁸Pb являются экстремально большие (33–46%) занижения сечений реакции ($\gamma, 1n$).

В случае ядра ¹⁸¹Ta в эксперименте Ливермора [31] в реакции ($\gamma, 1n$) вообще не были зарегистрированы нейтроны в области энергий фотонов, превышающих ~17.5 МэВ, хотя в реакциях (γ, xn), (γ, sn) и ($\gamma, 2n$) нейтроны регистрировались до энергий фотонов ~24.6 МэВ. В Сакле [32] нейтроны из реакции ($\gamma, 1n$) наблюдались вплоть до энергий фотонов ~24.0 МэВ, а в сечениях, рассчитанных в КМФЯР [10] – ~40.0 МэВ. Таким образом, отмеченные характерные соотношения сечений реакций на ядре ¹⁸¹Ta очевидно могут быть объяснены только тем, что значительная часть нейтронов из реакции ($\gamma, 1n$) была потеряна (возможно по каким-то техническим причинам).

Характерные соотношения сечений реакций и для ядер ⁷⁵As, ¹²⁷I, ¹⁸¹Ta и ²⁰⁸Pb свидетельствует о том, что в соответствующих экспериментах Ливермора также были утеряны значительные количества нейтронов из реакции ($\gamma, 1n$). Этот вывод подтверждается тем, что для этих ядер значительные расхождения данных Ливермора с данными Сакле и с оцененными данными наблюдаются в

областях энергий фотонов до порогов *B2n*. При таких энергиях возможна только реакция ($\gamma, 1n$), проблемы разделения фотонейтронов по множественности отсутствуют, и сечения реакций (γ, xn), (γ, sn) и ($\gamma, 1n$) должны быть идентичными. Такой же вывод должен быть сделан и для исследованных в настоящей работе ядер ^{206, 207}Pb, в случаях которых в областях энергий до *B2n* экспериментальные сечения реакции (γ, xn) оказываются существенно заниженными по сравнению с сечениями, рассчитанными в КМФЯР.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Новые сечения парциальных реакций ($\gamma, 1n$) и ($\gamma, 2n$), в ограниченной области энергий фотонов сечения реакции ($\gamma, 3n$), а также полных фотонейтронных реакций (γ, xn) и (γ, sn) на ядрах ^{206, 207}Pb оценены с помощью экспериментально-теоретического метода, основанного на использовании объективных физических критериев достоверности данных. Поскольку для ядер ^{206, 207}Pb сечения реакций были получены лишь в одном эксперименте (Ливермор (США)), оценка проводилась с учетом результатов выполненной ранее оценки для исследованного в том же эксперименте ядра ²⁰⁸Pb, для которого имеются и результаты нескольких других экспериментов. Установлено, что экспериментальные данные для ядер ^{206, 207}Pb, как и для ядра ²⁰⁸Pb (а также ядер ⁷⁵As, ¹²⁷I и ¹⁸¹Ta), полученные в Ливерморе, не являются достоверными, поскольку содержат существенные систематические погрешности, обусловленные потерей значительных количеств нейтронов из реакций ($\gamma, 1n$), и не могут быть рекомендованы для использования в исследованиях и приложениях.

