

ФОТОРАСЩЕПЛЕНИЕ ИЗОТОПОВ $^{186,188,189,190,192}\text{Os}$: СХОДСТВО И РАЗЛИЧИЯ

© 2015 г. В. В. Варламов^{1)*}, М. А. Макаров²⁾, Н. Н. Песков¹⁾, М. Е. Степанов^{1),2)}

Поступила в редакцию 19.01.2015 г.

В дополнение к полученным ранее результатам для изотопов $^{188,189}\text{Os}$ с использованием специально введенных объективных критериев достоверности данных о сечениях парциальных фотонейтронных реакций проанализированы экспериментальные данные по фоторасщеплению изотопов $^{186,190,192}\text{Os}$. Установлено, что сечения реакций $(\gamma, 1n)$, $(\gamma, 2n)$ и $(\gamma, 3n)$ для каждого изотопа по-разному удовлетворяют или, напротив, не удовлетворяют критериям достоверности. Во многих случаях переходные функции множественности — отношения $F_i = \sigma(\gamma, in)/\sigma(\gamma, xn)$ сечений соответствующих парциальных реакций (γ, in) к сечению реакции выхода нейтронов $\sigma(\gamma, xn) = \sigma(\gamma, 1n) + 2\sigma(\gamma, 2n) + 3\sigma(\gamma, 3n) + \dots$ имеют физически недостоверные по определению значения. Показано, что причиной этого является неоднозначность зависимости значительных систематических погрешностей в экспериментально определенных множественностях нейтронов от их измеряемых кинетических энергий. Проанализирована зависимость этих погрешностей от энергетических спектров нейтронов. Для изотопов $^{186,190,192}\text{Os}$ получены новые оцененные данные по сечениям парциальных и полных фотонейтронных реакций, удовлетворяющие критериям достоверности.

DOI: 10.7868/S0044002715090160

1. ВВЕДЕНИЕ

В работе [1] были проанализированы экспериментальные данные [2] по фоторасщеплению изотопов $^{188,189}\text{Os}$. Было показано, что, как и для многих других ядер (^{90}Zr , ^{115}In , $^{112,114,116,117,118,119,120,122,124}\text{Sn}$, ^{159}Tb , ^{181}Ta , ^{197}Au), исследованных ранее [3–7] на пучках квазиодноэнергетических аннигиляционных фотонов с помощью метода разделения фотонейтронов по множественности, экспериментальные сечения парциальных реакций $(\gamma, 1n)$, $(\gamma, 2n)$ и $(\gamma, 3n)$ на изотопах $^{188,189}\text{Os}$ содержат значительные систематические погрешности. Установлено, что они обусловлены неоднозначностью определения множественности нейтронов из разных реакций.

Прежде всего эти систематические погрешности проявляются в том, что в различных областях энергий налетающих фотонов введенные критерии достоверности данных о сечениях парциальных фотонейтронных реакций — переходные функции множественности, отношения

$$F_i = \sigma(\gamma, in)/\sigma(\gamma, xn) = \quad (1)$$

$$= \sigma(\gamma, in)/[\sigma(\gamma, 1n) + 2\sigma(\gamma, 2n) + 3\sigma(\gamma, 3n) + \dots]$$

имеют величины, превышающие физически допустимые по определению значения 1.00, 0.50, 0.33, ... соответственно для $i = 1, 2, 3, \dots$

Такие превышения означают, что экспериментальное разделение нейтронов по множественности было выполнено некорректно. При этом превышение, например, функцией F_2 предельного значения 0.50 коррелирует с появлением при тех же энергиях физически запрещенных отрицательных значений в сечении реакции $(\gamma, 1n)$ и, соответственно, в энергетической зависимости функции F_1 . Это обусловлено необоснованным перемещением заметной части нейтронов из канала “1n” в канал “2n”, в результате чего сечение реакции $(\gamma, 1n)$ недостоверно уменьшается вплоть до физически запрещенных отрицательных значений, а сечение реакции $(\gamma, 2n)$, соответственно, недостоверно возрастает таким образом, что значения функции F_2 начинают превышать предел 0.50. При энергиях выше порога B_{3n} реакции $(\gamma, 3n)$ имеют место недостоверные перемещения части нейтронов между каналами “3n” и “2n”, а также “3n” и “1n”.

С целью получения данных о сечениях парциальных фотонейтронных реакций, свободных от такого рода систематических погрешностей и удовлетворяющих критериям достоверности данных, предложен экспериментально-теоретический подход к оценке сечений, свободный от недостатков

¹⁾ Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Россия.

²⁾ Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, физический факультет, Россия.

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

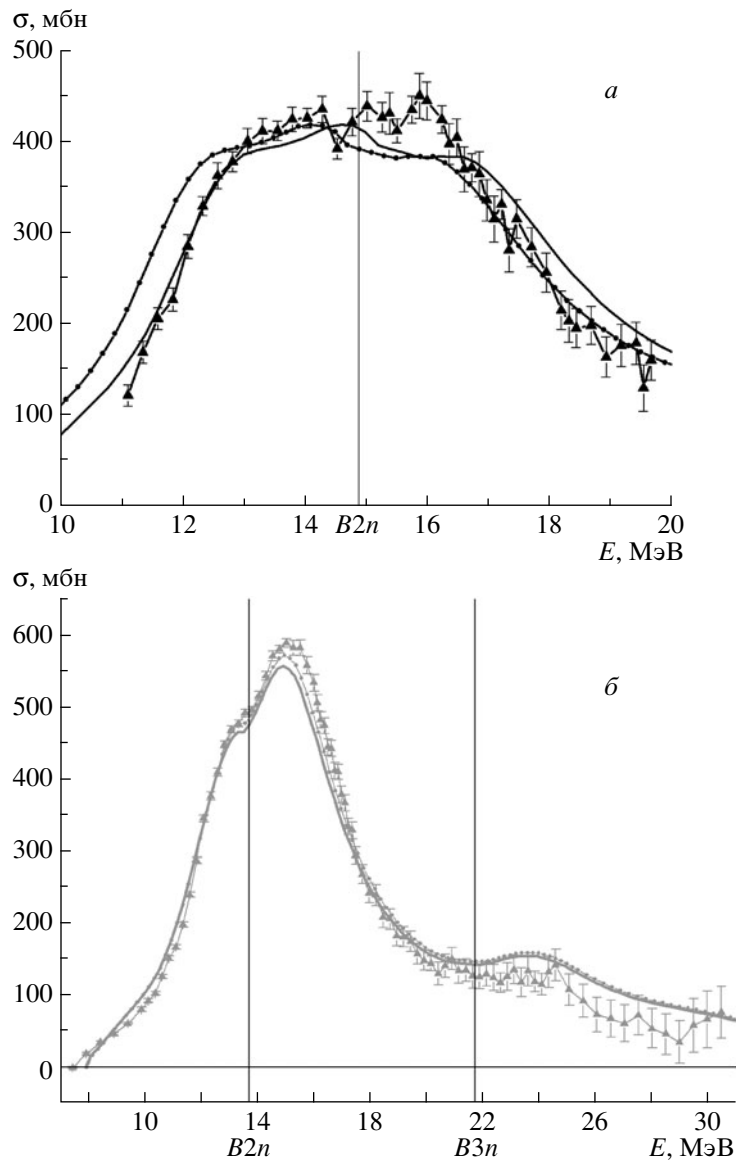


Рис. 1. Сравнение теоретических [8, 9] исходных (сплошная кривая) и скорректированных (точки \bullet) сечений с экспериментальным [2] сечением (треугольники) реакции выхода нейтронов (γ, xn) : *a* — ^{186}Os , *б* — ^{190}Os .

