

## **СОГЛАСОВАННАЯ ОЦЕНКА СЕЧЕНИЙ ФОТОНЕЙТРОННЫХ РЕАКЦИЙ ПО ДАННЫМ, ПОЛУЧЕННЫМ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ НА ПУЧКАХ КВАЗИМОНОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ АННИГИЛЯЦИОННЫХ ФОТОНОВ В ЛИВЕРМОРЕ (США) И САКЛЭ (ФРАНЦИЯ)**

В.В.Варламов, Н.Н.Песков, Д.В.Руденко, М.Е.Степанов.

Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова  
Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В.Скобельцына

Центр данных фотоядерных экспериментов

CONSISTENT EVALUATION OF PHOTONEUTRON REACTION CROSS SECTIONS USING THE DATA OBTAINED IN THE EXPERIMENTS WITH QUASIMONOENERGETIC ANNIHILATION PHOTON BEAMS AT USA LIVERMORE AND FRANCE SACLAY. The detailed system analysis of the  $(\gamma, xn)$ ,  $(\gamma, n)$  and  $(\gamma, 2n)$  reaction cross section data obtained using quasimonoenergetic annihilation photon beams at Livermore (USA) and Saclay (France) was carried out for 19 (for 7 of them – at first) nuclei  $^{51}\text{V}$ ,  $^{75}\text{As}$ ,  $^{89}\text{Y}$ ,  $^{90}\text{Zr}$ ,  $^{115}\text{In}$ ,  $^{116,117,118,120,124}\text{Sn}$ ,  $^{127}\text{I}$ ,  $^{133}\text{Cs}$ ,  $^{159}\text{Tb}$ ,  $^{165}\text{Ho}$ ,  $^{181}\text{Ta}$ ,  $^{197}\text{Au}$ ,  $^{208}\text{Pb}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$ . It was observed that the  $(\gamma, xn)$  reaction cross section data obtained at both laboratories without using neutron multiplicity sorting procedure disagree by 10 – 15 %. Additionally it was found out that the disagreement of partial reactions  $(\gamma, n)$  and  $(\gamma, 2n)$  cross sections, obtained at both laboratories using neutron multiplicity sorting procedure are significantly more (till 30 – 40 %) and as a rule have opposite directions. These disagreements were interpreted as the result of difference of neutron multiplicity sorting procedures used in both laboratories: that is incorrect at Saclay with the result of incorrect transmission of the part of  $(\gamma, 2n)$  reaction cross section into that of  $(\gamma, n)$  reaction. The special method was used to move the data into consistence. Its idea is that definite “false” part of  $(\gamma, n)$  reaction cross section was recalculated and transmitted back into that of reaction  $(\gamma, 2n)$ . For all 19 nuclei listed above the jointly corrected  $(\gamma, xn)$ ,  $(\gamma, n)$  and  $(\gamma, 2n)$  reaction cross were evaluated and prepared for including into the EXFOR nuclear reaction database.

### **Введение**

Одной из основных задач экспериментальных исследований в области ядерной физики была и остается до сих пор задача получения информации о строении атомного ядра. Такая информация может быть получена, прежде всего, в ядерных реакциях. Анализ угловых, энергетических, массовых и других распределений частиц - продуктов, энергий возбуждения конечного ядра, измеренных при различных энергиях тех или иных налетающих частиц позволяет получать информацию о строении ядра-мишени. Среди огромного разнообразия ядерных реакций немаловажное место занимают реакции, вызванные электромагнитными взаимодействиями. Такие реакции [1 - 4] протекают за счет электромагнитного поля, свойства которого хорошо изучены, и механизм передачи энергии от налетающего  $\gamma$ -кванта исследуемому ядру известен точно. В таких реакциях проще, чем в реакциях под действием нейтронов и заряженных частиц, отделить эффекты структуры ядра от механизмов его возбуждения.

Процесс поглощения ядром  $\gamma$ -кванта с энергией до  $\sim 50$  МэВ приводит к тому, что при снятии внесенного возбуждения ядро испускает отдельные нуклоны и их комбинации. В энергетической зависимости сечения фотоядерной реакции для всех атомных ядер за

исключением легчайших - дейтрона, тритона, ядра  $^3\text{He}$  - наблюдается отчетливо выраженный мощный и широкий максимум, называемый гигантским дипольным резонансом (ГДР). Ядро с наибольшей вероятностью испускает 1 нуклон, с меньшей вероятностью - 2 и больше. Это обстоятельство вместе с соотношением энергетических порогов соответствующих реакций определяет основные каналы распада ГДР. Реакция, соответствующая каналу распада ГДР с образованием того или иного нуклона или их комбинаций ( $(\gamma, n)$ ,  $(\gamma, p)$ ,  $(\gamma, np)$ ,  $(\gamma, 2n)$ ,  $(\gamma, 3n)$  и т.п.) называется парциальной. Сумма всех парциальных реакций описывает все возможные каналы (за исключением рассеяния) выбивания фотонов из первичного пучка – реакцию полного фотопоглощения

$$(\gamma, \text{abs}) = (\gamma, 1n) + (\gamma, np) + (\gamma, 2n) + (\gamma, 3n) + (\gamma, 1p) + (\gamma, 2p) + \dots + (\gamma, f), \quad (1)$$

где  $(\gamma, f)$  – реакция деления, которая возможна лишь в относительно тяжелых ядрах.

В области энергий максимума ГДР сечение фотопоглощения для большинства ядер в основном исчерпывается сечениями  $(\gamma, n)$ ,  $(\gamma, p)$  и  $(\gamma, np)$  реакций, тогда как за максимумом ГДР заметный вклад в сечение фотопоглощения могут давать реакции с большей множественностью испускаемых нуклонов, прежде всего реакция  $(\gamma, 2n)$ . Соотношение сечений реакций с испусканием одного и двух нейтронов является важной характеристикой процесса фоторасщепления, зависящей от механизма возбуждения и распада ядра. Так, например, расхождение энергетической зависимости сечения реакции испускания единственного нейтрона с предсказаниями статистической модели, может служить доказательством проявления процессов прямого выбивания нейтронов  $\gamma$ -квантами из ядра, а степень этого расхождения – мерой соотношения различных механизмов реакции [5].

Однако обоснованность таких заключений в значительной степени зависит от того, с какой точностью и надежностью определяется сечение реакции с испусканием единственного нейтрона  $(\gamma, n)$  в той области энергий, где становится возможным процесс испускания двух нейтронов в реакции  $(\gamma, 2n)$ . В силу различных обстоятельств, основные из которых будут рассмотрены ниже, во многих случаях данные по реакциям  $(\gamma, n)$  и  $(\gamma, 2n)$  оказываются взаимно связанными и влияющими друг на друга. К сожалению, такие данные, полученные в разных экспериментах, существенно расходятся друг с другом. Большинство данных по реакциям  $(\gamma, n)$  и  $(\gamma, 2n)$  получено в экспериментах с квазимоноэнергетическими аннигиляционными фотонами в Ливерморе (США) и Саклэ (Франция), а причиной их существенных расхождений между собой являются [6] определенные недостатки использованных в экспериментах процедур определения множественности фотонейтронов.

Более того, выполненные ранее исследования [например, 7 – 9] показали, что во многих случаях и непосредственно получаемые в разных экспериментах данные, свободные от погрешностей, связанных с определением множественности продуктов, такие, как сечения полной фотонейтронной реакции

$$(\gamma, xn) = (\gamma, 1n) + (\gamma, np) + 2(\gamma, 2n) + 3(\gamma, 3n) + \dots + v(\gamma, f), \quad (2)$$

также заметно отличаются друг от друга. В упомянутых исследованиях были изучены основные причины таких расхождений и предложены способы согласования данных друг с другом. Таким исследованиям применительно, прежде всего, к данным по сечениям парциальных фотонейтронных реакций  $(\gamma, n)$  и  $(\gamma, 2n)$  и посвящена настоящая работа. Дополнительно рассматриваются и данные по сечениям полной фотонейтронной реакции  $(\gamma, xn)$ .

Работа выполнялась с использованием полной базы данных по ядерным реакциям под действием фотонов, нейтронов, заряженных частиц и тяжелых ионов [10 - 13], созданной в рамках сети [14] Центров ядерных данных МАГАТЭ в соответствии с требованиями и рекомендациями [15] Секции ядерных данных МАГАТЭ на основе массива EXFOR [16].

## **1. Анализ систематических расхождений данных по сечениям фотонейтронных реакций**

Очевидно, что для надежного исследования ГДР, различных каналов его распада и их конкуренции в процессах формирования ГДР необходимо, прежде всего, обеспечить возможности детального и точного определения сечений, как полного фотопоглощения, полных ( $\gamma, xn$ ), так и парциальных, прежде всего, фотонейтронных, таких как ( $\gamma, n$ ), ( $\gamma, np$ ), ( $\gamma, 2n$ ), ( $\gamma, 3n$ ) и других фотоядерных реакций. Экспериментально надежно выделить отдельно одну из перечисленных реакций и определить ее сечение возможно далеко не всегда. Трудности экспериментального исследования фотоядерных реакций (отсутствие интенсивных пучков моноэнергетических фотонов, малые величины сечений реакций, относительно близкие значения энергетических порогов различных реакций, высокие уровни фона, недостаточные эффективности детекторов и др.) зачастую вынуждают экспериментаторов использовать далеко не оптимальные сочетания экспериментальных условий. Среди проблем, которые существенно затрудняют получение надежной информации о сечениях фотоядерных реакций и представляют наибольшие трудности для однозначной интерпретации результатов разных экспериментов при их сравнении, можно как основные выделить следующие:

- немонохроматичность фотонных пучков;
- множественность продуктов многих реакций, прежде всего, нейтронов из реакции ( $\gamma, 2n$ ).

Первая трудность связана с отсутствием достаточно интенсивных пучков моноэнергетических фотонов и тем самым, с особенностями создания в фотоядерных экспериментах специальных условий, в которых эффективный спектр фотонов, вызывающих реакцию, может рассматриваться как квазимоноэнергетический, то есть в определенной степени близкий к моноэнергетическому. Вторая трудность обусловлена особенностями разных методов, используемых для идентификации и регистрации различных продуктов реакций.

Отсутствие при проведении конкретных экспериментов должного внимания хотя бы к одной из перечисленных трудностей, а тем более к ним обеим, чревато проявлением существенных расхождений в интерпретации полученных в эксперименте результатов. Во многих случаях это приводит к значительным систематическим расхождениям между результатами разных экспериментов. Выявление таких систематических расхождений и устранение их влияния на результат каждого отдельного эксперимента возможно лишь на основе детального и системного общего анализа результатов многих экспериментов с аккуратным учетом того, что именно и в каких именно условиях было получено.

Целый ряд подобных системных исследований выполнен [например, 7 - 9] на основе реляционных баз данных, созданных [например, 10 - 13] в ЦДФЭ НИИЯФ МГУ. Эти исследования позволили выяснить причины некоторых из заметных систематических расхождений и получить (оценить) целый ряд сечений различных фотоядерных реакций в виде, практически свободном от определенных систематических погрешностей.

### **1.1. Систематические погрешности сечений реакций, полученных с помощью тормозного $\gamma$ -излучения и квазимоноэнергетических аннигиляционных фотонов**

Наиболее значимыми из отмеченных выше расхождений являются заметные расхождения результатов экспериментов, выполненных с помощью пучков тормозного  $\gamma$ -излучения (ТИ) и квазимоноэнергетических фотонов, образующихся при аннигиляции релятивистских позитронов (КМА-фотонов), в которых совместно получено абсолютное большинство данных по сечениям фотоядерных реакций. Они заключаются в следующем - сечения фотоядерных

реакций, полученные с помощью пучков КМА-фотонов, по сравнению с сечениями аналогичных реакций - результатами ТИ-экспериментов:

- в подавляющем большинстве случаев, имеют более плавную (сглаженную) форму;
- во многих случаях имеют меньшую абсолютную величину.

Для иллюстрации подобных расхождений могут быть использованы достаточно точные данные по сечениям полной фотонейтронной реакции  $(\gamma, xn) = [(\gamma, n) + (\gamma, np) + 2(\gamma, 2n)]$  на двух изотопах кислорода  $^{16,18}\text{O}$ .

**Реакция  $^{16}\text{O}(\gamma, xn)$ .** Сечения реакции  $^{16}\text{O}(\gamma, xn)$ , полученные в трех разных экспериментах - одном ТИ-эксперименте [17] и двух КМА-экспериментах - в Саклэ (Франция) [18] и в Ливерморе (США) [19], приведены на Рис. 1. Хорошо видно, что практически все характерные особенности (отчетливо выраженные максимумы и минимумы) проявляются во всех трех сравниваемых сечениях. Легко заметить, что во всех трех сравниваемых сечениях эти особенности близки (хотя и не совпадают) по энергетическому положению, но довольно заметно различаются по абсолютной величине. Можно сказать, что характер этих различий приблизительно один и тот же во всей исследованной области энергий.

Обращает на себя внимание то обстоятельство, что результат ТИ-эксперимента [17] и КМА-данные, полученные в Саклэ [18], расходятся по существу лишь по форме (второе сечение выглядит как бы заметно сглаженным вариантом первого), а по абсолютной величине оказываются близкими друг к другу. При этом по абсолютной величине КМА-сечение, полученное в Ливерморе [19], оказывается заметно (на  $\sim 15\%$ ) меньше обоих предыдущих.

**Реакция  $^{18}\text{O}(\gamma, xn)$ .** Более точное количественное представление о масштабе обсуждаемых расхождений может было получено, например, по данным работы [20], в которой приведены детальные данные о соотношениях амплитуд ( $A_{\text{ТИ}}/A_{\text{КМА}}$ ) и ширин ( $\langle \Gamma_{\text{КМА}}/\Gamma_{\text{ТИ}} \rangle$ ) резонансов в сечениях реакции  $(\gamma, xn)$ , идентифицированных в экспериментах с ТИ- [20] и КМА- [21, Ливермор] фотонами на изотопе кислорода  $^{18}\text{O}$ . При всей условности процедуры определения амплитуд (и ширин) резонансов в сечениях, имеющих сложную структуру, практически для всех резонансов в КМА-сечении были получены меньшие значения амплитуды (среднее значение отношения амплитуд  $\langle A_{\text{ТИ}}/A_{\text{КМА}} \rangle = 1.17$ , отношение величин интегральных сечений в интервале 8 - 28 МэВ  $\sigma_{\text{ТИ}}^{\text{int}}/\sigma_{\text{КМА}}^{\text{int}} = 1.16$ ). В соответствии со сказанным выше о том, что КМА-сечения представляют собой как бы сглаженные варианты ТИ-сечений, среднее значение отношений ширин соответствующих резонансов заметно превышает 1:  $\langle \Gamma_{\text{КМА}}/\Gamma_{\text{ТИ}} \rangle = 1.35$ .