Работа выполнена в Отделе электромагнитных процессов и взаимодействий атомных ядер (Центре данных фотоядерных экспериментов) НИИЯФ МГУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горячев Б.И., Ишханов Б.С., Капитонов И.М., Шевченко В.Г. // Письма в ЖЭТФ. 1968. Т. 7. С. 161; Goryachev B.I., Ishkhanov B.S., Kapitonov I.M., Shevchenko V.G. // JETP Lett. 1968. V. 7. P. 210.
2. Ишханов Б.С., Капитонов И.М., Лазутин Е.В. и др. // ЯФ. 1970. Т. 12. С. 682; Ishkhanov B.S., Kapitonov I.M., Lazutin E.V. et al. // Sov. J. Nucl. Phys. 1971. V. 12. P. 370.
3. Беляев С.Н., Васильев О.В., Воронов В.В. и др. // ЯФ. 1992. Т. 55. С. 289; Belyaev S.N., Vasil'ev O.V., Voronov V.V. et al. // Sov. J. Nucl. Phys. 1992. V. 55. P. 57.
4. Harvey R.R., Caldwell J.T., Bramblett R.L., Fultz S.C. // Phys. Rev. 1964. V. 136. Art. No. B126.
5. Veysiere A., Beil H., Bergere R. et al. // Nucl. Phys. 1970. V. A159. 561.
6. Young L.M. // Ph.D. Thesis. University of Illinois, 1972.
7. Kondo T., Utsunomiya H., Goriely S. et al. // Phys. Rev. 2012. V. C 86. Art. No. 014316.
8. Варламов В.В., Песков Н.Н., Руденко Д.С., Степанов М.Е. // ВАНТ. Сер. Ядерн. конст. 2003. № 1–2. С. 48.
9. Varlatov V.V., Efimkin N.G., Ishkhanov B.S., Sapunenko V.V. // INDC(СРР)–393. Distr. L. IAEA NDS. Vienna, 1994. Art. No. 11796.
10. Ишханов Б.С., Орлин В.Н. // ЯФ. 2008. Т. 71. С. 517; Ishkhanov B.S., Orlin V.N. // Phys. Atom. Nucl. 2008. V. 71. P. 493.
11. Варламов В.В., Ишханов Б.С., Орлин В.Н. и др. // ЯФ. 2013. Т. 76. С. 1484; Varlatov V.V., Ishkhanov B.S., Orlin V.N. et al. // Phys. Atom. Nucl. 2013. V. 7. P. 1403.
12. Варламов В.В., Ишханов Б.С., Орлин В.Н., Четверткова В.А. // Изв. РАН. Сер. физ. 2010. Т. 74. С. 875; Varlatov V.V., Ishkhanov B.S., Orlin V.N., Chetvertkova V.A. // Bull. Rus. Acad. Sci. Phys. 2010. V. 74. P. 833.
13. Варламов В.В., Ишханов Б.С., Орлин В.Н., Трошчиев С.Ю. // Изв. РАН. Сер. физ. 2010. Т. 74. С. 884; Varlatov V.V., Ishkhanov B.S., Orlin V.N., Troshchiev S.Yu. // Bull. Rus. Acad. Sci. Phys. 2010. V. 74. P. 842.
14. Варламов В.В., Ишханов Б.С., Орлин В.Н. // ЯФ. 2012. Т. 75. С. 1414; Varlatov V.V., Ishkhanov B.S., Orlin V.N. // Phys. Atom. Nucl. 2012. V. 75. P. 1339.
15. Varlatov V.V., Ishkhanov B.S., Orlin V.N., Stopani K.A. // Eur. Phys. J. A. 2014. V. 50. P. 114.
16. Varlatov V.V., Davydov A.I., Orlin V.N. // Amer. J. Phys. Appl. 2020. V. 8. P. 64.
17. Варламов В.В., Орлин В.Н., Песков Н.Н., Степанов М.Е. // Изв. РАН. Сер. физ. 2013. Т. 77. С. 433; Varlatov V.V., Orlin V.N., Peskov N.N., Stepanov M.E. // Bull. Rus. Acad. Sci. Phys. 2013. V. 77. P. 388.
18. Варламов В.В., Макаров М.А., Песков Н.Н., Степанов М.Е. // ЯФ. 2015. Т. 78. С. 678; Varlatov V.V., Makarov M.A., Peskov N.N., Stepanov M.E. // Phys. Atom. Nucl. 2015. V. 78. P. 634.