экспериментальных методов разделения нейтронов по множественности [3, 4]. Он основан на использовании для оценки сечений парциальных реакций лишь исходного экспериментального сечения реакции выхода нейтронов:

$$\sigma(\gamma, xn) \approx \sigma(\gamma, 1n) + 2\sigma(\gamma, 2n) + \quad (2)$$

$$+ 3\sigma(\gamma, 3n) + \dots,$$

не зависящего от проблем разделения нейтронов по множественности. Вклады в это полное сечение сечений парциальных реакций $(\gamma, 1n)$, $(\gamma, 2n)$ и $(\gamma, 3n)$ определяются (оцениваются) с помощью результатов расчетов, выполненных в рамках комбинированной модели фотоядерных реакций [8, 9]. Оцененные сечения, соотношения между которыми

соответствуют положениям модели (а следовательно, и критериям достоверности данных), получают следующим образом:

$$\sigma^{\text{оцен}}(\gamma, in) = F_i^{\text{теор}} \sigma^{\text{эксп}}(\gamma, xn), \quad (3)$$

в сумме (2) давая исходное экспериментальное сечение выхода. В работе [1] такой подход был использован для оценки сечений парциальных реакций $(\gamma, 1n)$, $(\gamma, 2n)$, $(\gamma, 3n)$, а также полной фотонейтронной реакции

$$(\gamma, sn) \approx (\gamma, 1n) + (\gamma, 2n) + (\gamma, 3n) + \dots, \quad (4)$$

сечение которой в случае средних и тяжелых ядер (для которых сечения протонных реакций имеют малые величины) представляет собой хорошее

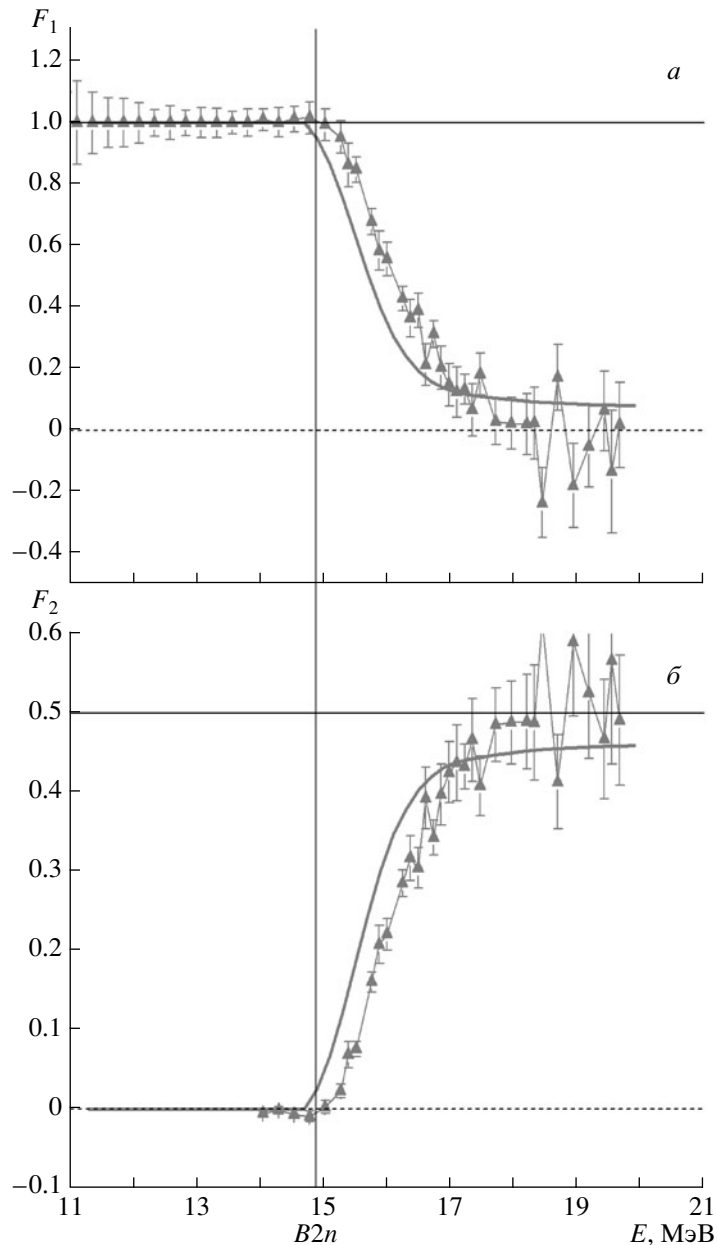


Рис. 2. Сравнение (*a* — для $i = 1$, *б* — для $i = 2$) переходных функций множественности $F_i^{\text{эксп}}$, полученных по экспериментальным данным [2] (треугольники), с функциями $F_i^{\text{теор}}$, полученными по результатам теоретических расчетов [8, 9] (линии), для изотопа ^{186}Os .

приближение к сечению полного фотопоглощения для изотопов $^{188,189}\text{Os}$.

Настоящая работа посвящена использованию описанного подхода для анализа достоверности экспериментальных данных по сечениям фотонейтронных реакций на изотопах $^{186,190,192}\text{Os}$, получению новых данных для этих ядер в рамках экспериментально-теоретического подхода и обсуждению сходства и различий процессов фоторасщепления всех пяти указанных выше изотопов осмия.

2. СОГЛАСОВАНИЕ СЕЧЕНИЙ РЕАКЦИЙ ВЫХОДА НЕЙТРОНОВ $\sigma(\gamma, xn)$ С РЕЗУЛЬТАТАМИ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ

В исследованиях, выполненных ранее [3–7, 10, 11], было проанализировано большое количество данных о сечениях полных и парциальных фотонейтронных реакций, большинство из которых было получено на пучках квазимоноэнергетических аннигиляционных фотонов с помощью метода разделения нейтронов по множественности в Ливер-

Таблица 1. Центры тяжести $E^{цт}$ и интегральные сечения $\sigma^{инт}$ сечений реакции выхода нейтронов $^{186,190,192}\text{Os}(\gamma, xn)$

	$E^{цт}$, МэВ	$\sigma^{инт}$, МэВ мбн	$E^{цт}$, МэВ	$\sigma^{инт}$, МэВ мбн	$E^{цт}$, МэВ	$\sigma^{инт}$, МэВ мбн
^{186}Os						
Область энергии	$E^{инт} = B2n = 14.9$ МэВ*		$E^{инт} = 20.0$ МэВ*			
Эксперимент [2]	13.21	1302.0 ± 14.1	15.13	2833.8 ± 27.8		
Теория — исх. [8, 9]	13.07	1398.6 ± 37.6	14.99	2812.6 ± 51.0		
Теория — корр.	13.18	1292.5 ± 35.2	15.22	2820.1 ± 51.1		
^{190}Os						
Область энергии	$E^{инт} = B2n = 13.7$ МэВ		$E^{инт} = B3n = 21.7$ МэВ		$E^{инт} = 31.0$ МэВ	
Эксперимент [2]	12.06	1178.1 ± 4.5	15.17	3840.3 ± 17.4	16.90	4623.7 ± 55.1
Теория — исх. [8, 9]	11.95	1172.9 ± 27.5	15.16	3771.0 ± 52.8	17.35	4780.0 ± 55.5
Теория — корр.	12.01	1203.6 ± 28.7	15.17	3840.3 ± 55.2	17.41	4905.0 ± 58.1
^{192}Os						
Область энергии	$E^{инт} = B2n = 13.3$ МэВ		$E^{инт} = B3n = 21.1$ МэВ		$E^{инт} = 31.0$ МэВ	
Эксперимент [2]	11.72	959.6 ± 4.1	15.06	3924.2 ± 17.1	16.94	4892.0 ± 63.4
Теория — исх. [8, 9]	11.82	1021.3 ± 24.6	15.13	3943.2 ± 57.3	17.32	5062.8 ± 60.3
Теория — корр.	11.82	1021.3 ± 24.6	15.13	3943.2 ± 57.3	17.32	5062.8 ± 60.3

* Интегрирование по общей области энергий $E > 11.1$ МэВ.