Представление о систематическом характере расхождений результатов различных экспериментов дает анализ [22] существующих экспериментальных данных [1 - 4] более 500 сечений полной фотонейтронной реакции  $(\gamma, xn)$  на ядрах от  $^3\text{H}$  до  $^{238}\text{U}$ . На Рис. 2 приведены значения отношений интегральных сечений

$$r = R_{\text{сист}}^{\text{int}} = \sigma_{\text{разные лаборатории}}^{\text{int}}(\gamma, xn) / \sigma_{\text{Ливермор}}^{\text{int}}(\gamma, xn), \quad (3)$$

полученных разными методами в различных лабораториях, к КМА-данным, полученным в одной из них (для определенности был выбран Ливермор). С тем, чтобы по возможности избежать проблем [6], связанных с измерением множественности фотонейтронов, проводился подсчет интегральных сечений именно реакции  $(\gamma, xn)$ , причем, в области энергий налетающих фотонов между энергетическими порогами реакций  $(\gamma, n)$  и  $(\gamma, 2n)$ : тем самым, фактически анализировались (сравнивались) данные о реакции  $(\gamma, n)$  в области энергий до порога реакции  $(\gamma, 2n)$ .

Приведенные результаты свидетельствуют о явном расхождении данных Ливермора с данными большинства лабораторий: среднее значение отношения  $\langle R_{\text{сист}}^{\text{int}} \rangle \neq 1$ . Несмотря на то, что между данными различных лабораторий также существуют определенные расхождения, отчетливо проявляется концентрация значений исследуемого отношения вокруг среднего значения  $\langle R_{\text{сист}}^{\text{int}} \rangle = 1.122 \pm 0.243$ . При этом особенно важно отметить, что КМА-данные Саклэ по абсолютной величине согласуются не с однотипными КМА - данными Ливермора, а с

данными, полученными как с квазимоноэнергетическими фотонами в других лабораториях (General Atomic (США), Pennsylvania (США), Illinois (США), Giessen (Германия)), так и с данными экспериментов с тормозным  $\gamma$ -излучением (выполненными преимущественно в Москве и Мельбурне (Австралия)).

Подобные расхождения абсолютных величин сечений реакций могут быть обусловлены такими причинами, как, например, различия энергетических калибровок экспериментальных установок и погрешности абсолютных нормировок.

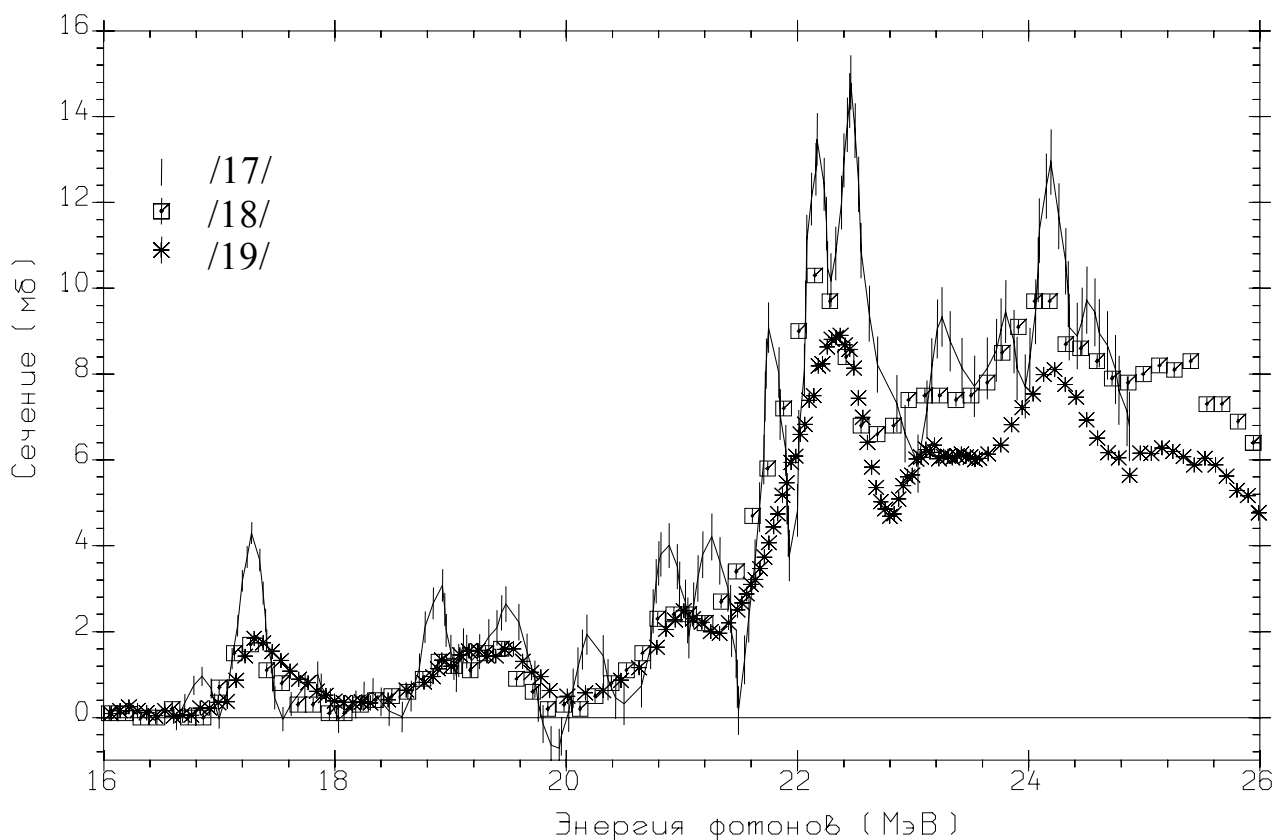


Рис. 1. Сравнение сечений реакции  $^{16}\text{O}(\gamma, xn)$ , полученных в ТИ-эксперименте [17] и в двух типичных экспериментах с КМА-фотонами, выполненных в Саклэ (Франция) [18] и Ливерморе (США) [19].

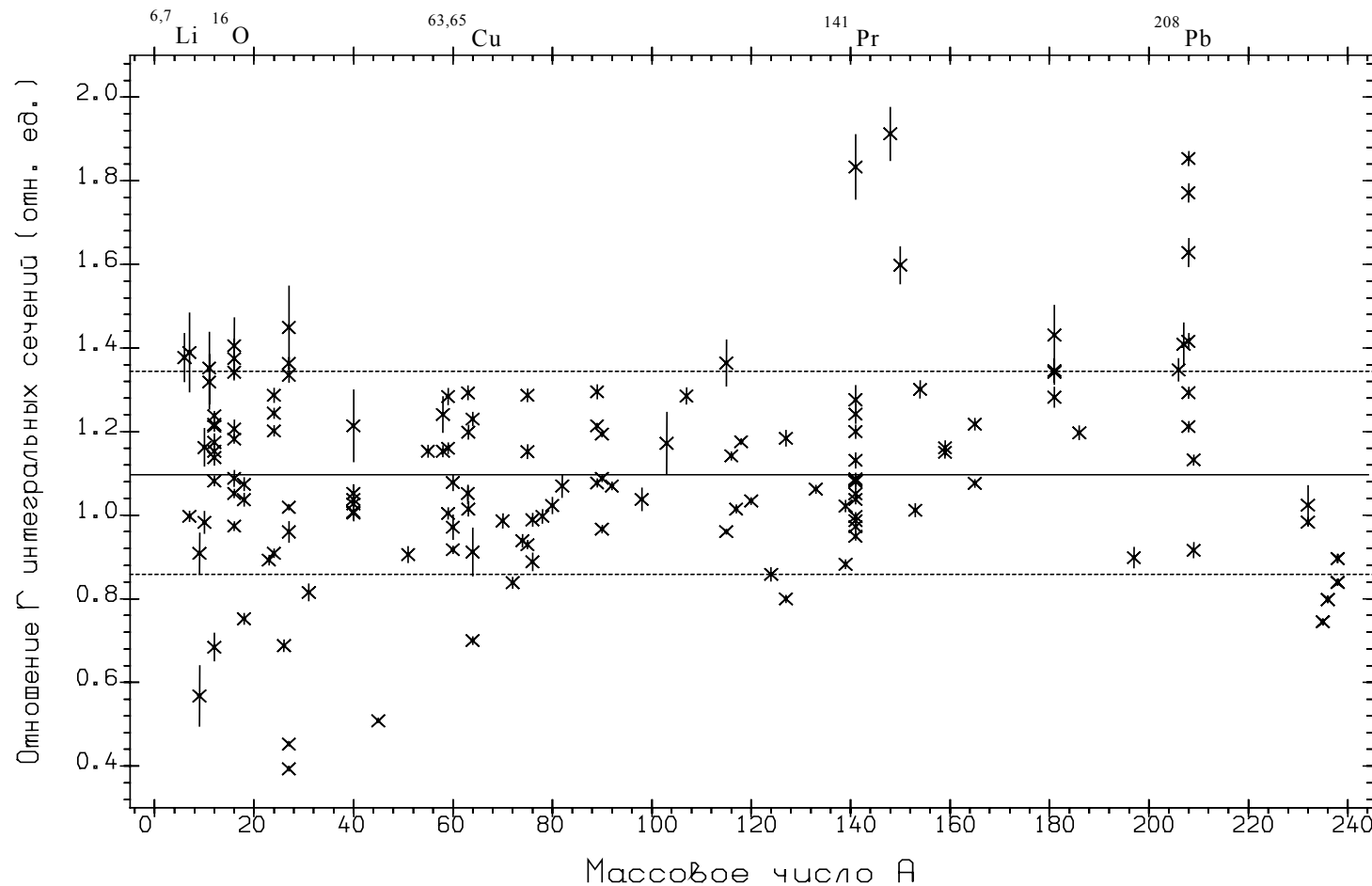


Рис. 2. Систематика [22] значений отношения  $r = R_{\text{сист}}^{\text{int}} = \sigma_{\text{разные лаборатории}}^{\text{int}}(\gamma, xn) / \sigma_{\text{Ливермор}}^{\text{int}}(\gamma, xn)$  величин интегральных сечений полной фотонейтронной реакции до порога реакции  $(\gamma, 2n)$  для различных ядер, полученных с помощью различных фотонных пучков в разных лабораториях и с помощью квазимоноэнергетических фотонов в Ливерморе. Сплошная линия - среднее значение отношения  $r = R_{\text{сист}}^{\text{int}}$ . Пунктирные линии - границы области стандартного отклонения.

## 1.2. Систематические погрешности сечений полной фотонейтронной реакции, полученных с помощью КМА-фотонов в Саклэ и Ливерморе

### 1.2.1. Интегральные сечения реакций.

Отмеченные выше на примере данных о сечении полной фотонейтронной реакции  $^{16}\text{O}(\gamma, \text{xn})$  расхождения данных (Рис. 1) однотипных КМА-экспериментов, выполненных с использованием похожих методик в Саклэ и Ливерморе, могут быть дополнены большим количеством других примеров.

Так, например, в Таблице 1 приведены данные [1] об интегральных сечениях полной фотонейтронной реакции  $(\gamma, \text{xn})$ , также полученных в Саклэ и Ливерморе для 5 средних и тяжелых ядер, отобранные из многочисленных данных работы [1] для наглядности сравнения по близости пределов интегрирования. Хорошо видно, что для всех 5 приведенных ядер данные по интегральным сечениям идентичных реакций, полученные в Саклэ, оказываются больше данных, полученных в Ливерморе, на  $\sim 6 - 16 \%$ . Так в случае ядра  $^{51}\text{V}$  для практически совпадающих пределов интегрирования  $E_{\gamma}^{\text{макс}}$  отношение  $R^{\text{int}}(\gamma, \text{xn}) = \sigma_{\text{C}}^{\text{int}}(\gamma, \text{xn}) / \sigma_{\text{Л}}^{\text{int}}(\gamma, \text{xn})$  равно  $689/654 = 1.06$ . Для ядер  $^{75}\text{As}$ ,  $^{90}\text{Zr}$  и  $^{165}\text{Ho}$  вследствие соотношения между приведенными пределами интегрирования  $E_{\gamma}^{\text{макс}}_{\text{C}} < E_{\gamma}^{\text{макс}}_{\text{Л}}$  эти отношения не могут быть меньше, чем  $1306/1130 = 1.16$ ,  $1309/1158 = 1.13$  и  $3667/3385 = 1.08$  соответственно.

Таблица 1.

Сравнение интегральных сечений (по данным [1]) для полной фотонейтронной реакции  $(\gamma, \text{xn})$ , полученных в Саклэ (верхние значения) и Ливерморе (нижние значения).

Ядро	$^{51}\text{V}$	$^{75}\text{As}$	$^{90}\text{Zr}$	$^{133}\text{Cs}$	$^{165}\text{Ho}$
$E_{\gamma}^{\text{макс}}$ , МэВ	27.8	26.2	25.9	24.2	26.8
	27.8	29.5	27.6	29.5	28.9
$\sigma^{\text{int}}$ , МэВ•мб	689	1306	1309	2484	3667
	654	1130	1158	2505	3385

Многие другие примеры подобных же расхождений данных, приведенных в работе [1], менее наглядны, только потому, что значения пределов интегрирования, в которых рассчитывались интегральные сечения, заметно различаются, но с очевидностью подтверждают обнаруженную тенденцию.

### 1.2.2. Абсолютные величины сечений реакций

Обсуждаемые расхождения данных однотипных КМА-экспериментов, выполненных в Ливерморе и Саклэ, известны достаточно давно и являлись предметом многочисленных исследований и обсуждений.

Так, например, сечения фотонейтронных реакций на ядрах  $^{\text{ест}}\text{Zr}$ ,  $^{127}\text{I}$ ,  $^{141}\text{Pr}$ ,  $^{197}\text{Au}$  и  $^{\text{ест}}\text{Pb}$ , полученные в разное время ранее в Ливерморе, были в 1987 году определены в этой же лаборатории вновь [23] специально с целью выяснения возможных способов устранения впечатляющих расхождений этих данных с данными Саклэ. Новые данные как по абсолютным величинам, так и по величинам интегральных сечений различных фотонейтронных реакций на 14 ядрах детально сравнивались между собой, и были использованы для выработки рекомендаций по устранению обсуждаемых расхождений. Рекомендовано было введение специального фактора F (Таблица 2) дополнительной взаимной нормировки данных обеих лабораторий.