19. Варламов В.В., Макаров М.А., Песков Н.Н., Степанов М.Е. // ЯФ. 2015. Т. 78. С. 797; Varlatov V.V., Makarov M.A., Peskov N.N., Stepanov M.E. // Phys. Atom. Nucl. 2015. V. 78. P. 746.
20. Варламов В.В., Давыдов А.И., Макаров М.А. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2016. Т. 80. № 3. С. 351; Varlatov V.V., Davydov A.I., Makarov M.A. et al. // Bull. Rus. Acad. Sci. Phys. 2016. V. 80. No. 3. P. 317.
21. Варламов В.В., Ишханов Б.С., Орлин В.Н., Песков Н.Н. // ЯФ. 2016. Т. 79. С. 315; Varlatov V.V., Ishkhanov B.S., Orlin V.N., Peskov N.N. // Phys. Atom. Nucl. 2016. V. 79. P. 501.
22. Varlatov V.V., Ishkhanov B.S., Orlin V.N. // Phys. Rev. C. 2017. V. 96. Art. No. 044606.
23. Varlatov V.V., Davydov A.I., Ishkhanov B.S. // Eur. Phys. J. A. 2017. V. 53. P. 180.
24. Варламов В.В., Ишханов Б.С., Орлин В.Н. // ЯФ. 2017. Т. 80. С. 632; Varlatov V.V., Ishkhanov B.S., Orlin V.N. // Phys. Atom. Nucl. 2017. V. 80. P. 1106.
25. Варламов В.В., Орлин В.Н., Песков Н.Н. // Изв. РАН. Сер. физ. 2017. Т. 81. № 6. С. 744; Varlatov V.V., Orlin V.N., Peskov N.N. // Bull. Rus. Acad. Sci. Phys. 2017. V. 81. No. 6. P. 670.
26. Varlatov V.V., Davydov A.I., Ishkhanov B.S., Orlin V.N. // Eur. Phys. J. A. 2018. V. 54. P. 74.
27. Варламов В.В., Давыдов А.И., Ишханов Б.С. // ЯФ. 2019. Т. 82. С. 16; Varlatov V.V., Davydov A.I., Ishkhanov B.S. // Phys. Atom. Nucl. 2019. V. 82. P. 13.
28. Бельшиев С.С., Варламов В.В., Гунин С.А. и др. // ЯФ. 2020. Т. 83. С. 2; Belyshev S.S., Varlatov V.V., Gunin S.A. et al. // Phys. Atom. Nucl. 2020. V. 83. P. 2.
29. Berman B.L., Pywell R.E., Dietrich S.S. et al. // Phys. Rev. C. 1987. V. 36. P. 1286.
30. Варламов В.В., Давыдов А.И. // ЯФ. 2021. Т. 84. С. 370; Varlatov V.V., Davydov A.I. // Phys. Atom. Nucl. 2021. V. 84. P. 603.
31. Bramblett R.L., Caldwell J.T., Auchampaugh G.F., Fultz S.C. // Phys. Rev. 1963. V. 129. P. 2723.
32. Bergere R., Beil H., Veysiere A. // Nucl. Phys. A. 1968. V. 121. P. 463.

Photodisintegration of $^{206, 207, 208}\text{Pb}$: experimental and evaluated photoneutron reaction cross sections

V. V. Varlamov^{a, *}, A. I. Davydov^b, V. N. Orlin^a

^a Lomonosov Moscow State University, Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Moscow, 119991 Russia

^b Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics, Moscow, 119991 Russia

*e-mail: Varlamov@depni.sinp.msu.ru

New cross sections of partial photoneutron reactions ($\gamma, 1n$), ($\gamma, 2n$) and ($\gamma, 3n$) cross sections for $^{206, 207}\text{Pb}$ were evaluated using experimental–theoretical method basing on using the objective physical data reliability criteria and the results of evaluation carried out before for ^{208}Pb . For $^{206, 207, 208}\text{Pb}$ it was found the very specific systematic of competitions between various reactions cross sections testifying that noticeable parts of neutrons from ($\gamma, 1n$) reaction was loss. That means that experimental data are not reliable.