море (США) и Сакле (Франция). Было установлено, что систематические расхождения между сечениями парциальных реакций $(\gamma, 1n)$, $(\gamma, 2n)$, $(\gamma, 3n)$ из разных экспериментов достигают $\sim 60\%$, тогда как между сечениями реакции выхода нейтронов (γ, xn) — лишь $\sim 12\%$.

В связи с этим предложенный в [3, 4] экспериментально-теоретический подход к оценке сечений парциальных фотонейтронных реакций основывается на использовании экспериментальных данных именно о сечении реакции (γ, xn) , которое, во-первых, не зависит от проблем разделения нейтронов по множественности, а во-вторых, достаточно хорошо описывается в рамках комбинированной модели фотоядерных реакций [8, 9]. Небольшая корректировка теоретических сечений еще больше улучшает ситуацию. Для изотопов $^{188,189}\text{Os}$ такая корректировка включала [1] соответственно умножение на коэффициенты 1.14 и 1.05 и смещение к большим энергиям на величины соответственно 0.30 и 0.45 МэВ. В настоящей работе в случае изотопа ^{186}Os было применено лишь смещение теоретического сечения к большим энергиям на величину 0.50 МэВ, а в случае изотопа ^{190}Os — лишь умножение теоретического сечения на коэффициент 1.02. В случае изотопа ^{192}Os согласие экспериментального и теоретического сечений было настолько хорошим, что корректировка не потребовалась. Сечения реакции (γ, xn) на изотопах $^{186,190}\text{Os}$, использованные в процедуре оценки в рамках экспериментально-теоретического метода, представлены на рис. 1, а их интегральные сечения приведены в табл. 1. Хорошо видно, каким образом

дополнительная корректировка улучшает согласие экспериментальных и теоретических сечений реакции выхода нейтронов.

На основании скорректированных (в случае изотопов $^{186,190}\text{Os}$) или исходных (в случае изотопа ^{192}Os) расчетных данных были определены переходные функции множественности $F_i^{\text{теор}}(1)$, которые затем были использованы в процедуре получения оцененных сечений парциальных реакций (3).

3. ПЕРЕХОДНЫЕ ФУНКЦИИ МНОЖЕСТВЕННОСТИ НЕЙТРОНОВ F_i КАК ОБЪЕКТИВНЫЕ КРИТЕРИИ ДОСТОВЕРНОСТИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

На рис. 2–6 проводится сравнение энергетических зависимостей переходных функций множественности нейтронов $F_i^{\text{теор}}$, рассчитанных в рамках комбинированной модели [8, 9], с энергетическими зависимостями функций $F_i^{\text{эксп}}$, полученными по данным работы [1] для всех трех обсуждаемых в настоящей работе изотопов осмия $^{186,190,192}\text{Os}$, а также исследованных ранее изотопов $^{188,189}\text{Os}$.

Приведенные данные наглядно представляют определенные особенности функций $F_i^{\text{эксп}}$, свидетельствующие о наличии существенных систематических погрешностей в сечениях парциальных реакций, ставящих достоверность экспериментальных данных под сомнение.

Так, например:

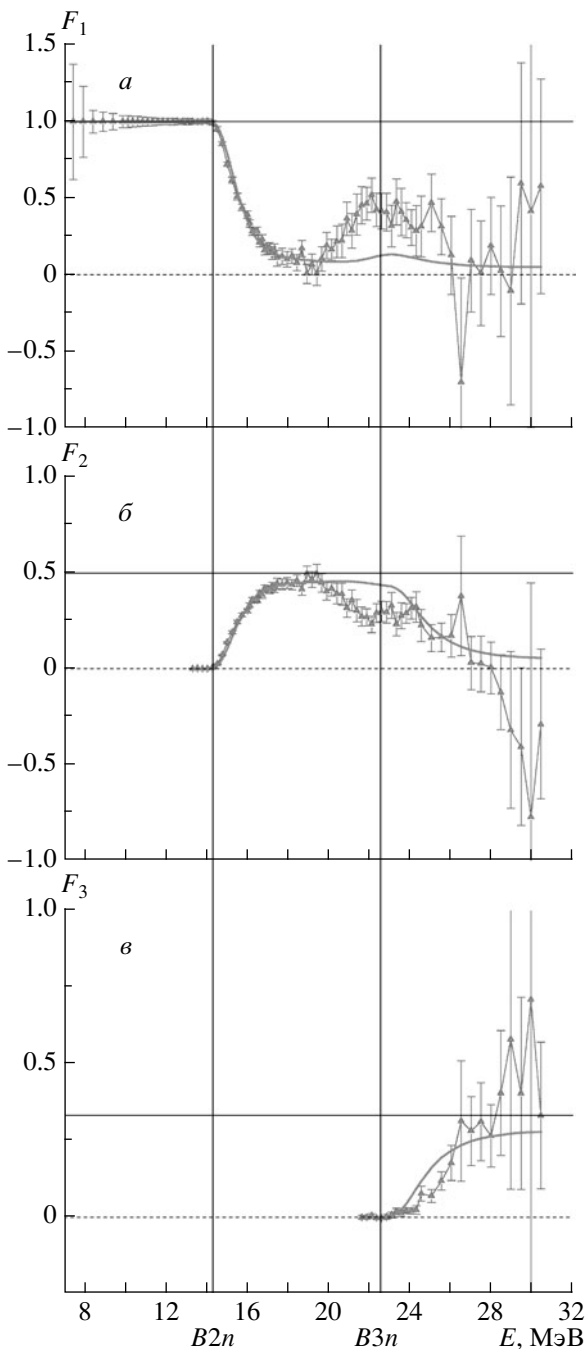


Рис. 3. Сравнение (*a* — для $i = 1$, *б* — для $i = 2$, *в* — для $i = 3$) переходных функций множественности $F_i^{\text{эксп}}$, полученных по экспериментальным данным [2] (треугольники), с функциями $F_i^{\text{теор}}$, полученными по результатам теоретических расчетов [8, 9] (линии), для изотопа ^{188}Os .