Таблица 2.

Рекомендованный [23] фактор F (отношение Ливермор/Саклэ)  
нормировки данных Саклэ с целью устранения их расхождений с данными Ливермора

Ядро	Лаб.	Фактор F, отн. ед	Фактор 1/F, отн. ед.
$^{85}\text{Rb}$	С	$0.85 \pm 0.03$	1.18
$^{89}\text{Sr}$	С	$0.85 \pm 0.03$	1.18
$^{89}\text{Y}$	С	0.82	1.22
$^{89}\text{Y}$	Л	1.0	
$^{90}\text{Zr}$	С	0.88	1.14
$^{90}\text{Zr}$	Л	1.0	
$^{91}\text{Zr}$	Л	1.0	
$^{92}\text{Zr}$		1.0	
$^{93}\text{Nb}$	С	$0.85 \pm 0.03$	1.18
$^{94}\text{Zr}$	Л	1.0	
$^{127}\text{I}$	С	0.8	1.25
$^{197}\text{Au}$	С	0.93	1.08
$^{206}\text{Pb}$	Л	1.22	
$^{207}\text{Pb}$	Л	1.22	
$^{208}\text{Pb}$	Л	1.22	
$^{208}\text{Pb}$	С	0.93	1.08
$^{209}\text{Bi}$	Л	1.22	

Обращает на себя внимание двойственный характер выработанных [23] рекомендаций. В случаях сечений реакций на ядрах  $^{206,207,208}\text{Pb}$ ,  $^{209}\text{Bi}$ , когда имеется возможность сравнения с данными Саклэ, предлагается эти последние уменьшить (умножить на  $F \sim 0.8$ ). Когда же данные Саклэ отсутствуют, предлагается данные Ливермора увеличить (умножить на  $F \sim 1.2$ ).

Уместно также еще раз обратить внимание на то обстоятельство, что в качестве причин впечатляющих (до  $\sim 25\%$ ) расхождений данных однотипных КМА-экспериментов, выполненных в Саклэ и Ливерморе, сами авторы работы [23] называют возможные ошибки, допущенные в Ливерморе при определении потока фотонов и эффективности детектора нейтронов.

### 1.3. Систематические погрешности абсолютных величин сечений парциальных реакций $(\gamma, n)$ и $(\gamma, 2n)$ , полученных с помощью КМА-фотонов в Саклэ и Ливерморе

Представление о том, как именно могут различаться не только абсолютные значения, но и форма сечений однотипных реакций, полученных в однотипных КМА-экспериментах, но в разных лабораториях, дает Рис. 3, на котором приведены сечения реакции  $^{75}\text{As}(\gamma, xn)$  из двух экспериментов на пучках КМА-фотонов, проведенных соответственно в Саклэ (Франция) [24] и в Ливерморе (США) [25]. Из Рис. 3 отчетливо видно, что во всей исследованной области энергий первое сечение имеет заметно большую абсолютную величину по сравнению со вторым.

Вместе с тем, Рис. 3 свидетельствует также и о том, что однотипные КМА-данные заметно отличаются друг от друга по-разному в различных областях энергий. Если в области энергий ниже  $\sim 18$  МэВ с равниваемые сечения имеют весьма похожую форму, то в области больших



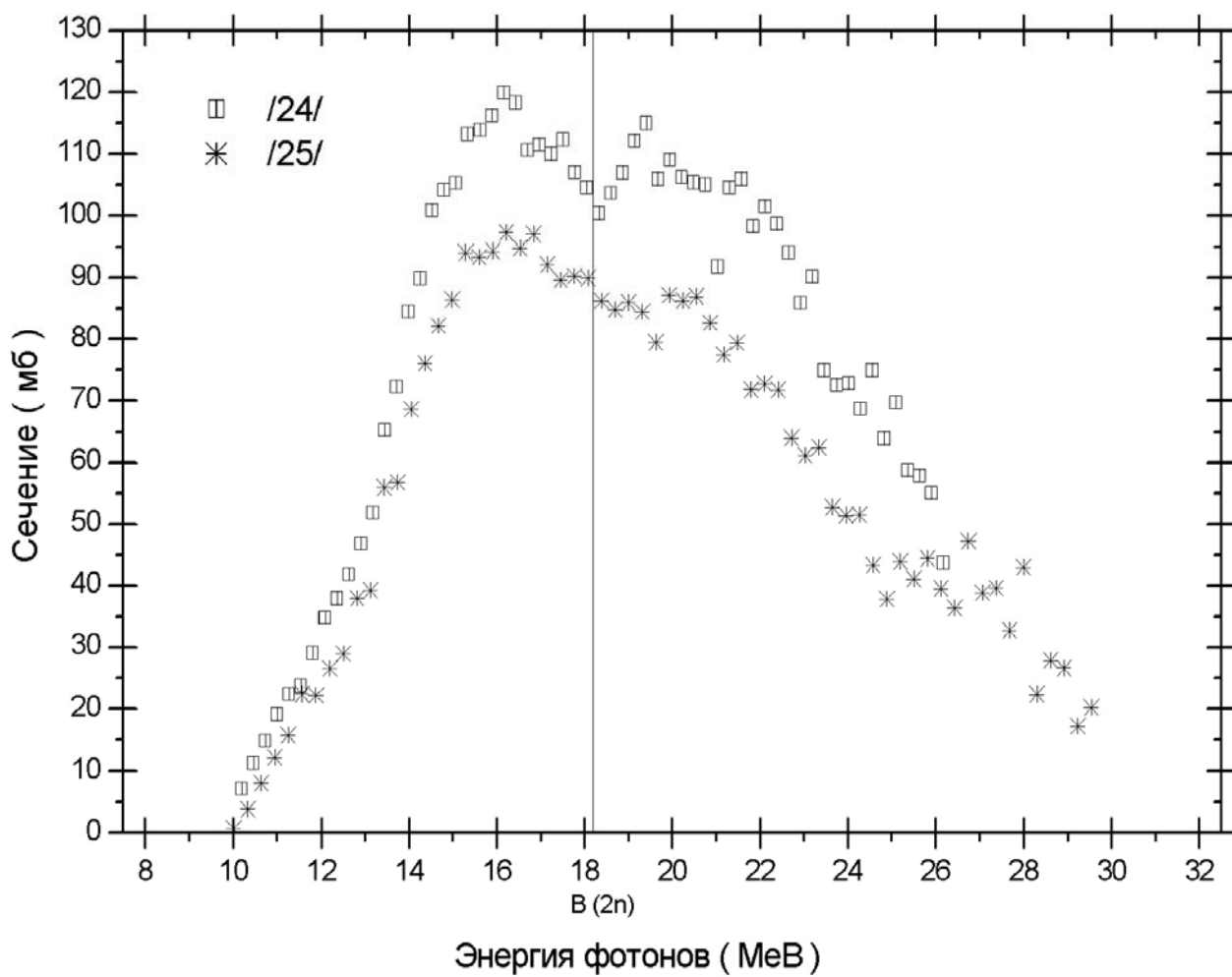


Рис. 3. Сравнение сечений реакции  $^{75}\text{As}(\gamma, xn)$ , полученных в двух типичных экспериментах с КМА-фотонами, выполненных в Саклэ [24] и Ливерморе [25].

энергий в сечении [24] по сравнению с сечением [25] проявляется достаточно мощный дополнительный максимум. Близость энергии появления такого расхождения к величине порога реакции  $^{75}\text{As}(\gamma, 2n)^{73}\text{As}$ , который равен 18.2 МэВ, а также близость величины вклада этого дополнительного максимума в сечение реакции  $^{75}\text{As}(\gamma, xn)$  к величине сечения реакции  $^{75}\text{As}(\gamma, 2n)^{73}\text{As}$ , также полученного в работе [24], наводит на размышления о том, что подобные расхождения также могут быть каким-то образом связаны с процессами регистрации нейтронов с множественностью, отличной от 1, то есть продуктов, прежде всего, именно указанной реакции  $(\gamma, 2n)$ .

Детальный системный анализ расхождений данных Саклэ и Ливермора, относящихся к сечениям парциальных фотонейтронных реакций, прежде всего – реакции  $(\gamma, 2n)$ , выявляет еще более серьезный (драматический) характер подобных расхождений, которые явно являются систематическими. Так в работе [6] одновременно с анализом отношений интегральных сечений полной фотонейтронной реакции  $(\gamma, xn)$ , полученных непосредственно в экспериментах, были рассмотрены и соотношения абсолютных величин [1] сечений парциальных реакций  $(\gamma, n)$  и  $(\gamma, 2n)$  для 12 средних и тяжелых ядер от  $^{89}\text{Y}$  до  $^{208}\text{Pb}$ . Были установлены следующие закономерности:

- сечения полной фотонейтронной реакции  $(\gamma, xn)$ , полученные в Саклэ и Ливерморе, оказываются немного сдвинутыми друг относительно друга по энергии;
- сечения реакции  $(\gamma, xn)$ , полученные в Саклэ, оказываются по абсолютной величине на  $\sim 8 - 15 \%$  больше сечений, полученных в Ливерморе (в близком соответствии с систематикой [22], приведенной на (Рис.2));
- величины сечений реакций  $(\gamma, n)$  и  $(\gamma, 2n)$ , полученные в Саклэ и Ливерморе, соотносятся между собой существенно по-иному:
  - величины сечений реакций  $(\gamma, n)$ , полученных в Саклэ, в целом также оказываются больше величин сечений таких же реакций, полученных в Саклэ, однако их отношение намного превышает  $10 - 15 \%$  расхождения между величинами сечений реакций  $(\gamma, xn)$ ; так, например, в случае ядра  $^{159}\text{Tb}$  такое превышение определенное [6] по данным [1] составляет  $37 \%$  -  $1936/1413$  (в пользу данных Саклэ);
  - при этом величины сечений реакций  $(\gamma, 2n)$  оказываются связанными между собой в обратном соотношении; так для того же ядра  $^{159}\text{Tb}$  отношение величин сечений равно  $605/887$  (в пользу данных Ливермора), то есть недостача составляет [1, 6]  $47 \%$ !

Количественные данные [1] для всех 12 исследованных в работе [6] ядер приведены в Таблице 4.

Здесь и далее следует иметь в виду, что поскольку в обсуждающихся детально экспериментах, выполненных в Саклэ и Ливерморе, использовался метод прямой регистрации фотонейтронов, а пороги  $B(n\gamma)$  реакций  $(\gamma, n\gamma)$  невелики (таблица 4), более правильным для однопоточной реакции является обозначение не  $(\gamma, n)$ , а  $[(\gamma, n) + (\gamma, n\gamma)]$ .

Таким образом результаты экспериментов, выполненных в обеих лабораториях для одинаковых полных фотонейтронных реакций  $(\gamma, xn)$ , то есть полученные без учета множественности фотонейтронов, различаются  $\sim 8 - 15 \%$  (в пользу данных Саклэ), а результаты, полученные для сечений парциальных реакций с учетом множественности, расходятся совершенно иначе – просто драматически (существенно больше (до  $50 \%$ ) и в разные стороны). На основе анализа особенностей процедур определения множественности фотонейтронов в Саклэ и Ливерморе эти расхождения были интерпретированы [6] как следствие некорректности процедуры определения множественности фотонейтронов, использованной в Саклэ: часть нейтронов из реакции  $(\gamma, 2n)$  ошибочно приписывается реакции  $(\gamma, n)$ . Для преодоления подобных расхождений данных обеих лабораторий по парциальным фотонейтронным реакциям в был предложен специальный метод. Суть его заключается в том, что данные для сечений реакций  $(\gamma, 2n)$ , полученные в Саклэ, где множественность

фотонейтронов была определена некорректно, пересчитываются по специальной формуле: часть сечения реакции  $(\gamma, n)$ , ошибочно отнесенная к одно-нейтронной реакции, возвращается в сечение двух-нейтронной реакции.

Таблица 4.

Сравнение [6] величин интегральных сечений [1] реакций  $(\gamma, n)$ ,  $(\gamma, 2n)$  и  $(\gamma, xn)$ , полученных с помощью пучков КМА-фотонов (значения Саклэ/Ливермор).

Ядро	Порог $B(np)$ реакции $(\gamma, np)$ , МэВ	$\sigma_{\text{с}}^{\text{int}}(\gamma, n)/\sigma_{\text{л}}^{\text{int}}(\gamma, n)$ , оба – МэВ*мб	$\sigma_{\text{с}}^{\text{int}}(\gamma, 2n)/\sigma_{\text{л}}^{\text{int}}(\gamma, 2n)$ , оба – МэВ*мб	$R(xn) = \sigma_{\text{с}}^{\text{int}}(\gamma, xn)/\sigma_{\text{л}}^{\text{int}}(\gamma, xn)$ , отн. ед.
$^{89}\text{Y}$	18.2	1279/960 = 1.33	74/99 = 0.75	$1.255 \pm 0.005$
$^{115}\text{In}$	15.9	1470/1354 = 1.09	278/508 = 0.55	$0.942 \pm 0.004$
$^{117}\text{Sn}$	16.2	1334/1380 = 0.97	220/476 = 0.46	$1.012 \pm 0.007$
$^{118}\text{Sn}$	18.8	1377/1302 = 1.06	258/531 = 0.49	$1.056 \pm 0.005$
$^{120}\text{Sn}$	19.0	1371/1389 = 0.99	399/673 = 0.59	$0.987 \pm 0.004$
$^{124}\text{Sn}$	20.0	1056/1285 = 0.82	502/670 = 0.75	$0.929 \pm 0.006$
$^{133}\text{Cs}$	15.0	1828/1475 = 1.24	328/503 = 0.65	$1.106 \pm 0.007$
$^{159}\text{Tb}$	14.0	1936/1413 = 1.37	605/887 = 0.68	$1.062 \pm 0.001$
$^{165}\text{Ho}$	13.9	2090/1735 = 1.20	766/744 = 1.03	$1.136 \pm 0.007$
$^{181}\text{Ta}$	13.3	2180/1300 = 1.68	790/881 = 0.90	$1.218 \pm 0.018$
$^{197}\text{Au}$	13.7	2588/2190 = 1.18	479/777 = 0.62	$1.004 \pm 0.013$
$^{208}\text{Pb}$	14.9	2731/1776 = 1.54	328/860 = 0.38	$1.296 \pm 0.011$

Таким образом, ситуация с сечениями парциальных фотонейтронных реакций  $(\gamma, n)$  и  $(\gamma, 2n)$  выглядит весьма сложной:

- с одной стороны, данные Ливермора и для полной реакции  $(\gamma, xn)$  и для парциальных  $(\gamma, n)$  и  $(\gamma, 2n)$  реакций, которые между собой соотносятся правильно, не могут быть использованы [6, 8, 9] без корректировки – умножения на коэффициент, согласующий эти данные с данными других лабораторий; этот коэффициент в принципе должен рассчитываться по КМА-данным Саклэ для сечения реакции  $(\gamma, xn)$  на каждом ядре индивидуально; в случае отсутствия соответствующих данных Саклэ может быть использован [8, 9] коэффициент  $\langle R^{\text{int}}_{\text{сист}} \rangle = 1.122$ , полученный [22] на основе большой (практически полной) систематики данных о сечениях полной фотонейтронной реакции;
- с другой стороны, в то время как данные Саклэ для  $(\gamma, xn)$  реакции могут быть использованы [22] непосредственно (без дополнительной нормировки), данные Саклэ для  $(\gamma, n)$  и  $(\gamma, 2n)$  реакций не могут быть использованы: значительно (и в разную сторону!) отличаются от соответствующих данных Ливермора и должны быть пересчитаны с помощью специального соотношения [6].

К сожалению, при определении в работе [6] значений специального коэффициента, определяющего долю сечения реакции  $(\gamma, n)$ , которая должна быть возвращена в сечение реакции  $(\gamma, 2n)$ , были допущены некоторые неточности, корректировка энергетических шкал проводилась по областям энергий, в которых уже проявляются недостатки процедуры определения множественности фотонейтронов, некоторые данные были использованы ошибочно, анализировались сечения реакций не для всех ядер, для которых данные были получены и в Саклэ и в Ливерморе.

Все это делает актуальное проведение более детального исследования ситуации и более корректной и полной совместной обработки результатов КМА-экспериментов, выполненных в

обеих лабораториях, чему, собственно, и посвящена настоящая работа. Полная схема совместной корректировки данных по сечениям парциальных фотонейтронных реакций была реализована для всех 12 ядер работы [6], перечисленных в Таблице 4, а также – дополнительно для 7 ядер  $^{51}\text{V}$ ,  $^{75}\text{As}$ ,  $^{90}\text{Zr}$ ,  $^{116}\text{Sn}$ ,  $^{127}\text{I}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$ , и, тем самым – для большинства ядер, однотипные данные для которых, были получены в обеих лабораториях (Саклэ и Ливерморе).

## 2. Обоснование метода взаимного согласования абсолютных величин КМА- сечений парциальных фотонейтронных реакций, полученных в Саклэ и Ливерморе

### 2.1. Детальный анализ соотношения данных о сечениях парциальных фотонейтронных реакций

С помощью созданной реляционной базы данных по сечениям ядерных реакций [13] были получены все необходимые систематики соответствующих данных по сечениям полных и парциальных фотонейтронных реакций для 19 ядер, которые были затем использованы для исследования соотношений между собой величин сечений одно- и двух-нейтронных реакций, полученных в Ливерморе и Саклэ. С целью более корректного исследования и описания обсуждаемых систематических расхождений КМА-данных, полученных в Саклэ и Ливерморе, их детальный анализ в настоящей работе включал несколько этапов:

- с целью контроля за возможным проявлением расхождений типа тех, которые были отмечены выше (Рис. 3) для случая ядра  $^{75}\text{As}$  во всей исследованной области энергий получались энергетические зависимости отношения

$$R(E) = \sigma_{\text{Саклэ}}(\gamma, xn) / \sigma_{\text{Ливермор}}(\gamma, xn); \quad (4)$$

- на основании систематики (Рис. 2) расхождений данных Ливермора с данными других лабораторий все сечения реакций, полученные в Ливерморе, сдвигались (процедура проводилась итерационно, коэффициент  $R(E)$  рассчитывался каждый раз после перевода обоих сравниваемых сечений на общую шкалу (для чего применялась интерполяция по Гауссу)) к данным Саклэ на величину  $\Delta E$ , такую, чтобы в области энергий от порога реакции  $(\gamma, n)$  до порога  $(B(2n))$  реакции  $(\gamma, 2n)$ , то есть в области, в которой множественность фотонейтронов точно равна 1, коэффициент  $R(E)$  оказывался максимально близким к некоторому постоянному значению;
- после описанной корректировки энергетических шкал (сдвига сечений Ливермора к сечениям Саклэ):

- по данным для реакции  $(\gamma, n)$  вновь в области энергий до порога реакции  $(\gamma, 2n)$  определялся коэффициент

$$R(n) = \sigma_{\text{Саклэ}}^{\text{int}}(\gamma, n) / \sigma_{\text{Ливермор}}^{\text{int}}(\gamma, n), \quad (5)$$

который по условиям определения в области энергий до  $B(2n)$  равен коэффициенту

$$R(xn) = \sigma_{\text{Саклэ}}^{\text{int}}(\gamma, xn) / \sigma_{\text{Ливермор}}^{\text{int}}(\gamma, xn), \quad (6)$$

полностью аналогичному коэффициентам, использованным в работах [6, 22];

- в пересекающихся областях энергии рассчитывался коэффициент

$$R(2n) = \sigma_{\text{Саклэ}}^{\text{int}}(\gamma, 2n) / \sigma_{\text{Ливермор}}^{\text{int}}(\gamma, 2n). \quad (7)$$

Полученные таким образом коэффициенты  $R(n)$  и  $R(2n)$  более корректно, чем это было сделано в работе [6], описывают соотношения между собой сечений одно- и двухнейтронной реакций, определенных в Саклэ и Ливерморе.

Систематика полученных значений коэффициентов  $R(n)$  и  $R(2n)$  для всех 19 исследованных ядер приводится на Рис. 4 и в Таблице 5. Она наглядно подтверждает

отмеченную выше (Таблица 4) драматичность ситуации с соотношениями величин сечений парциальных фотонейтронных реакций с различной множественностью фотонейтронов.

Полученные данные свидетельствуют о том, что для большинства из рассмотренных ядер:

- значения коэффициента  $R(n) = \sigma_{\text{Саклэ}}^{\text{int}}(\gamma, n) / \sigma_{\text{Ливермор}}^{\text{int}}(\gamma, n)$  заметно превосходят значения коэффициента  $R(2n) = \sigma_{\text{Саклэ}}^{\text{int}}(\gamma, 2n) / \sigma_{\text{Ливермор}}^{\text{int}}(\gamma, 2n)$ , что собственно количественно обозначает прямую связь отмеченных выше систематических расхождений с процедурой определения множественности фотонейтронов;
- коэффициенты  $R(n)$  в большинстве случаев имеют значения, большие 1 (приблизительно на 10 – 25 %); это в целом согласуется с систематикой (Рис. 2) значений  $R^{\text{инт}}_{\text{сист}}$ , по определению соответствующих им (другая лаборатория – Саклэ, область интегрирования та же – между порогами реакций  $(\gamma, n)$  и  $(\gamma, 2n)$ );
- коэффициенты  $R(2n)$  в большинстве случаев имеют значения, заметно меньшие 1;
- выделяются несколько случаев, данные для которых не согласуются с общей картиной:
  - для ядер  $^{75}\text{As}$ ,  $^{127}\text{I}$  и  $^{165}\text{Ho}$  выполняется соотношение  $R(2n) > 1$ , то есть отношения для двухнейтронной реакции оказываются в области, «типичной» для одненейтронной реакции;
  - для ядер  $^{124}\text{Sn}$  и  $^{238}\text{U}$  выполняются соотношения  $R(n) < 1$ , то есть отношения для одненейтронной реакции оказываются в области, «типичной» для двухнейтронной реакции; при этом в случае ядра  $^{124}\text{Sn}$  оба коэффициента ( $R(n)$  и  $R(2n)$ ), оставаясь меньше 1, оказываются весьма близки к ней.

Усредненные по данным для всех 19 ядер значения отношений величин интегральных сечений соответствующих реакций, приведенных в Таблице 5, равны соответственно  $\langle R(n) \rangle = 1.09$  и  $\langle R(2n) \rangle = 0.8$ , что в целом согласуется с усредненными для 12 ядер данными работы [6].

Таблица 5 содержит также и другие параметры, использованные при совместной обработке данных – сдвиги по энергии  $\Delta E$  сечений Ливермора к сечениям Саклэ, значения  $B(2n)$  порогов реакции  $(\gamma, 2n)$ , пределы интегрирования сечений, а также – ссылки на соответствующие исходные данные (числовые данные по сечениям реакций для количественной обработки взяты из фондов созданной и описанной выше базы данных по ядерным реакциям [13]).

Таким образом, детальный и корректный анализ данных, выполненный для 19 ядер, (Таблица 5) подтверждает основной вывод работы [6] о связи обнаруженных расхождений данных по сечениям парциальных фотонейтронных реакций, полученных в Саклэ и Ливерморе, с особенностями использованных процедур определения множественности фотонейтронов.

## 2.2. Анализ надежности процедур выделения фотоядерных реакций различной множественности

Поскольку показана [6] прямая зависимость систематических расхождений КМА-сечений парциальных фотонейтронных реакций  $(\gamma, n)$  и  $(\gamma, 2n)$ , полученных в Саклэ и Ливерморе, от корректности использованной процедуры определения множественности образующихся фотонейтронов, представляется целесообразным рассмотреть основные особенности обеих использованных процедур.

При прямой регистрации фотонейтронов, применяемой в обеих лабораториях, вклад в полное сечение фотопоглощения реакций, в которых образуется несколько нейтронов, умножается на соответствующий коэффициент – множественность фотонейтронов. Для того, чтобы разделить вклады реакций с образованием одного, двух, трех (и более) нейтронов необходимо использовать специальные методы.

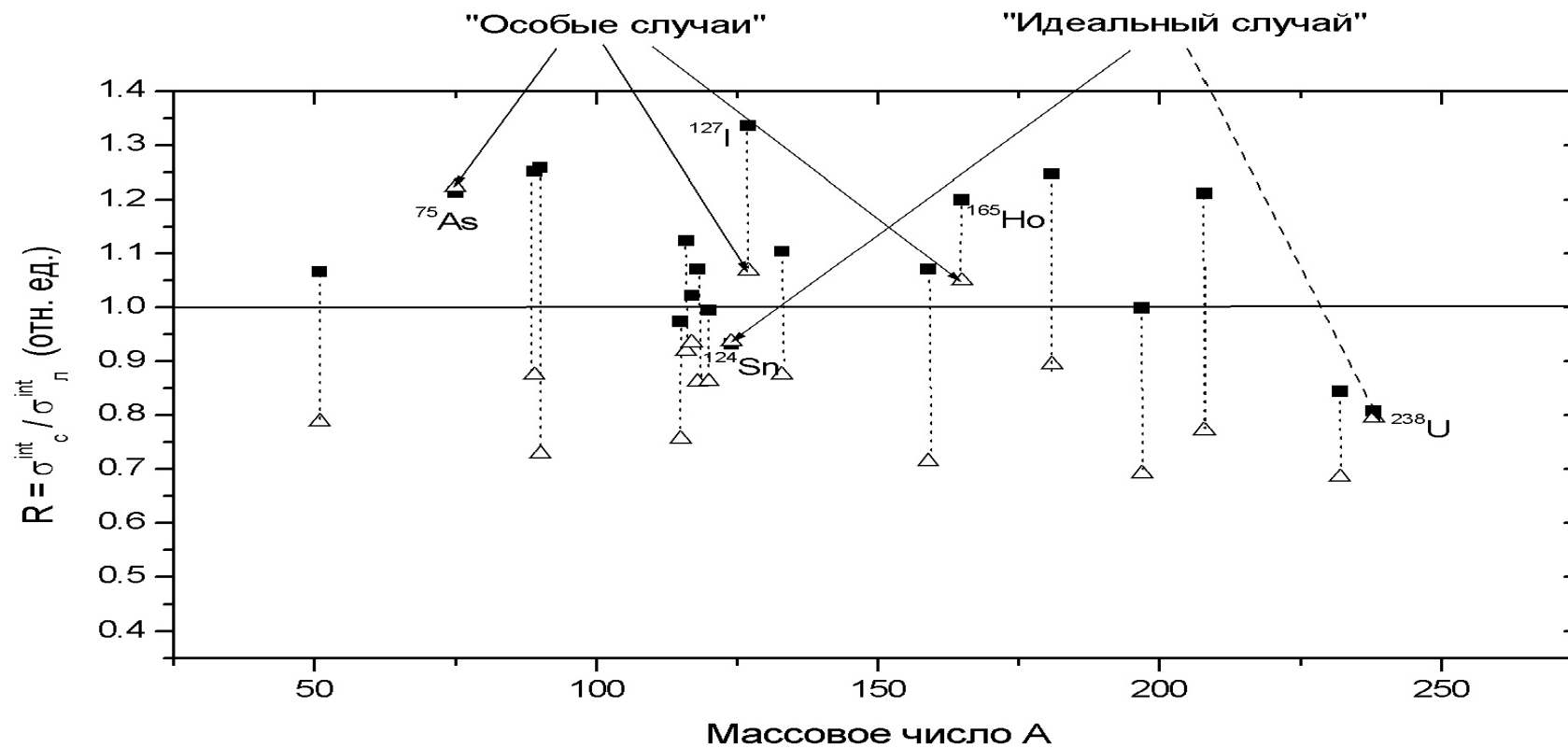


Рис. 4. Систематика значений (Таблица 5) отношений  $R(n) = \sigma_{\text{Саклэ}}^{\text{int}}(\gamma, n) / \sigma_{\text{Ливермор}}^{\text{int}}(\gamma, n)$  – квадраты и  $R(2n) = \sigma_{\text{Саклэ}}^{\text{int}}(\gamma, 2n) / \sigma_{\text{Ливермор}}^{\text{int}}(\gamma, 2n)$  – треугольники, полученных после соответствующей корректировки энергетических шкал для согласованных диапазонов интегрирования по данным экспериментов, выполненных в Саклэ и Ливерморе.

Таблица 5.