для изотопа ^{186}Os в области энергий, больших ~ 17.5 МэВ, отчетливо наблюдаются отрицательные значения функции $F_1^{\text{эксп}}$ (рис. 2*a*), которые коррелируют со значениями функции $F_2^{\text{эксп}}$ (рис. 2*б*), превосходящими физически допустимый по определению (1) предел 0.50;

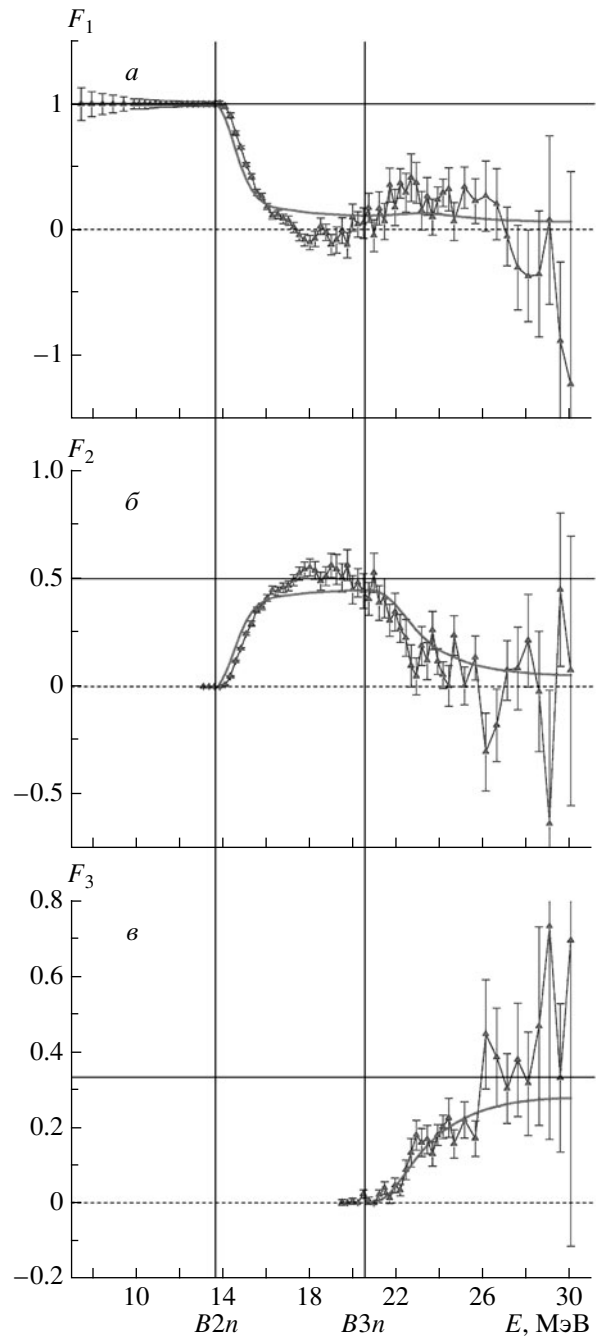


Рис. 4. То же, что и на рис. 3, для изотопа ^{189}Os .

аналогичные корреляции значений $F_1^{\text{эксп}} < 0$ и $F_2^{\text{эксп}} > 0.50$ в области энергий $\sim 18\text{--}22$ МэВ наблюдаются для изотопов $^{189,190,192}\text{Os}$ (рис. 4—6);

в случае изотопа ^{188}Os (рис. 3) недостоверные значения $F_1^{\text{эксп}} < 0$ и $F_2^{\text{эксп}} > 0.50$ практически отсутствуют, однако расхождения “в противофазе” функций $F_1^{\text{эксп}}$ и $F_2^{\text{эксп}}$ относительно значений теоретических функций соответственно $F_1^{\text{теор}}$ и $F_2^{\text{теор}}$ наблюдаются весьма отчетливо;

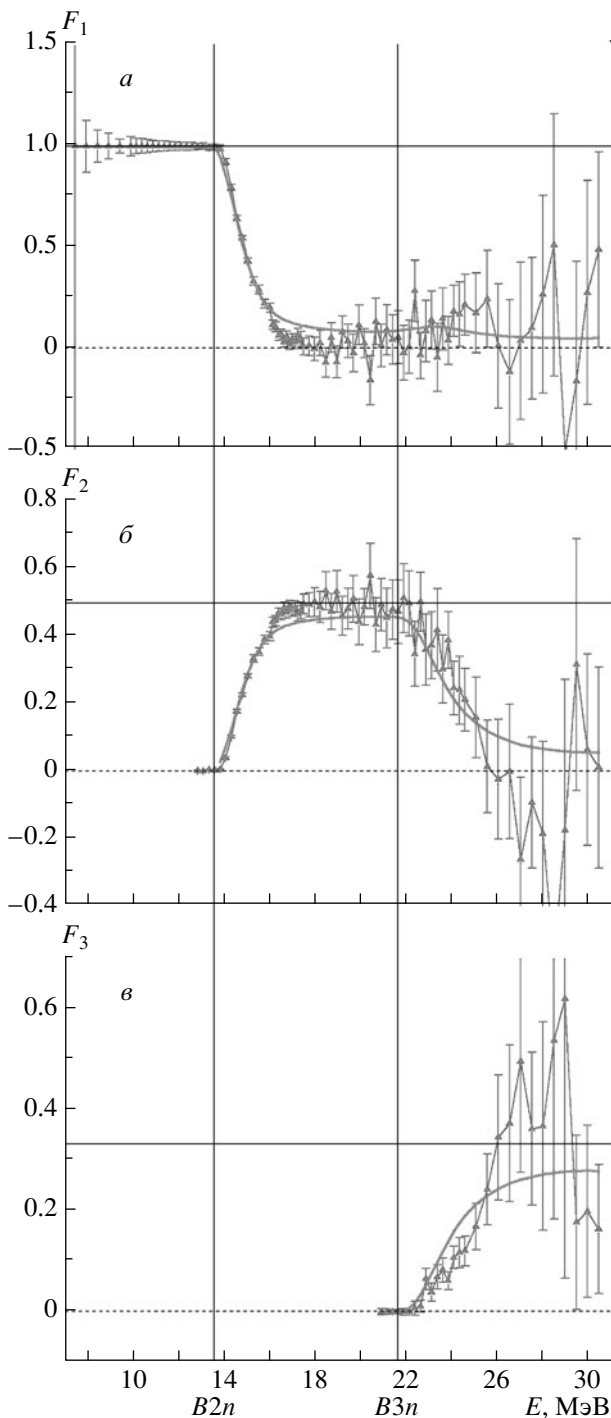


Рис. 5. То же, что и на рис. 3, для изотопа ^{190}Os .

для изотопов $^{188,189,190,192}\text{Os}$ в области энергий $\sim 26\text{--}30$ МэВ функция F_3 имеет значения $\sim 0.6\text{--}0.8$, намного превышающие физически допустимый по определению (1) предел 0.33.