Основные данные процедуры сравнения КМА-данных, полученных в Саклэ и Ливерморе ( $E_{\min}^{\text{int}}$  и  $E_{\max}^{\text{int}}$  - соответственно нижний и верхний пределы интегрирования сечений реакций ( $\gamma, 2n$ ))

№ <sub>пп</sub>	Ядро	Сдвиг на $\Delta E$ , МэВ	Порог реакции ( $\gamma, 2n$ ), МэВ	$R(n) = \sigma_{\text{Саклэ}}^{\text{int}}(\gamma, n) / \sigma_{\text{Ливермор}}^{\text{int}}(\gamma, n)$ , отн. ед.	$E_{\min}^{\text{int}}$ , МэВ	$E_{\max}^{\text{int}}$ , МэВ	$R(2n) = \sigma_{\text{Саклэ}}^{\text{int}}(\gamma, 2n) / \sigma_{\text{Ливермор}}^{\text{int}}(\gamma, 2n)$ , отн. ед.
1	$^{51}_{23}\text{V}$	0.2	20.4	[18]/[26] 1.066	20.4	27.78	[18]/[26] 0.788
2	$^{75}_{33}\text{As}$	-0.07	18.2	[24]/[25] 1.214	18.2	26.2	[24]/[25] 1.223
3	$^{89}_{39}\text{Y}$	-0.08	20.8	[27]/[28] 1.252	21.03	27.02	[27]/[28] 0.874
4	$^{90}_{40}\text{Zr}$	-0.2	21.3	[27]/[28] 1.259	21.57	25.93	[27]/[28] 0.728
5	$^{115}_{49}\text{In}$	0.1	16.3	[29]/[30] 0.974	16.46	24.05	[29]/[30] 0.756
6	$^{116}_{50}\text{Sn}$	-0.1	17.1	[29]/[30] 1.103	17.1	22.12	[29]/[30] 0.919
7	$^{117}_{50}\text{Sn}$	-0.04	16.5	[29]/[30] 1.022	16.73	21.06	[29]/[30] 0.934
8	$^{118}_{50}\text{Sn}$	-0.4	16.3	[29]/[30] 1.071	16.3	21.57	[29]/[30] 0.861
9	$^{120}_{50}\text{Sn}$	-0.2	15.6	[29]/[30] 0.995	15.6	22.39	[29]/[30] 0.862
10	$^{124}_{50}\text{Sn}$	0.15	14.4	[29]/[30] 0.932	14.56	21.61	[29]/[30] 0.936
11	$^{127}_{53}\text{I}$	-0.2	16.3	[31]/[32] 1.336	16.3	29.54	[31]/[32] 1.067
12	$^{133}_{55}\text{Cs}$	-0.05	16.2	[29]/[25] 1.104	16.2	24.16	[29]/[25] 0.875
13	$^{159}_{65}\text{Tb}$	-0.3	14.9	[5]/[19] 1.071	14.9	27.99	[5]/[19] 0.714
14	$^{165}_{67}\text{Ho}$	-0.05	14.7	[5]/[33] 1.2	14.7	28.48	[5]/[33] 1.049
15	$^{181}_{73}\text{Ta}$	-0.5	14.2	[5]/[34] 1.247	14.2	24.58	[5]/[34] 0.894
16	$^{197}_{79}\text{Au}$	-0.35	14.7	[35]/[36] 0.999	14.7	24.70	[35]/[36] 0.691
17	$^{208}_{82}\text{Pb}$	-0.2	14.1	[35]/[37] 1.212	14.1	26.33	[35]/[37] 0.771
18	$^{232}_{90}\text{Th}$	-0.05	11.6	[38]/[39] 0.844	11.6	16.33	[38]/[39] 0.685
19	$^{238}_{92}\text{U}$	-0.15	11.3	[38]/[39] 0.762	11.3	18.26	[38]/[39] 0.793

Необходимость разделения вкладов, прежде всего,  $(\gamma, n)$  и  $(\gamma, 2n)$  реакций с учетом того обстоятельства, что эффективность процесса регистрации двух частиц равна квадрату эффективности регистрации одной, потребовала создания специальных  $4\pi$ -нейтронных детекторов, конструкция которых была предназначена для измерения множественности нейтронов. Были разработаны высокоэффективные (40 – 60 %) детекторы замедляющего “slowing-down” типа, в которых нейтроны, образующиеся в течение короткого времени действия импульса  $\gamma$ -квантов ускорителя, замедлялись и регистрировались в период времени между короткими импульсами ускорителя. В качестве детекторов замедленных фотонейтронов использовались  $\text{BF}_3$ -счетчики, выполненные в виде длинных трубок и размещенные в парафине или полиэтилене (Ливермор), а также обогащенный гадолинием жидкий сцинтиллятор большого объема (Саклэ).

**Определение множественности фотонейтронов с помощью метода кольцевых отношений, применявшегося в Ливерморе.** Для разделения вкладов реакций  $(\gamma, n)$ ,  $(\gamma, 2n)$  и  $(\gamma, 3n)$  в Ливерморе высокоэффективный нейтронный детектор был построен таким образом, что имелась возможность регистрации замедленных нейтронов на различных расстояниях от мишени.  $\text{BF}_3$ -счетчики располагались вокруг мишени концентрическими кольцами. Использованный метод кольцевых отношений основан на измерении средней энергии нейтронов и использовании того факта, что отношение числа отсчетов во внутреннем и внешнем кольцах  $\text{BF}_3$ -счетчиков представляет собой монотонно возрастающую функцию этой средней энергии фотонейтронов. Эффективность регистрации нейтронов различных энергий определяется с помощью калиброванных нейтронных источников. Таким образом, с использованием кольцевых отношений средние энергии нейтронов и, соответственно, отношения для событий реакций с одним и двумя нейтронами определяются независимо и достаточно точно. Это позволяет с использованием данных об эффективности регистрации нейтронов различных энергий достаточно точно определять сечения парциальных реакций любой (1, 2, 3) множественности.

**Метод прецизионной калибровки энергетической зависимости эффективности регистрации нейтронов, применявшийся в Саклэ.** Метод, разработанный в Саклэ, основан на прецизионной калибровке Gd-жидкого сцинтиллятора большого объема с помощью источника  $^{252}\text{Cf}$ . Калибровочная кривая используется для определения области, в которой эффективность регистрации практически не зависит от энергии нейтронов. Хотя опубликованная [38] зависимость эффективности детектора от энергии нейтронов фактически ни на одном участке не является константой, было заявлено, что отклонения (существенные) эффективности регистрации от необходимой константы наблюдаются лишь для нейтронов с энергией  $E_n \sim 5$  МэВ. При этом предполагалось, что энергия фотонейтронов в области гигантского резонанса не превосходит значения  $E_n \sim 3$  МэВ. Такое предположение недостаточно обоснованно, поскольку известно, что спектры фотонейтронов из реакций  $(\gamma, n)$  и  $(\gamma, 2n)$  продолжают до значений энергии  $\sim 10$  МэВ. Именно с этим обстоятельством связаны некоторые погрешности в определении абсолютных величин сечений этих реакций, которые будут специально рассмотрены ниже при обсуждении систематик данных, полученных разными методами. Более того, опубликованные по методике сведения свидетельствуют о том, что, в то время как эффективность детектора, определенная с помощью источника  $^{252}\text{Cf}$ , была близка к 1, в реальных экспериментах система детектирования использовалась в таких временных условиях, что достигалась эффективность всего лишь около 0.6.

Очевидным и весьма важным недостатком процедуры определения множественности фотонейтронов, реализованной в Саклэ, который может иметь решающее значение для расхождения получаемых с ее помощью данных с результатами, полученными в Ливерморе, является весьма высокий фон детектора: высокий фон и существенно более плохое, чем в Ливерморе, отношение «сигнал-шум» затрудняют процедуру выделения и вычитания этого фона, а также внесение поправок на случайные совпадения в срабатывании счетчиков. Все это



приводит к очевидному завышению определяемой доли событий однейтронных реакций ( $\gamma, n$ ) по сравнению с событиями реакций с испусканием двух (трех и более нейтронов).

**Общие выводы.** На основании сказанного, может быть сделан вывод о том, что хотя эффективность детектора в Ливерморе в принципе несколько ниже эффективности детектора в Саклэ, применяемый метод кольцевых отношений в значительной степени это недостаток компенсирует. Кроме того, как отмечалось, в конкретных экспериментах эффективность детектора Саклэ была заметно ниже в принципе достигаемого (по тестировке с помощью нейтронного источника) значения. Все сказанное свидетельствует о том, что в то время как к процедуре определения множественности фотонейтронов, использованной в Ливерморе, отсутствуют сколь-нибудь обоснованные претензии, к процедуре, использованной в Саклэ, претензий достаточно много. Безусловно, что в таких условиях вопрос о том, какая именно процедура ошибочна, представляет особый интерес.

В упоминавшейся выше работе [6] КМА-данные для ядра  $^{181}\text{Ta}$ , полученные в Саклэ и Ливерморе, были проанализированы совместно с результатами исследований [39 – 41] на этом ядре реакций ( $e, Tn$ ), ( $e, n$ ) и ( $e, 2n$ ). Поскольку сечения электро- и фоторасщепления ядер могут быть [40, 41] связаны между собой с помощью спектров виртуальных фотонов, имеется возможность по данным для реакции ( $\gamma, 2n$ ) оценить сечение реакции и ( $e, 2n$ ). Экспериментальное сечение реакции  $^{181}\text{Ta}(e, 2n)$  было получено [39] с использованием очевидного соотношения

$$\sigma(e, 2n) = \frac{1}{2}(\sigma(e, xn) - \sigma(e, n)), \quad (8)$$

в котором используются экспериментально определенные  $\sigma(e, xn)$  и  $\sigma(e, n)$ . При этом сечение  $\sigma(e, n)$  измерялось дважды:  $\sigma_1(e, n)$  – с определением множественности нейтронов и  $\sigma_2(e, n)$  – с использованием метода наведенной активности (распад ядра  $^{180}\text{Ta} \rightarrow ^{180}\text{Hf}$ , 93.3 кэВ, Ge-Li детектор). Для средневзвешенного отношения измеренных сечений было получено значение  $\langle \sigma_1(e, n)/\sigma_2(e, n) \rangle = 1.057 \pm 0.023$ . Близость этого отношения к 1 означает надежность использованной процедуры определения множественности фотонейтронов. При этом было показано, что сечение  $\sigma(e, 2n)$  (8) согласуется с данными, пересчитанными из данных по ( $\gamma, 2n$ ) реакции Ливермора, но не согласуется с соответствующими данными Саклэ: данные Саклэ для сечений реакций ( $\gamma, 2n$ ) оказываются заниженными, тогда как для сечений ( $\gamma, n$ ) реакций – напротив завышенными.

Для устранения обсуждаемых расхождений и приведения данных, полученных в обеих лабораториях, в соответствие друг с другом, и был предложен упомянутый выше метод взаимной корректировки данных по сечениям реакции ( $\gamma, 2n$ ).

### 2.3. Метод взаимной корректировки данных по сечениям полных и парциальных фотонейтронных реакций

В соответствии со всем сказанным, для того, данные по сечениям парциальных фотонейтронных реакций, полученные для идентичных реакций на практически полностью аналогичных установках, однако драматически различающиеся между собой вследствие различия использованных процедур определения множественности фотонейтронов (Таблица 5), должны быть специально согласованы.

Для этого необходим метод определения «лишних» вкладов в сечения реакции с множественностью 1 и возвращения их обратно в сечения реакций с множественностью 2. Такой метод взаимной корректировки сечений парциальных фотоядерных реакций ( $\gamma, 2n$ ), полученных на пучках КМА-фотонов в Ливерморе и Саклэ, был предложен в работе [6]. В настоящей работе этот метод доработан и распространен на взаимную корректировку сечений другой парциальной реакции ( $\gamma, n$ ), а также (для нескольких особых случаев) и сечений полной фотонейтронной реакции ( $\gamma, xn$ ).

С учетом того, что было изложено ранее, суть метода взаимной корректировки данных Саклэ и Ливермора его заключается в следующем:

- после соответствующей корректировки энергетических шкал сравниваемых сечений по данным о сечениях реакции  $(\gamma, xn)$  - сдвига сечений, полученных в Ливерморе, на  $\Delta E$  к данным Саклэ - определяется коэффициент  $R = R(xn) = \sigma_{\text{Саклэ}}^{\text{int}}(\gamma, xn) / \sigma_{\text{Ливермор}}^{\text{int}}(\gamma, xn)$  (6), фактически совпадающий с коэффициентом  $R(n)$  (5) и нормирующий между собой сечения полной фотонейтронной реакции в области энергий до  $B(2n)$ ;
- поскольку  $(\gamma, xn) = (\gamma, n) + 2(\gamma, 2n)$ , использование коэффициента  $R$  позволяет получить соотношение, которое используется для обсуждаемого возврата части сечения реакции  $(\gamma, n)$ , полученного в Саклэ, в новое (скорректированное) сечение реакции  $(\gamma, 2n)$ :

$$R = \sigma_{\text{Саклэ}}^{xn} / \sigma_{\text{Ливермор}}^{xn} = (\sigma_{\text{Саклэ}}^n + 2\sigma_{\text{Саклэ}}^{2n}) / (\sigma_{\text{Ливермор}}^n + 2\sigma_{\text{Ливермор}}^{2n}), \quad (9)$$

$$\sigma_{\text{Ливермор}}^{xn} = (\sigma_{\text{Ливермор}}^n + 2\sigma_{\text{Ливермор}}^{2n}) = R \sigma_{\text{Саклэ}}^{xn} = R(\sigma_{\text{Саклэ}}^n + 2\sigma_{\text{Саклэ}}^{2n}) \quad (10)$$

и, следовательно,

$$R \sigma_{\text{Саклэ}}^{2n} = \sigma_{\text{Ливермор}}^{2n} = \sigma_{\text{Ливермор}}^{2n} + \frac{1}{2}(\sigma_{\text{Саклэ}}^n - R \sigma_{\text{Ливермор}}^n). \quad (11)$$

Правая часть соотношения (11) - основного соотношения метода корректировки данных, по сечению реакции  $(\gamma, 2n)$ , полученных в Саклэ - имеет тот самый смысл, который обсуждался выше: к определенному в Саклэ значению  $\sigma_{\text{Саклэ}}^{2n}$  сечения реакции  $(\gamma, 2n)$  добавляется часть  $(\frac{1}{2}(\sigma_{\text{Саклэ}}^n - R \sigma_{\text{Ливермор}}^n))$  сечения реакции  $(\gamma, n)$ , определенная с учетом коэффициента  $R$  по данным о сечениях реакции  $(\gamma, xn)$ . При этом важно отметить, что если расхождение данных Ливермора и Саклэ обусловлено только ошибкой Саклэ в множественности фотонейтронов, то должна выполняться и левая часть соотношения (11): пересчитанное сечение Саклэ  $\sigma_{\text{Саклэ}}^{2n}$  должно согласовываться с сечением Ливермора  $\sigma_{\text{Ливермор}}^{2n}$ , умноженным на коэффициент  $R = R(xn)$  (6).

### 3. Совместная оценка (корректировка) данных по сечениям парциальных фотонейтронных реакций, полученным в Саклэ и Ливерморе

Выше на основе данных, приведенных на Рис. 4 и в Таблице 5, отмечалось, что все исследованные случаи могут быть разделены, по существу, на 3 группы:

- Группу 1 – «стандартная ситуация» - составляют 13 ядер  $^{51}\text{V}$ ,  $^{89}\text{Y}$ ,  $^{115}\text{In}$ ,  $^{116,117,118,120}\text{Sn}$ ,  $^{133}\text{Cs}$ ,  $^{159}\text{Tb}$ ,  $^{181}\text{Ta}$ ,  $^{197}\text{Au}$ ,  $^{208}\text{Pb}$  и  $^{232}\text{Th}$ , для которых наблюдается «стандартное» взаимно обратное соотношение между величинами сечений реакций  $(\gamma, n)$  и  $(\gamma, 2n)$ : коэффициенты  $R(n)$  (5) имеют значения, большие 1, коэффициенты  $R(2n)$  (7) - значения, меньшие 1;
- Группу 2 – «особые случаи»- образуют 4 ядра, для которых обсуждаемые соотношения величин сечений реакций  $(\gamma, n)$  и  $(\gamma, 2n)$  оказываются другими ( $R(2n) > 1$ ) -  $^{75}\text{As}$ ,  $^{127}\text{I}$  и  $^{165}\text{Ho}$ , а также ядро  $^{90}\text{Zr}$  («нестандартное» отношение сечений реакции  $(\gamma, xn)$ ),
- два ядра, также по существу относящихся к «особым случаям» -  $^{124}\text{Sn}$  и  $^{238}\text{U}$  - могут быть выделены в «Группу 3», поскольку для них обоим справедливо соотношение  $R(n) \approx R(2n)$ ; ситуация для ядра  $^{124}\text{Sn}$  ( $R(n) \approx R(2n) \approx 1$ ) может рассматриваться, в некотором смысле, как «идеальная», то есть по существу не требующая обсуждаемой корректировки.

Представляется целесообразным эти три группы ядер рассмотреть отдельно.

Выше было высказано предположение о том, что для одного из ядер Группы 2 -  $^{75}\text{As}$  - «необычно» большая величина сечения реакции  $(\gamma, 2n)$  может быть обусловлена (Рис. 9) проявлением неких дополнительных погрешностей в сечении полной фотонейтронной реакции  $(\gamma, xn)$ . В этой связи для всех четырех ядер Группы 2 целесообразно специально рассмотреть соотношения сечений реакции  $(\gamma, xn)$ .

Результаты, полученные для всех 19 рассмотренных ядер, приводятся в Приложении в порядке сортировки по  $Z$  и  $A$ .

### 3.1. Сечения реакции ( $\gamma, 2n$ )

#### 3.1.1. «Стандартная ситуация»

В соответствии со сказанным выше обработка данных для всех 16 ядер Групп 1 и 3 проводилась в полном соответствии с методом, описанным в разделе 2.3. Обработка данных для ядер этой группы состояла из нескольких этапов.

**Анализ отношений  $R(xn)$ .** Цель анализа энергетической зависимости отношения сечений ( $\gamma, xn$ ) реакции  $R(xn) = \sigma_{\text{Саклэ}}^{\text{int}}(\gamma, xn) / \sigma_{\text{Ливермор}}^{\text{int}}(\gamma, xn)$  (6) заключается в получении подтверждения того, что во всей исследованной энергетической области непосредственно измеряемые в эксперименте результаты в обеих лабораториях различаются лишь нормировкой. Результаты (Рис. 5а, 7а – 14а, 16а, 17а, 19а -23а) для всех 16 ядер Групп 1 и 3 свидетельствуют именно об этом: во всех случаях справедливо соотношение:  $R(xn) \approx R(n) \approx \text{const}$ . При этом конкретные значения определенного коэффициента  $R$  в целом неплохо согласуются с данными соответствующей полной систематики (Рис. 2). Следовательно полученные данные подтверждают рекомендацию [8, 9] по приведению в соответствие данных Ливермора по сечениям полной фотонейтронной реакции с данными других лабораторий – умножение на коэффициент  $r = R_{\text{сист}}^{\text{инт}} = \sigma_{\text{разные лаборатории}}^{\text{int}}(\gamma, xn) / \sigma_{\text{Ливермор}}^{\text{int}}(\gamma, xn)$ , среднее значение для которого, определенное [22] по полной систематике (Рис. 8) равно  $\langle R_{\text{сист}}^{\text{инт}} \rangle = 1.122$ . Однако, в настоящей работе на основании детального анализа конкретной ситуации для каждого исследованного ядра предлагаются более корректные значения коэффициента  $R$  (Рис. 4 и Таблица 5).

**Пересчет данных Саклэ для реакции ( $\gamma, 2n$ ).** Поскольку данные Саклэ и Ливермора по сечениям полной фотонейтронной реакции ( $\gamma, xn$ ) действительно во всей исследованной области энергий различаются лишь нормировкой, в соответствии со сказанным выше данные по сечениям реакции ( $\gamma, 2n$ ), полученные в Саклэ, должны быть скорректированы. Для их корректировки применяется метод, предложенный в работе [6]: с помощью соотношения (11) рассчитывается та доля сечений реакций ( $\gamma, 2n$ ), полученных в Саклэ, которая вследствие погрешности процедуры определения множественности фотонейтронов была ошибочно приписана реакции ( $\gamma, n$ ) и должна, следовательно, быть «возвращена» обратно – в сечение реакции ( $\gamma, 2n$ ). Оцененные (скорректированные) таким образом данные Саклэ  $\sigma_{\text{С}}^*(\gamma, 2n)$  для всех 16 ядер Групп 1 и 3 приведены (точки с ошибками) на Рис. 5в, 7в – 14в, 16в –23в. Для сравнения на каждом из этих рисунков приводятся также исходные (сплошная линия) данные Саклэ ( $\sigma_{\text{С}}(\gamma, 2n)$ ), а также – оцененные (скорректированные) данные Ливермора  $R\sigma_{\text{Л}}(\gamma, 2n)$ . Из приведенных данных хорошо видно, что оцененные данные хорошо согласуются друг с другом. Математическое подтверждение эффективности использованного метода согласования данных приводится в Таблице 6, в которой представлены значения интегральных сечений, рассчитанные в совпадающих пределах интегрирования по соответствующим данным до и после выполненной корректировки.

#### 3.1.2. «Особые случаи»

Выше отмечалось, что ядра  $^{75}\text{As}$ ,  $^{90}\text{Zr}$ ,  $^{127}\text{I}$  и  $^{165}\text{Ho}$  должны быть рассмотрены особо.

**Ядро  $^{75}\text{As}$ .** Для данного ядра коэффициенты  $R(n)$  (7) и  $R(2n)$  (8) имеют значения 1.214 и 1.232 (Таблица 5) соответственно, то есть, что весьма важно, они оба оказываются в области значений, характерных для значений коэффициента  $R(n)$  для ядер основной группы. «Нормальное» значение коэффициента  $R(n)$  и «ненормально большое» значение коэффициента  $R(2n)$  в данном случае означают, что сечения реакции ( $\gamma, xn$ ) «нормально» соотносятся между собой лишь в области энергий до порога  $B(2n)$  реакции ( $\gamma, 2n$ ), однако в области больших

энергий сечение Саклэ «ненормально» превышает сечение Ливермора. Поскольку этот «ненормально» большой вклад нечему больше приписать кроме как сечению реакции  $(\gamma, 2n)$ , то, следовательно, должен быть сделан вывод о том, что сечение Саклэ для этой реакции превышает сечение Ливермора «ненормально». Энергетическая зависимость коэффициента  $R(E)$  (4), приведенная для ядра  $^{75}\text{As}$  на Рис. 6б, свидетельствует именно об этом: соотношения сечений полной фотонейтронной реакции между данными Саклэ и Ливермора для этого ядра оказываются существенно различными в областях энергий ниже и выше порога  $B(2n)$  реакции  $(\gamma, 2n)$ : если в области меньших энергий отношение (4) оказывается приблизительно постоянным, то в области энергий, больших  $B(2n)$ , сечение реакции  $\sigma_c(\gamma, xn)$  существенно возрастает (Рис. 6б) по сравнению с  $\sigma_l(\gamma, xn)$ . Выше в разделе 1.3 отмечалось, что в случае ядра  $^{75}\text{As}$  близость энергии появления дополнительного расхождения к величине  $B(2n)$  порога реакции  $^{75}\text{As}(\gamma, 2n)^{73}\text{As}$ , а также близость величины вклада дополнительного превышения сечения Саклэ над сечением Ливермора к величине сечения реакции  $^{75}\text{As}(\gamma, 2n)^{73}\text{As}$  наводят на размышления о том, что эти расхождения также могут быть каким-то образом связаны с процессами регистрации с множественностью нейтронов, отличной от 1, то есть продуктов, прежде всего, именно указанной реакции  $(\gamma, 2n)$ . Ясно, что описанный выше подход в данном особом случае должен включать в себя еще один этап корректировки исходных сечений реакции  $(\gamma, xn)$ , а именно замену значений коэффициента  $R$  в соотношении (11) на энергетическую зависимость  $R/R(E)$ . Результаты именно такого использования того же самого метода взаимной корректировки сечений как полной, так и обеих парциальных фотонейтронных реакций для ядра  $^{75}\text{As}$  приведены соответственно на Рис. 6а, 6в и 6г и в Таблице 6.

**Ядро  $^{90}\text{Zr}$ .** Наличие мощного максимума (Рис. 8) в отношении  $R(E)$  делают ситуацию в этом ядре в определенном смысле аналогичной ситуации для ядра  $^{75}\text{As}$ .

**Ядро  $^{127}\text{I}$ .** Данный случай с точки зрения предлагаемого метода корректировки полностью аналогичен предыдущему с той лишь разницей, что в отличие от ситуации в для ядра  $^{75}\text{As}$  в области энергий выше порога  $B(2n)$  реакции  $(\gamma, 2n)$  сечение реакции  $\sigma_c(\gamma, xn)$  существенно уменьшается (Рис. 15б) по сравнению с  $\sigma_l(\gamma, xn)$ .

Результаты использования того же самого метода взаимной корректировки сечений как полной, так и обеих парциальных фотонейтронных реакций для ядра  $^{127}\text{I}$  приведены соответственно на Рис. 15а, 15в и 15г. Соответствующие количественные характеристики процедуры корректировки данных по фотонейтронным реакциям для данного особого случая также представлены в Таблице 6.

**Ядро  $^{165}\text{Ho}$ .** Данный случай с точки зрения предлагаемого метода корректировки полностью аналогичен предыдущему (Рис. 18б). Результаты использования того же самого метода взаимной корректировки сечений как полной, так и обеих парциальных фотонейтронных реакций для ядра  $^{165}\text{Ho}$  приведены соответственно на Рис. 18а, 18в и 18г.

Соответствующие характеристики процедуры корректировки данных по фотонейтронным реакциям для данного особого случая также представлены в Таблице 6.

**Ядра  $^{124}\text{Sn}$  и  $^{238}\text{U}$ .** Причина выделения ядер  $^{124}\text{Sn}$  и  $^{238}\text{U}$  в специальную Группу 3 обусловлено тем обстоятельством, что для них коэффициенты  $R(n)$  (5) и  $R(2n)$  (7) имеют очень близкие значения (0.939 и 0.919, 0.765 и 0.793 соответственно). Это означает, что по каким-то причинам в случае ядер  $^{124}\text{Sn}$  и  $^{238}\text{U}$ , в отличие от всех 17 рассмотренных ранее, нормировка данных в Ливерморе близка к нормировке данных в Саклэ, а сортировка данных по множественности выполнена в Саклэ корректно. В качестве возможной причины может быть названа форма энергетического спектра фотонейтронов, допускающая корректную сортировку по множественности и при относительно низкой эффективности детектора. Более того, в случае ядра  $^{124}\text{Sn}$  оба коэффициента  $R(n)$  (5) и  $R(2n)$  (7) оказываются весьма близки к 1. В соответствии со сказанным выше, соотношения  $R(n) \approx (R(2n) \approx 1$  делают случай ядра  $^{124}\text{Sn}$  вообще близким к «идеальному»: обработка с помощью описанного метода не должна приводить к заметной

корректировке данных. Соответствующие данные, приведенные на Рис. 14, 23 и в Таблице 6, полностью подтверждают предлагаемую интерпретацию, что свидетельствует о внутренней согласованности использованного подхода.

Таким образом данные, приведенные в Таблицах 5 и 6, а также представленные на Рис. 5в, 7в – 14в, 16в, 17в, 19в – 23в («стандартная ситуация») и на Рис. 6г, 15г и 18г («особые случаи»), уточняют и существенно дополняют результаты работы [6] для исследованных в ней 12 ядер (Таблица 4). Все они свидетельствуют о том, что с учетом неточностей процедуры определения множественности фотонейтронов, допущенных в Саклэ, данные по реакции  $(\gamma, 2n)$  могут быть скорректированы и приведены в соответствие с данными Ливермора.

### 3.2. Сечения реакции $(\gamma, n)$

Поскольку суть примененного метода взаимной корректировки заключается в возвращении в сечение реакции  $(\gamma, 2n)$  его части, ошибочно приписанной сечению реакции  $(\gamma, n)$ , в дополнение к тому, что было сделано в работе [6], могут быть скорректированы и сечения реакции  $(\gamma, n)$ , полученные в Саклэ. Для этого из сечения реакции  $(\gamma, n)$  должна быть удалена та ошибочно приписанная ему часть, которая перемещается (11) в сечение реакции  $(\gamma, 2n)$ .

Скорректированное сечение реакции  $(\gamma, n)$  должно (11) выглядеть следующим образом

$$R\sigma_{\text{Л}}^n = \sigma_{\text{С}}^{n*} = \sigma_{\text{С}}^n - (\sigma_{\text{С}}^n - R\sigma_{\text{Л}}^n), \quad (12)$$

где разность  $(\sigma_{\text{С}}^n - R\sigma_{\text{Л}}^n)$ , рассчитывается в области энергий, больших  $B(2n)$ .