Приведенные на рис. 2–6 данные для функций F_i свидетельствуют о том, что необоснованные перемещения заметных количеств нейтронов между каналами “1n”, “2n” и “3n” для отдель-

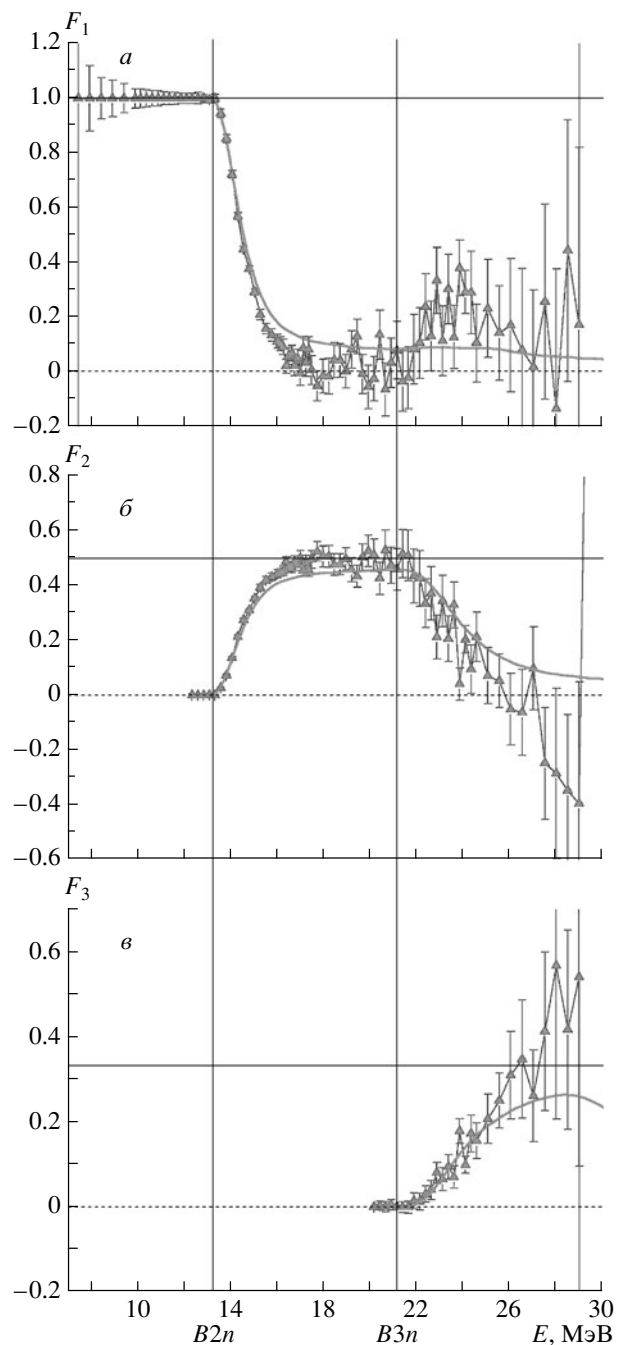


Рис. 6. То же, что и на рис. 3, для изотопа ^{192}Os .

ных изотопов осмия в экспериментальных данных проявляются по-разному. Весьма характерно это проявляется в областях энергий выше $B3n$, в которых между собой конкурируют все три возможные парциальные реакции.

В случае изотопов $^{188,190,192}\text{Os}$ функция $F_1^{\text{эксп}}$ (рис. 3, 5, 6) в целом находится вблизи значений $F_1^{\text{теор}}$ и в пределах погрешностей не попадает в область отрицательных значений (за исключением одного значения при энергии ~ 26.5 МэВ в случае

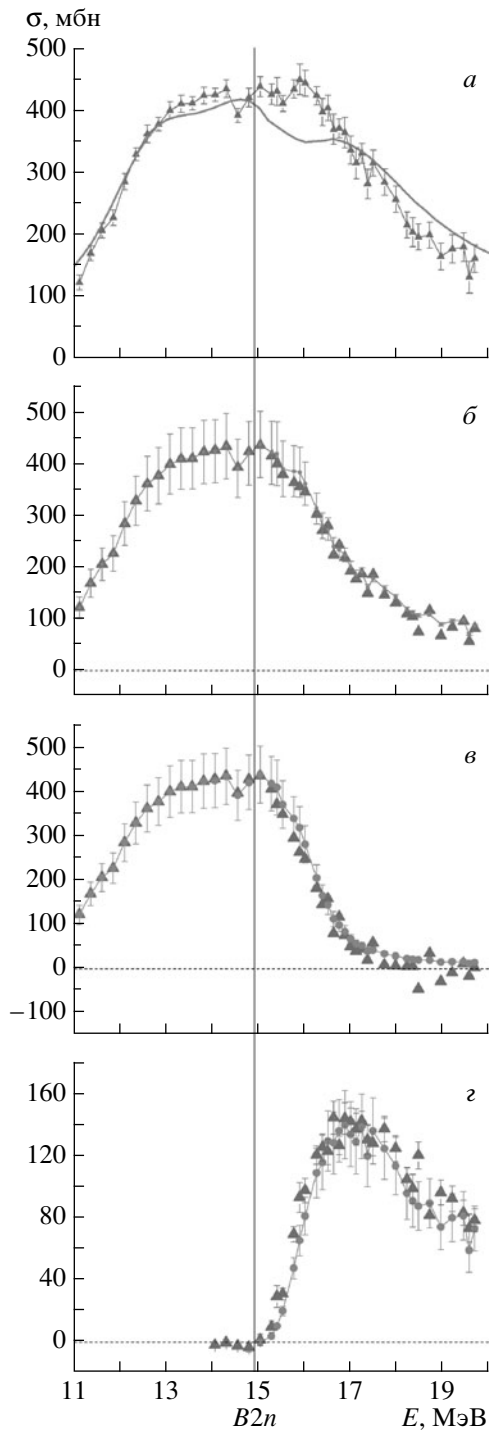


Рис. 7. Данные по фоторасщеплению изотопа ^{186}Os , полученные в рамках экспериментально-теоретического подхода к оценке сечений парциальных фотонейтронных реакций: *a* – (γ, xn) , *б* – (γ, sn) , *в* – $(\gamma, 1n)$, *г* – $(\gamma, 2n)$. Здесь и на рис. 8, 9 треугольники – экспериментальные сечения.

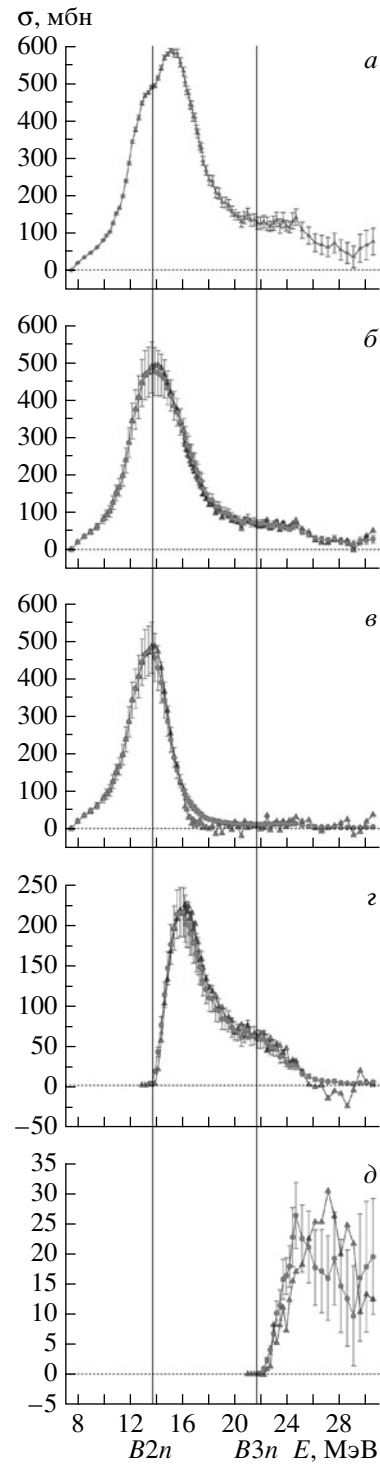


Рис. 8. Данные по фоторасщеплению изотопа ^{190}Os , полученные в рамках экспериментально-теоретического подхода к оценке сечений парциальных фотонейтронных реакций: *a* – (γ, xn) , *б* – (γ, sn) , *в* – $(\gamma, 1n)$, *г* – $(\gamma, 2n)$, *д* – $(\gamma, 3n)$.