Скорректированные  $(\sigma_{\text{С}}^{n*}(\gamma, n))$  данные Саклэ вместе с исходными сечениями для всех 19 исследованных ядер приведены на 5б, 7б – 14б, 16б, 17б, 19б – 23б («стандартная ситуация») и Рис. 6в, 15в и 18в («особые случаи»). Для сравнения на каждом рисунке для «стандартной ситуации» приводятся также исходные данные Саклэ  $(\sigma_{\text{С}}(\gamma, n))$  и оцененные  $(R\sigma_{\text{Л}}(\gamma, n))$  данные Ливермора. Хорошо видно, что оцененные данные хорошо согласуются друг с другом, что подтверждается данными Таблицы 6, в которой приведены данные по интегральным сечениям в совпадающих пределах интегрирования взаимно скорректированных сечений реакций  $(\gamma, xn)$ ,  $(\gamma, n)$  и  $(\gamma, 2n)$ , полученных в Саклэ и Ливерморе.

Следует особо отметить, что в случаях ядер  $^{118,120}\text{Sn}$ ,  $^{181}\text{Ta}$ ,  $^{197}\text{Au}$  и  $^{208}\text{Pb}$  (Рис. 12, 13, 19 – 21) корректировки энергетических шкал (смещения на  $\Delta E$ ) привели к заметным расхождениям в области порога  $B(2n)$  и, как следствие, к появлению скачков в скорректированных сечениях. В этих случаях скорректированные сечения не могут использоваться как оцененные.

Наглядное представление о результатах применения метода взаимной корректировки данных дает Таблица 7, в которой частично повторены данные Таблицы 4. Отчетливо видно, что: вместо взаимно противоположного значительного рассогласования исходных сечений реакций  $(\gamma, n)$  и  $(\gamma, 2n)$ , также как и  $(\gamma, xn)$ , скорректированные данные Саклэ и Ливермора в пределах погрешностей хорошо согласуются друг с другом. Столь же близкими к 1 оказываются и соответствующие отношения «После» для семи ядер  $^{51}\text{V}$ ,  $^{75}\text{As}$ ,  $^{90}\text{Zr}$ ,  $^{116}\text{Sn}$ ,  $^{127}\text{I}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$ , исследованных дополнительно.

### 3.3. Сечения реакции $(\gamma, xn)$

Сечения реакций  $(\gamma, xn)$ , полученных в Саклэ для ядер Группы 2 («особые случаи»)  $^{75}\text{As}$ ,  $^{127}\text{I}$  и  $^{165}\text{Ho}$ , скорректированные описанным выше способом, приведены на Рис. 6а, 15а и 18а, а их интегральные сечения в совпадающих пределах интегрирования, также представлены в Таблице 6.

Интегральные сечения, рассчитанные для всех оцененных в настоящей работе сечений реакций  $(\gamma, xn)$ ,  $(\gamma, n)$  и  $(\gamma, 2n)$  на всех 19 исследованных ядрах приведены в Таблице 8.

Таблица 6

Величины интегральных сечений взаимно скорректированных сечений реакций  $(\gamma, xn)$ ,  $(\gamma, n)$  и  $(\gamma, 2n)$  в совпадающих пределах интегрирования.

№ <sub>пп</sub>	Ядро	$\sigma^{\text{int}}_{\text{с}}, (\text{Саклэ})$			$\sigma^{\text{int}}_{\text{л}}, (\text{Ливермор})$		
		Реакции					
		$(\gamma, \text{xn})$	$(\gamma, \text{n})$	$(\gamma, 2\text{n})$	$(\gamma, 2\text{n})$	$(\gamma, \text{n})$	$(\gamma, \text{xn})$
1	$^{51}\text{V}$	$643 \pm 2$	$469 \pm 3$	$104 \pm 3$	$106 \pm 2$	$469 \pm 3$	$639 \pm 4$
2	$^{75}\text{As}$	$1248 \pm 6$	$809 \pm 2$	$242 \pm 3$	$239 \pm 2$	$808 \pm 2$	$1188 \pm 3$
3	$^{89}\text{Y}$	$1428 \pm 3$	$1205 \pm 3$	$113 \pm 3$	$107 \pm 1$	$1206 \pm 3$	$1416 \pm 6$
4	$^{90}\text{Zr}$	$1371 \pm 3$	$1128 \pm 2$	$92 \pm 2$	$88 \pm 1$	$1211 \pm 2$	$1454 \pm 4$
5	$^{115}\text{In}$	$1857 \pm 3$	$1298 \pm 3$	$365 \pm 3$	$358 \pm 1$	$1298 \pm 3$	$1865 \pm 4$
6	$^{116}\text{Sn}$	$1661 \pm 3$	$1359 \pm 4$	$234 \pm 4$	$238 \pm 1$	$1359 \pm 5$	$1706 \pm 5$
7	$^{117}\text{Sn}$	$1688 \pm 4$	$1262 \pm 2$	$234 \pm 3$	$244 \pm 1$	$1261 \pm 2$	$1719 \pm 3$
8	$^{118}\text{Sn}$	$1820 \pm 3$	$1281 \pm 2$	$299 \pm 2$	$320 \pm 1$	$1281 \pm 2$	$1878 \pm 2$
9	$^{120}\text{Sn}$	$2123 \pm 3$	$1283 \pm 2$	$444 \pm 2$	$460 \pm 1$	$1282 \pm 2$	$2161 \pm 2$
10	$^{124}\text{Sn}$	$1991 \pm 4$	$1043 \pm 3$	$511 \pm 4$	$503 \pm 1$	$1042 \pm 3$	$1962 \pm 4$
11	$^{127}\text{I}$	$2363 \pm 6$	$1568 \pm 6$	$342 \pm 7$	$347 \pm 2$	$1568 \pm 5$	$2585 \pm 10$
12	$^{133}\text{Cs}$	$2464 \pm 3$	$1620 \pm 3$	$432 \pm 3$	$414 \pm 2$	$1618 \pm 4$	$2444 \pm 9$
13	$^{159}\text{Tb}$	$3157 \pm 16$	$1485 \pm 10$	$634 \pm 7$	$676 \pm 3$	$1485 \pm 10$	$3380 \pm 19$
14	$^{165}\text{Ho}$	$3663 \pm 12$	$1954 \pm 5$	$848 \pm 7$	$839 \pm 3$	$1954 \pm 5$	$3714 \pm 8$
15	$^{181}\text{Ta}$	$3599 \pm 13$	$1616 \pm 6$	$520 \pm 7$	$560 \pm 6$	$1616 \pm 7$	$3704 \pm 33$
16	$^{197}\text{Au}$	$3548 \pm 7$	$2145 \pm 7$	$367 \pm 7$	$345 \pm 3$	$2142 \pm 9$	$3549 \pm 22$
17	$^{208}\text{Pb}$	$3257 \pm 5$	$2275 \pm 12$	$611 \pm 16$	$626 \pm 6$	$2274 \pm 12$	$3161 \pm 12$
18	$^{232}\text{Th}$	$3668 \pm 20$	$1309 \pm 7$	$908 \pm 10$	$969 \pm 2$	$1305 \pm 4$	$3902 \pm 6$
19	$^{238}\text{U}$	$4614 \pm 31$	$863 \pm 3$	$966 \pm 6$	$855 \pm 3$	$855 \pm 3$	$5481 \pm 9$

Таблица 7.

Интегральные сечения парциальных фотонейтронных реакций ( $\gamma, n$ ) и ( $\gamma, 2n$ ), полученных в Саклэ и Ливерморе, до (по данным работы [6]) и после их взаимной корректировки

Ядро	$\sigma_{\text{с}}^{\text{инт}}(\gamma, n)/\sigma_{\text{л}}^{\text{инт}}(\gamma, n)$ , оба – МэВ*мб		$\sigma_{\text{с}}^{\text{инт}}(\gamma, 2n)/\sigma_{\text{л}}^{\text{инт}}(\gamma, 2n)$ , оба – МэВ*мб	
	До [6]	После	До [6]	После
$^{89}\text{Y}$	1279/960 = 1.33	1205.3/1206.1 = 1.00	74/99 = 0.75	112.6/107.3 = 1.05
$^{115}\text{In}$	1470/1354 = 1.09	1298.0/1298.2 = 1.00	278/508 = 0.55	364.6/358.3 = 1.02
$^{117}\text{Sn}$	1334/1380 = 0.97	1261.6/1261.4 = 1.00	220/476 = 0.46	234.1/243.6 = 0.96
$^{118}\text{Sn}$	1377/1302 = 1.06	1281.3/1281.4 = 1.00	258/531 = 0.49	298.9/320.4 = 0.93
$^{120}\text{Sn}$	1371/1389 = 0.99	1282.7/1282.6 = 1.00	399/673 = 0.59	444.5/460.2 = 0.97
$^{124}\text{Sn}$	1056/1285 = 0.82	1042.5/1042.4 = 1.00	502/670 = 0.75	511.5/502.6 = 1.02
$^{133}\text{Cs}$	1828/1475 = 1.24	1619.5/1618.5 = 1.00	328/503 = 0.65	431.8/413.7 = 1.04
$^{159}\text{Tb}$	1936/1413 = 1.37	1485.3/1485.4 = 1.00	605/887 = 0.68	633.9/675.7 = 0.94
$^{165}\text{Ho}$	2090/1735 = 1.20	2040.7/2040.7 = 1.00	766/744 = 1.03	825.6/803.4 = 1.03
$^{181}\text{Ta}$	2180/1300 = 1.68	1616.4/1615.7 = 1.00	790/881 = 0.90	520.1/559.9 = 0.93
$^{197}\text{Au}$	2588/2190 = 1.18	2144.6/2142.4 = 1.00	479/777 = 0.62	367.0/345.0 = 1.06
$^{208}\text{Pb}$	2731/1776 = 1.54	2274.5/2273.8 = 1.00	328/860 = 0.38	611.0/626.0 = 0.98

## Заключение

Основные утверждения и рекомендации, которые могут быть сделаны на основании выполненных исследований и полученных результатов, заключаются в следующем.

1. Экспериментальные данные по сечениям полной фотонейтронной реакции ( $\gamma, xn$ ), полученные в Ливерморе, расходятся с данными других лабораторий. Их согласие с большинством данных достигается путем дополнительной нормировки с помощью коэффициентов  $R = R(xn)$  (6). Для исследованных в настоящей работе 19 ядер ( $^{51}\text{V}$ ,  $^{75}\text{As}$ ,  $^{89}\text{Y}$ ,  $^{90}\text{Zr}$ ,  $^{115}\text{In}$ ,  $^{116,117,118,120,124}\text{Sn}$ ,  $^{127}\text{I}$ ,  $^{133}\text{Cs}$ ,  $^{159}\text{Tb}$ ,  $^{165}\text{Ho}$ ,  $^{181}\text{Ta}$ ,  $^{197}\text{Au}$ ,  $^{208}\text{Pb}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$ ) оцененные сечения реакции ( $\gamma, xn$ ) получены с использованием данных Таблицы 5. В других случаях без дополнительных исследований может использоваться коэффициент  $\langle R^{\text{инт}}_{\text{сист}} \rangle = 1.122$ , полученный [22] на основе данных большой систематики.
2. Экспериментальные данные по сечениям парциальных фотонейтронных реакций ( $\gamma, n$ ) и ( $\gamma, 2n$ ), полученные в Ливерморе, корректно согласуются между собой и с данными по сечениям полной фотонейтронной реакции ( $\gamma, xn$ ). Следовательно по ним оцененные сечения могут быть также получены путем простой нормировки с использованием тех же значений  $R$  (или  $\langle R^{\text{инт}}_{\text{сист}} \rangle$ ).
3. Экспериментальные данные по сечениям полной фотонейтронной реакции ( $\gamma, xn$ ), полученные в Саклэ, согласуются с данными других лабораторий и могут использоваться как оцененные без дополнительной нормировки.
4. Экспериментальные данные по сечениям парциальных фотонейтронных реакций ( $\gamma, n$ ) и ( $\gamma, 2n$ ), полученные в Саклэ, определены некорректно и должны быть пересчитаны с помощью предложенного метода совместной корректировки. Использование описанного выше метода приводит к согласованию между собой (Таблицы 6 и 7) данных, полученных в Саклэ и Ливерморе, по сечениям парциальных реакций ( $\gamma, n$ ) и ( $\gamma, 2n$ ). Это согласование достигается увеличением сечений двухнейтронных реакций за счет уменьшения в области энергий выше порога  $B(2n)$  сечений одонейтронных реакций, полученных в Саклэ. Следует

особо подчеркнуть, что для обеих реакций после такой корректировки данные Саклэ согласуются с соответствующими данными Ливермора, домноженными на коэффициент R.

5. Уменьшение в согласии с данными Ливермора в области энергий выше порога  $V(2n)$  сечений однейтронной реакции, полученных в Саклэ, делает сомнительной предложенную [5, 31, 34, 42] интерпретацию высокоэнергетичных «хвостов» таких сечений как следствий проявлений вкладов быстрых нейтронов (нестатистических процессов). То, что сечения однейтронной реакции, полученные в Саклэ, не спадают до 0 в области энергий на  $\sim 2$  МэВ выше порога двухнейтронной реакции  $V(2n)$ , как это должно быть в соответствии с предсказаниями статистической модели, и приводило к весьма высокой ( $\sim 25\%$ ) оценке доли нестатистических процессов в сечении реакции  $(\gamma, n)$ . В свете выполненных исследований доля нестатистической компоненты ГДР не превышает 10%, а следовательно распад ГДР происходит преимущественно статистически. Очевидно, что подобное обстоятельство требует существенной корректировки и полученных в Саклэ позднее с использованием данных о фотонейтронных реакциях данных о сечениях реакции полного фотопоглощения.
6. В свете сказанного несомненно представляет интерес сравнение скорректированных и согласованных данных Саклэ и Ливермора по сечениям парциальных фотонейтронных реакций, прежде всего, по существенно изменившимся сечениям реакции  $(\gamma, 2n)$ , с результатами исследований, выполненных другими методами. К сожалению, такое сравнение является весьма непростой задачей:
  - число случаев пересечения данных по реакции  $(\gamma, 2n)$ , полученных в Саклэ и Ливермора с какими-то другими данными весьма мало;
  - единичные сечения реакции  $(\gamma, 2n)$ , полученные на ТИ-пучках с использованием метода наведенной активности (аналогичные данные по реакции  $(\gamma, n)$  не могут использоваться прямо, поскольку применительно к данным Саклэ и Ливермора речь идет по существу о сечениях реакций  $([\gamma, n] + (\gamma, np)])$  имеют погрешности, в еще большей степени превосходящие масштаб рассогласования исходных данных Саклэ и Ливермора.



Таблица 8.