изотопа ^{188}Os). В то же время для этих изотопов значения функции $F_2^{\text{эксп}}$ находятся в области отрицательных значений (исключение – значение

при энергии ~ 27 МэВ в случае ^{192}Os). При таком соотношении значения функции $F_3^{\text{эксп}} > 0.33$ свидетельствуют о недостоверном изъятии части

нейтронов из канала “2n” и перемещении их в канал “3n”.

В то же время в случае изотопа ^{189}Os (рис. 4) функции $F_1^{\text{эксп}}$ в области энергий, больших ~ 24 МэВ, имеют отрицательные значения, а значения функции $F_2^{\text{эксп}}$ в пределах погрешностей отрицательных значений не имеют (исключение — значение при энергии ~ 26 МэВ). При таком соотношении значения функции $F_3^{\text{эксп}} > 0.33$ свидетельствуют о недостоверном распределении нейтронов между каналами “1n” и “3n”.

Отмеченные выше корреляции значений $F_1^{\text{эксп}} < 0$ и $F_2^{\text{эксп}} > 0.50$ в области энергий ~ 18 – 22 МэВ, наблюдающиеся для изотопов $^{186,190,192}\text{Os}$ и практически отсутствующие для изотопа ^{189}Os , свидетельствуют о различном и недостоверном распределении нейтронов между каналами “1n” и “2n”.

4. ОЦЕНЕННЫЕ В РАМКАХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО- ТЕОРЕТИЧЕСКОГО ПОДХОДА СЕЧЕНИЯ ПАРЦИАЛЬНЫХ ФОТОНЕЙТРОННЫХ РЕАКЦИЙ

Сечения реакций $(\gamma, 1n)$, $(\gamma, 2n)$, $(\gamma, 3n)$ и (γ, sn) на ядрах $^{186,190,192}\text{Os}$, оцененные в рамках экспериментально-теоретического подхода (3), представлены на рис. 7–9 вместе с соответствующими экспериментальными сечениями реакции (γ, xn) .

Интегральные характеристики рассмотренных сечений, рассчитанные во всем диапазоне исследованных энергий, приводятся в табл. 2 вместе с характеристиками исследованных ранее [1] изотопов $^{188,189}\text{Os}$. В табл. 3 для изотопов $^{190,192}\text{Os}$ (а также и для исследованных ранее [1] изотопов $^{188,189}\text{Os}$) приведены значения интегральных сечений, рассчитанные для энергий выше B_{3n} .

4.1. Фоторасщепление изотопа ^{186}Os

Как отмечалось выше, в области энергий, больших ~ 17.5 МэВ, отрицательные значения функции $F_1^{\text{эксп}}$ коррелируют со значениями функции $F_2^{\text{эксп}} > 0.50$. Это означает недостоверное перемещение части нейтронов из канала “1n” в канал “2n”: уменьшение сечения реакции $(\gamma, 1n)$ вплоть до появления в нем физически запрещенных отрицательных значений и соответствующий рост сечения реакции $(\gamma, 2n)$ вплоть до значений, которым соответствуют физически недостоверные значения $F_2^{\text{эксп}}$. Это перемещение полностью подтверждается сравнением экспериментальных и оцененных сечений реакций, приведенных на рис. 7. В табл. 4

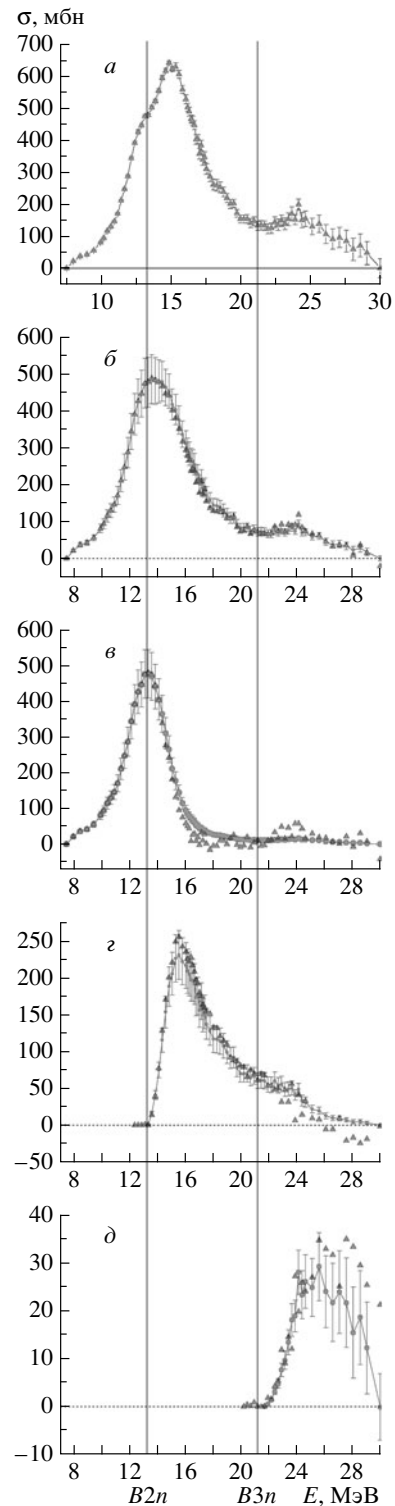


Рис. 9. То же, что и на рис. 8, для изотопа ^{192}Os .

представлены соответствующие интегральные сечения, рассчитанные до максимальной исследованной энергии 20 МэВ и для области наибольших расхождений 17.5–20 МэВ.

Таблица 2. Интегральные сечения $\sigma^{\text{инт}}$ оцененных сечений полных и парциальных фотонейтронных реакций на изотопах Os в сравнении с экспериментальными данными [2]

Реакция	$\sigma^{\text{инт}}$, МэВ мбн	
	Оцененные данные	Экспериментальные данные
^{186}Os ($E^{\text{инт}} = 20.0$ МэВ)		
(γ, xn)	$2810.8 \pm 22.9^*$	2810.8 ± 22.9
(γ, sn)	2389.3 ± 57.5	2345.0 ± 24.2
($\gamma, 1n$)	1967.9 ± 57.5	1879.2 ± 23.1
($\gamma, 2n$)	472.8 ± 10.3	465.8 ± 7.2
^{188}Os ($E^{\text{инт}} = 31.0$ МэВ)[1]		
(γ, xn)	$4755.0 \pm 58.9^*$	4755.0 ± 58.9
(γ, sn)	3521.4 ± 74.5	3634.1 ± 58.5
($\gamma, 1n$)	2402.5 ± 62.8	2633.6 ± 53.5
($\gamma, 2n$)	1004.1 ± 36.6	880.1 ± 22.7
($\gamma, 3n$)	114.7 ± 16.8	120.4 ± 6.7
^{189}Os ($E^{\text{инт}} = 31.0$ МэВ)[1]		
(γ, xn)	$4715.0 \pm 47.5^*$	4715.0 ± 47.5
(γ, sn)	3341.6 ± 46.6	3310.3 ± 54.1
($\gamma, 1n$)	2133.0 ± 39.9	2109.7 ± 46.6
($\gamma, 2n$)	1043.4 ± 20.9	996.1 ± 25.9
($\gamma, 3n$)	165.2 ± 11.8	205.6 ± 9.3
^{190}Os ($E^{\text{инт}} = 31.0$ МэВ)		
(γ, xn)	$4623.7 \pm 55.1^*$	4623.7 ± 55.1
(γ, sn)	3276.7 ± 62.5	3251.4 ± 63.2
($\gamma, 1n$)	2068.1 ± 55.4	2024.9 ± 51.5
($\gamma, 2n$)	1080.6 ± 25.3	1081.3 ± 29.3
($\gamma, 3n$)	138.5 ± 14.3	145.4 ± 9.7
^{192}Os ($E^{\text{инт}} = 31.0$ МэВ)		
(γ, xn)	$4892.0 \pm 63.4^*$	4892.0 ± 63.4
(γ, sn)	3392.7 ± 63.4	3305.5 ± 62.5
($\gamma, 1n$)	2032.8 ± 54.5	1903.1 ± 54.2
($\gamma, 2n$)	1221.8 ± 28.4	1199.7 ± 28.4
($\gamma, 3n$)	138.0 ± 15.3	202.8 ± 12.2

* Исходное для оценки экспериментальное сечение [2].

4.2. Фоторасщепление изотопов $^{188,189}\text{Os}$

На основании приведенных в табл. 2, 3 данных для изотопов $^{188,189}\text{Os}$, полученных ранее [1], относительно особенностей их фоторасщепления сделаны выводы, что в случае изотопа ^{188}Os близко к предсказаниям использованной модели [8, 9] было выполнено выделение нейтронов с множественностью 1, а в случае изотопа ^{189}Os — с множественностью 2. Результаты разделения нейтронов с альтернативными множественностями (2 и 3 в случае ^{188}Os и 1 и 3 в случае ^{189}Os) в эксперименте

Таблица 3. Интегральные сечения $\sigma^{\text{инт}}$ ($E^{\text{инт}} > B3n$) оцененных сечений парциальных реакций ($\gamma, 1n$) и ($\gamma, 2n$) на ядрах $^{190,192}\text{Os}$ в сравнении с экспериментальными данными [2]

Реакция	$\sigma^{\text{инт}}$, МэВ мбн	
	Оцененные данные	Экспериментальные данные
^{188}Os ($E^{\text{инт}} = 22.5\text{--}31.0$ МэВ)		
($\gamma, 1n$)	69.3	231.1
($\gamma, 2n$)	179.2	98.2
($\gamma, 3n$)	114.7	120.4
^{189}Os ($E^{\text{инт}} = 20.2\text{--}31.0$ МэВ)		
($\gamma, 1n$)	103.3	115.1
($\gamma, 2n$)	210.9	147.6
($\gamma, 3n$)	165.2	205.6
^{190}Os ($E^{\text{инт}} = 21.7\text{--}31.0$ МэВ)		
($\gamma, 1n$)	62.7	93.5
($\gamma, 2n$)	178.5	126.8
($\gamma, 3n$)	138.5	145.4
^{192}Os ($E^{\text{инт}} = 21.1\text{--}31$ МэВ)		
($\gamma, 1n$)	76.1	121.7
($\gamma, 2n$)	238.0	128.8
($\gamma, 3n$)	138.0	202.8

[2] существенно отличаются от предсказаний модели [1].

4.3. Фоторасщепление изотопов $^{190,192}\text{Os}$

На основании данных, приведенных на рис. 5 и 6 и в табл. 2 и 3, фоторасщепление обоих изотопов было исследовано экспериментально [2] с весьма похожими систематическими погрешностями. В обоих случаях при энергиях до $B3n$ имеет место необоснованное перемещение заметных частей нейтронов из канала “1n” в канал “2n”, а при больших энергиях — из канала “2n” в каналы “1n” и “3n”.

Вместе с тем данные табл. 3 свидетельствуют о том, что количественно процессы необоснованного перемещения нейтронов между различными каналами в обоих изотопах заметно различаются.

В случае изотопа ^{190}Os (рис. 8) расхождение (37%) между интегральными экспериментальным (126.8 МэВ мбн) и оцененным (178.5 МэВ мбн) сечениями реакции ($\gamma, 2n$) в основном связано с расхождением аналогичных данных (30.8%, 93.5 и 62.7 МэВ мбн) для сечения реакции ($\gamma, 1n$). При этом расхождение экспериментальных и оцененных данных для сечения реакции ($\gamma, 3n$) оказывается относительно небольшим (6.9%, 145.4 и 138.5 МэВ мбн). Это означает, что необоснованные

Таблица 4. Центры тяжести $E^{ц.т.}$ и интегральные сечения $\sigma^{инт}$ оцененных сечений полных и парциальных фотонейтронных реакций на ядре ^{186}Os в сравнении с экспериментальными данными [2]

Реакция	$E^{ц.т.}$, МэВ	$\sigma^{инт}$, МэВ мбн	$E^{ц.т.}$, МэВ	$\sigma^{инт}$, МэВ мбн
	Оцененные данные		Экспериментальные данные	
	$E^{инт} = 20.0$ МэВ			
$(\gamma, xn)^*$	15.2	2810.8 ± 22.9	15.2	2810.8 ± 22.9
(γ, sn)	14.7	2389.3 ± 57.5	14.7	2345.0 ± 24.2
$(\gamma, 1n)$	14.0	1967.9 ± 57.5	14.1	1879.2 ± 23.1
$(\gamma, 2n)$	17.6	472.8 ± 10.3	17.6	465.8 ± 7.2
	$E^{инт} = 17.5-20.0$ МэВ			
$(\gamma, 1n)$		44.0 ± 2.6		-3.9 ± 14.8
$(\gamma, 2n)$		194.8 ± 11.1		218.7 ± 5.5

* Исходное для оценки экспериментальное сечение [2].

перемещения нейтронов происходили в основном из канала “2n” в канал “1n”, а в канале “3n” нейтроны были идентифицированы в целом правильно (погрешности были относительно небольшими).

В случае изотопа ^{192}Os (рис. 9) ситуация выглядит существенно иначе. Расхождение (101.2%, 128.8 и 238.0 МэВ мбн) экспериментальных и оцененных интегральных сечений реакции $(\gamma, 2n)$ почти поровну соотносится с расхождением аналогичных данных (45.6%, 121.7 и 76.1 МэВ мбн) для сечения реакции $(\gamma, 1n)$ и данных (64.8%, 202.8 и 138.0 МэВ мбн) для реакции $(\gamma, 3n)$. Это означает, что перемещения нейтронов происходили приблизительно одинаково необоснованно из канала “2n” как в канал “1n”, так и в канал “3n” (во всех трех каналах нейтроны были идентифицированы с большими погрешностями).

Обобщая приведенные выше данные, следует отметить, что оцененные сечения парциальных фотонейтронных реакций для каждого из исследованных в настоящей работе изотопов $^{186,188,189,190,192}\text{Os}$, удовлетворяющие введенным критериям достоверности данных, существенно отличаются от экспериментальных сечений, не удовлетворяющих этим критериям. Различия оцененных и экспериментальных сечений парциальных фотонейтронных реакций носят индивидуальный характер, обусловленный особенностями энергетических спектров испускаемых нейтронов.

5. СИСТЕМАТИЧЕСКИЕ ПОГРЕШНОСТИ МЕТОДА РАЗДЕЛЕНИЯ НЕЙТРОНОВ ПО МНОЖЕСТВЕННОСТИ

Столь явное различие систематических погрешностей экспериментального метода разделения нейтронов по множественности, использованного [2] для исследования фоторасщепления изотопов,

различающихся одним-двумя нейтронами, подтверждает выводы, сделанные при использовании экспериментально-теоретического метода оценки сечений парциальных фотонейтронных реакций [1, 3–7, 10, 11] относительно причин необоснованного и недостоверного перемещения нейтронов между каналами с разной множественностью. В качестве основной причины значительных систематических погрешностей при определении множественности регистрируемых в эксперименте нейтронов по измерявшейся их кинетической энергии является то обстоятельство, что связь между этими характеристиками нейтронов оказывается гораздо более сложной, чем предполагавшаяся в использованном методе (относительно простая, однозначная и прямая).

Использованный метод разделения нейтронов по множественности [2] основывался на предположении о том, что единственный нейтрон из реакции $(\gamma, 1n)$ имеет энергию, много большую, чем оба нейтрона из реакции $(\gamma, 2n)$. Однако экспериментальные и теоретические исследования спектров нейтронов из реакций $(\gamma, 1n)$, $(\gamma, 2n)$ и $(\gamma, 3n)$ свидетельствуют [6] о том, что это во многих случаях может быть и не так. Хотя превышение энергетического порога очередной многонуклонной реакции приводит к появлению нейтронов со все большими энергиями, основной максимум в спектрах нейтронов из реакций с различным количеством нейтронов практически не меняет своего энергетического положения (0.5–1.0 МэВ).

Такое положение дел дополнительно осложняет процесс определения множественности нейтронов на основании данных об их кинетических энергиях. Близость кинетических энергий нейтронов с разными множественностями приводит к большим систематическим погрешностям определяемых в эксперименте сечений парциальных реакций.

Именно с этими систематическими погрешностями в основном связаны различия экспериментальных и оцененных сечений реакций.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные исследования позволяют сделать определенные выводы об особенностях фоторасщепления исследованных изотопов осмия $^{186,188,189,190,192}\text{Os}$.

Экспериментальные данные [2] по сечениям парциальных фотонейтронных реакций $(\gamma, 1n)$, $(\gamma, 2n)$ и $(\gamma, 3n)$, полученные с помощью метода разделения фотонейтронов по множественности, содержат значительные систематические погрешности и не соответствуют предложенным критериям достоверности данных. Необоснованные перемещения значительных количеств нейтронов между каналами с разной множественностью проявляются в присутствии в энергетических зависимостях специально введенных функций $F_i^{\text{экс}}$ — отношений сечений парциальных реакций к сечению реакции выхода нейтронов — значений, превышающих физически допустимые верхние пределы (соответственно 0.50 и 0.33 для $i = 2$ и 3) или физически запрещенных отрицательных значений. Они обусловлены [6] близостью кинетических энергий нейтронов из разных парциальных реакций, существенно затрудняющей определение множественности нейтронов и делающей использованную [2] процедуру разделения нейтронов по множественности не вполне оправданной.

В рамках экспериментально-теоретического подхода для всех исследованных изотопов $^{186,188,189,190,192}\text{Os}$ оценены сечения как парциальных $(\gamma, 1n)$, $(\gamma, 2n)$ и $(\gamma, 3n)$ реакций, так и полной реакции (γ, sn) . Показано, что оцененные сечения парциальных фотонейтронных реакций для каждого изотопа существенно отличаются от экспериментальных сечений. Их различия носят

индивидуальный характер, обусловленный особенностями энергетических спектров испускаемых нейтронов.

Работа выполнена в Отделе электромагнитных процессов и взаимодействий атомных ядер НИИ-ЯФ МГУ и частично поддержана грантом РФФИ № 13-02-00124. Авторы выражают искреннюю благодарность профессору Б.С. Ишханову и доктору физико-математических наук В.Н. Орлину за ценные консультации и обсуждения, а также за помощь в анализе и интерпретации полученных данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. В. В. Варламов, М. А. Макаров, Н. Н. Песков, М. Е. Степанов, Изв. РАН. Сер. физ. **78**, 599 (2014) [Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. **78**, 412 (2014)].
2. B. L. Berman, D. D. Faul, R. A. Alvarez, *et al.*, Phys. Rev. C **19**, 1205 (1979).
3. В. В. Варламов, Б. С. Ишханов, В. Н. Орлин, В. А. Четверткова, Изв. РАН. Сер. физ. **74**, 875 (2010) [Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. **74**, 833 (2010)].
4. В. В. Варламов, Б. С. Ишханов, В. Н. Орлин, С. Ю. Трошиев, Изв. РАН. Сер. физ. **74**, 884 (2010) [Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. **74**, 842 (2010)].
5. В. В. Варламов, В. Н. Орлин, Н. Н. Песков, Т. С. Полевич, Препринт НИИЯФ МГУ-2013-1/884 (Москва, 2013).
6. Б. С. Ишханов, В. Н. Орлин, С. Ю. Трошиев, ЯФ **75**, 283 (2012) [Phys. Atom. Nucl. **75**, 253 (2012)].
7. В. В. Варламов, Б. С. Ишханов, В. Н. Орлин, ЯФ **75**, 1414 (2012) [Phys. Atom. Nucl. **75**, 1339 (2012)].
8. Б. С. Ишханов, В. Н. Орлин, ЭЧАЯ **38**, 460 (2007) [Phys. Part. Nucl. **38**, 232 (2007)].
9. Б. С. Ишханов, В. Н. Орлин, ЯФ **71**, 517 (2008) [Phys. Atom. Nucl. **71**, 493 (2008)].
10. В. В. Варламов, Б. С. Ишханов, В. Н. Орлин, Н. Н. Песков, М. Е. Степанов, ЯФ **76**, 1484 (2013) [Phys. Atom. Nucl. **76**, 1403 (2013)].
11. V. V. Varlamov, B. S. Ishkhanov, V. N. Orlin, and K. A. Stopani, Eur. Phys. J. A **50**, 114 (2014).

PHOTODISINTEGRATION OF $^{186,188,189,190,192}\text{Os}$ ISOTOPES: LIKENESSES AND DIFFERENCES

V. V. Varlamov, M. A. Makarov, N. N. Peskov, M. E. Stepanov

In addition to the obtained before results for $^{188,189}\text{Os}$ isotopes, experimental data for photodisintegration of $^{186,190,192}\text{Os}$ isotopes were analyzed using specially introduced objective criteria of partial photoneutron reaction cross section data reliability. It was found out that $(\gamma, 1n)$, $(\gamma, 2n)$, and $(\gamma, 3n)$ reaction cross sections individually satisfy or vice versa do not satisfy the reliability criteria. In many cases transitional functions of multiplicity — ratios $F_i = \sigma(\gamma, in)/\sigma(\gamma, xn)$ of correspondent partial reaction (γ, in) cross section to the neutron yield reaction cross section $\sigma(\gamma, xn) = \sigma(\gamma, 1n) + 2\sigma(\gamma, 2n) + 3\sigma(\gamma, 3n) + \dots$ — have values physically unreliable by definition. It was shown that the reason of this is the intricate relationship between the significant systematic uncertainties in experimentally determined neutron multiplicities and measured neutron kinetic energies. The dependency of those uncertainties on neutron energy spectra was analyzed. New evaluated data for cross sections of partial and total photoneutron reactions for $^{186,190,192}\text{Os}$ isotopes satisfied the data reliability criteria were obtained.