Интегральные сечения,  
 рассчитанные для оцененных (взаимно скорректированных)  
 сечений фотонейтронных реакций, полученных в Саклэ и Ливерморе  
 (под реакцией  $(\gamma, n)$  фактически понимается реакция  $(\gamma, n) + (\gamma, np)$ )

№ <sub>пп</sub>	Ядро	Реакция	Порог, МэВ	Лаб.	$E_{\text{мин}}^{\text{int}}$ , МэВ	$E_{\text{макс}}^{\text{int}}$ , МэВ	$\sigma^{\text{int}}$ МэВ*мб	$\Delta\sigma^{\text{int}}$ , МэВ*мб
1	$^{51}\text{V}$	$(\gamma, xn)$		С	13.21	27.84	678.4	2.3
				Л	10.26	27.78	693.9	4.4
		$(\gamma, n)$	11.3	С	13.21	27.78	468.8	3.0
				Л	10.26	27.78	480.3	3.2
		$(\gamma, 2n)$	20.4	С	20.4	27.84	104.4	3.1
				Л	20.4	28.78	105.7	1.8
2	$^{75}\text{As}$	$(\gamma, xn)$		С	9.92	26.18	1312.9	6.0
				Л	10.03	29.54	1377.1	5.2
		$(\gamma, n)$	10.2	С	9.92	26.18	809.2	2.0
				Л	10.03	29.54	834.8	2.2
		$(\gamma, 2n)$	18.2	С	18.2	26.18	242.2	3.0
				Л	18.2	29.54	301.4	3.0
3	$^{89}\text{Y}$	$(\gamma, xn)$		С	10.95	27.02	1429.0	3.1
				Л	11.27	27.99	1451.4	6.1
		$(\gamma, n)$	11.5	С	10.95	27.02	1206.7	3.5
				Л	11.27	28.1	1205.6	4.2
		$(\gamma, 2n)$	20.8	С	20.8	27.02	112.6	3.1
				Л	20.8	27.99	124.6	1.4
4	$^{90}\text{Zr}$	$(\gamma, xn)$		С	12.17	25.93	1306.3	2.0
				Л	12.12	27.60	1466.4	4.2
		$(\gamma, n)$	12.0	С	12.17	25.93	1127.7	1.9
				Л	12.12	27.60	1213.6	2.4
		$(\gamma, 2n)$	21.3	С	21.57	25.93	91.7	1.8
				Л	21.57	27.60	125.7	1.5
5	$^{115}\text{In}$	$(\gamma, xn)$		С	8.87	24.05	2025.4	3.3
				Л	9.10	31.09	2347.1	10.1
		$(\gamma, n)$	9.0	С	8.87	24.05	1321.2	5.5
				Л	9.10	31.09	1320.6	5.5
		$(\gamma, 2n)$	16.3	С	16.46	24.05	364.6	3.1
				Л	16.3	31.09	493.6	3.5
6	$^{116}\text{Sn}$	$(\gamma, xn)$		С	9.45	22.12	1834.5	3.0
				Л	9.63	29.61	2345.2	10.2
		$(\gamma, n)$	9.6	С	9.45	22.12	1361.7	4.3
				Л	9.63	29.61	1417.9	10.7
		$(\gamma, 2n)$	17.1	С	17.1	22.12	234.1	3.7
				Л	17.1	29.61	462.3	3.0
7	$^{117}\text{Sn}$	$(\gamma, xn)$		С	8.87	21.06	3022.2	4.3
				Л	9.72	31.09	2462.4	12.3
		$(\gamma, n)$	6.9	С	8.87	21.06	1283.9	2.2
				Л	9.72	31.09	1379.9	6.4
		$(\gamma, 2n)$	16.5	С	16.73	21.06	232.8	2.7

№ <sub>пп</sub>	Ядро	Реакция	Порог, МэВ	Л Лаб.	16.5 $E_{\text{мин}}^{\text{int}}$ , МэВ	31.09 $E_{\text{макс}}^{\text{int}}$ , МэВ	484.6 $\sigma^{\text{int}}$ МэВ*мб	4.6 $\Delta\sigma^{\text{int}}$ , МэВ*мб
8	$^{118}\text{Sn}$	$(\gamma, \text{xn})$		С	10.13	21.57	1896.5	3.1
				Л	9.1	30.78	2606.5	11.3
		$(\gamma, \text{n})$	9.3	С	оценка данных затруднена			
				Л	9.3	30.78	1404.4	5.5
		$(\gamma, 2\text{n})$	16.3	С	16.3	21.57	298.9	2.2
				Л	16.3	30.78	557.4	4.2
9	$^{120}\text{Sn}$	$(\gamma, \text{xn})$		С	9.04	22.39	2174.3	3.4
				Л	8.94	29.85	2772.4	6.7
		$(\gamma, \text{n})$	9.1	С	оценка данных затруднена			
				Л	9.10	29.85	1372.5	3.7
		$(\gamma, 2\text{n})$	15.6	С	15.60	22.39	444.5	2.5
				Л	15.60	29.85	668.8	2.7
10	$^{124}\text{Sn}$	$(\gamma, \text{xn})$		С	9.41	21.61	2053.3	4.5
				Л	8.48	31.09	2606.0	11.7
		$(\gamma, \text{n})$	8.5	С	9.41	21.61	1043.7	2.9
				Л	8.50	31.09	1210.9	6.1
		$(\gamma, 2\text{n})$	14.4	С	14.56	21.61	506.8	3.8
				Л	14.40	31.09	621.2	4.3
11	$^{127}\text{I}$	$(\gamma, \text{xn})$		С	8.89	24.89	2387.2	6.3
				Л	8.79	29.54	2905.9	17.5
		$(\gamma, \text{n})$	9.1	С	9.1	22.49	1562.6	5.5
				Л	9.1	29.54	1763.4	11.5
		$(\gamma, 2\text{n})$	16.3	С	16.3	31.2	359.8	19.1
				Л	16.3	29.54	479.1	5.8
12	$^{133}\text{Cs}$	$(\gamma, \text{xn})$		С	9.18	24.16	2474.4	2.6
				Л	9.1	29.54	2465.0	8.9
		$(\gamma, \text{n})$	9.0	С	9.18	24.16	1619.5	3.3
				Л	9.1	29.54	1623.8	6.4
		$(\gamma, 2\text{n})$	16.2	С	16.2	24.16	431.8	2.7
				Л	16.2	29.54	556.0	3.8
13	$^{159}\text{Tb}$	$(\gamma, \text{xn})$		С	7.8	27.39	3192.2	16.5
				Л	8.63	27.99	3421.4	21.4
		$(\gamma, \text{n})$	8.1	С	8.1	26.03	1497.2	9.9
				Л	8.63	26.13	1482.6	10.2
		$(\gamma, 2\text{n})$	14.9	С	14.9	28.48	867.4	13.6
				Л	14.9	27.99	960.1	5.5
14	$^{165}\text{Ho}$	$(\gamma, \text{xn})$		С	7.26	26.84	3669.3	12.3
				Л	8.17	28.92	4038.9	10.4
		$(\gamma, \text{n})$	8.0	С	8.0	26.84	2044.8	5.2
				Л	8.17	28.92	2040.7	5.0
		$(\gamma, 2\text{n})$	14.7	С	14.7	28.48	812.3	8.5
				Л	14.7	28.92	811.0	3.5
15	$^{181}\text{Ta}$	$(\gamma, \text{xn})$		С	7.26	25.21	3803.5	15.0
				Л	8.17	24.58	3832.3	34.9
		$(\gamma, \text{n})$	7.6	С	оценка данных затруднена			
				Л	8.17	17.46	1615.7	6.8
		$(\gamma, 2\text{n})$	14.2	С	14.2	26.57	1092.5	16.7
				Л	14.2	26.57	1092.5	16.7

				Л	14.2	24.58	1084.7	13.0
№ <sub>пп</sub>	Ядро	Реакция	Порог, МэВ	Лаб.	$E_{\text{мин}}^{\text{int}}$ , МэВ	$E_{\text{макс}}^{\text{int}}$ , МэВ	$\sigma^{\text{int}}$ МэВ*мб	$\Delta\sigma^{\text{int}}$ , МэВ*мб
16	$^{197}\text{Au}$	$(\gamma, \text{xn})$		С	8.08	21.68	3558.8	6.7
				Л	8.72	24.70	3765.8	28.1
		$(\gamma, \text{n})$	8.1	С	оценка данных затруднена			
				Л	8.72	17.94	2142.5	9.0
		$(\gamma, 2\text{n})$	14.7	С	14.7	27.12	952.6	19.6
				Л	14.7	24.7	774.0	9.2
17	$^{208}\text{Pb}$	$(\gamma, \text{xn})$		С	7.5	20.8	3643.6	6.3
				Л	8.48	26.44	4310.1	33.1
		$(\gamma, \text{n})$	7.4	С	оценка данных затруднена			
				Л	8.48	26.44	2441.3	23.1
		$(\gamma, 2\text{n})$	14.1	С	14.1	20.85	660.7	12.8
				Л	14.1	26.44	1055.0	12.7
18	$^{232}\text{Th}$	$(\gamma, \text{xn})$		С	9.28	16.33	3902.1	6.3
				Л	5.27	18.26	4763.0	9.0
		$(\gamma, \text{n})$	6.4	С	9.28	16.33	1275.6	6.3
				Л	6.4	18.26	1431.9	3.9
		$(\gamma, 2\text{n})$	11.6	С	11.6	16.33	908.4	10
				Л	11.6	18.26	1210.7	2.1
19	$^{238}\text{U}$	$(\gamma, \text{xn})$		С	7.8	18.30	4812.8	31.8
				Л	5.27	18.26	5748.5	9.2
		$(\gamma, \text{n})$	6.2	С	7.8	18.26	1009.8	3.7
				Л	6.2	18.26	1047.3	3.2
		$(\gamma, 2\text{n})$	11.3	С	11.3	18.35	971.6	6.3
				Л	11.3	18.26	854.8	2.4

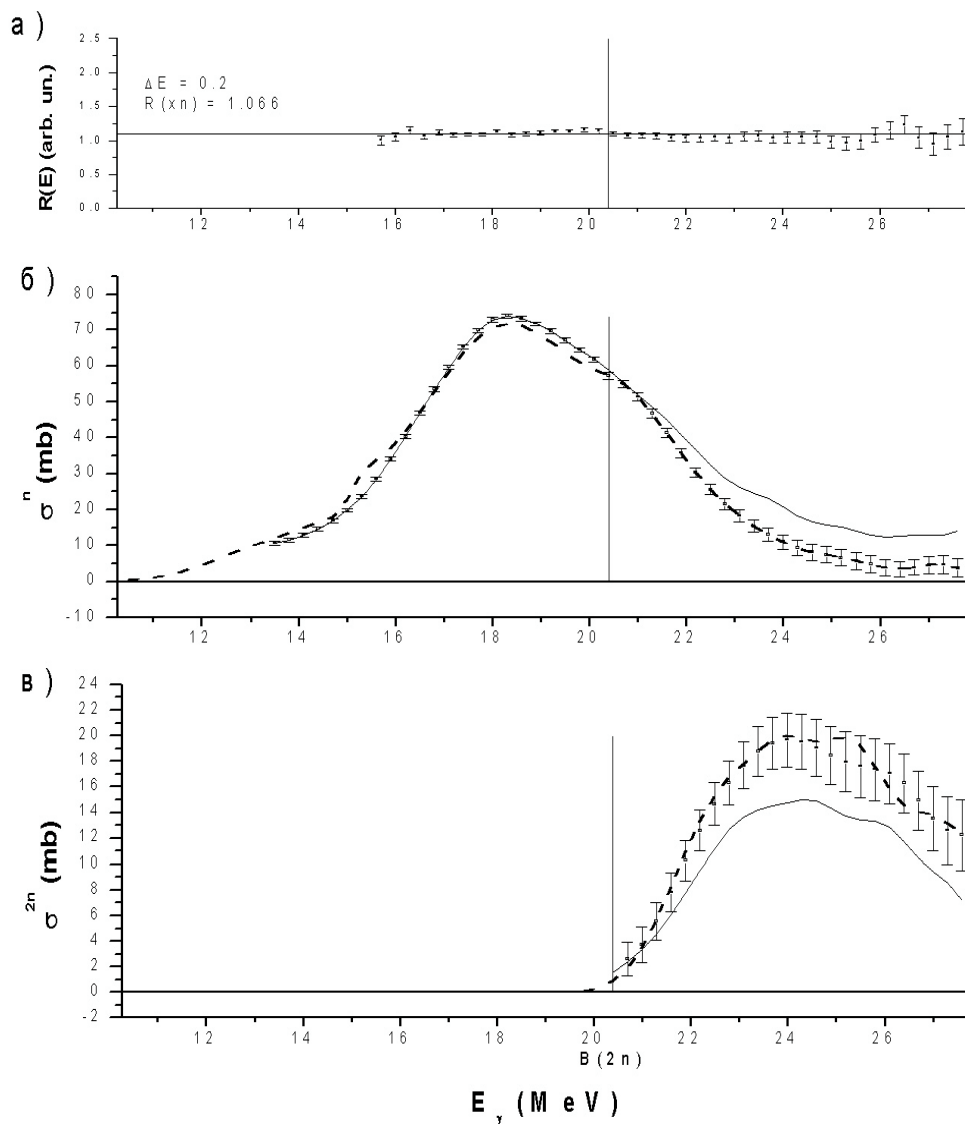


Рис. 5. Результаты взаимной корректировки («стандартная ситуация») сечений полной и парциальных фотонейтронных реакций для ядра  $^{51}\text{V}$ , полученных в Саклэ и Ливерморе:

- отношения  $R(E)$  сечений  $(\gamma, xn)$  реакции; указаны значения  $\Delta E$  и  $R(xn)$ ;
- данные для сечений реакций  $(\gamma, n)$ :
  - сплошная линия – исходные данные Саклэ  $\sigma^n_{\text{С}}$ ;
  - точки с ошибками – **оцененные** данные (12) Саклэ  $\sigma^n_{\text{С}}^*$ ;
  - пунктир – **оцененные** данные Ливермора  $R\sigma^n_{\text{Л}}$ ;
- данные для сечений реакций  $(\gamma, 2n)$ :
  - сплошная линия – исходные данные Саклэ  $\sigma^{2n}_{\text{С}}$ ;
  - точки с ошибками – **оцененные** данные ((9) – (11)) Саклэ  $\sigma^{2n}_{\text{С}}^*$ ;
  - пунктир – **оцененные** данные Ливермора  $R\sigma^{2n}_{\text{Л}}$ .

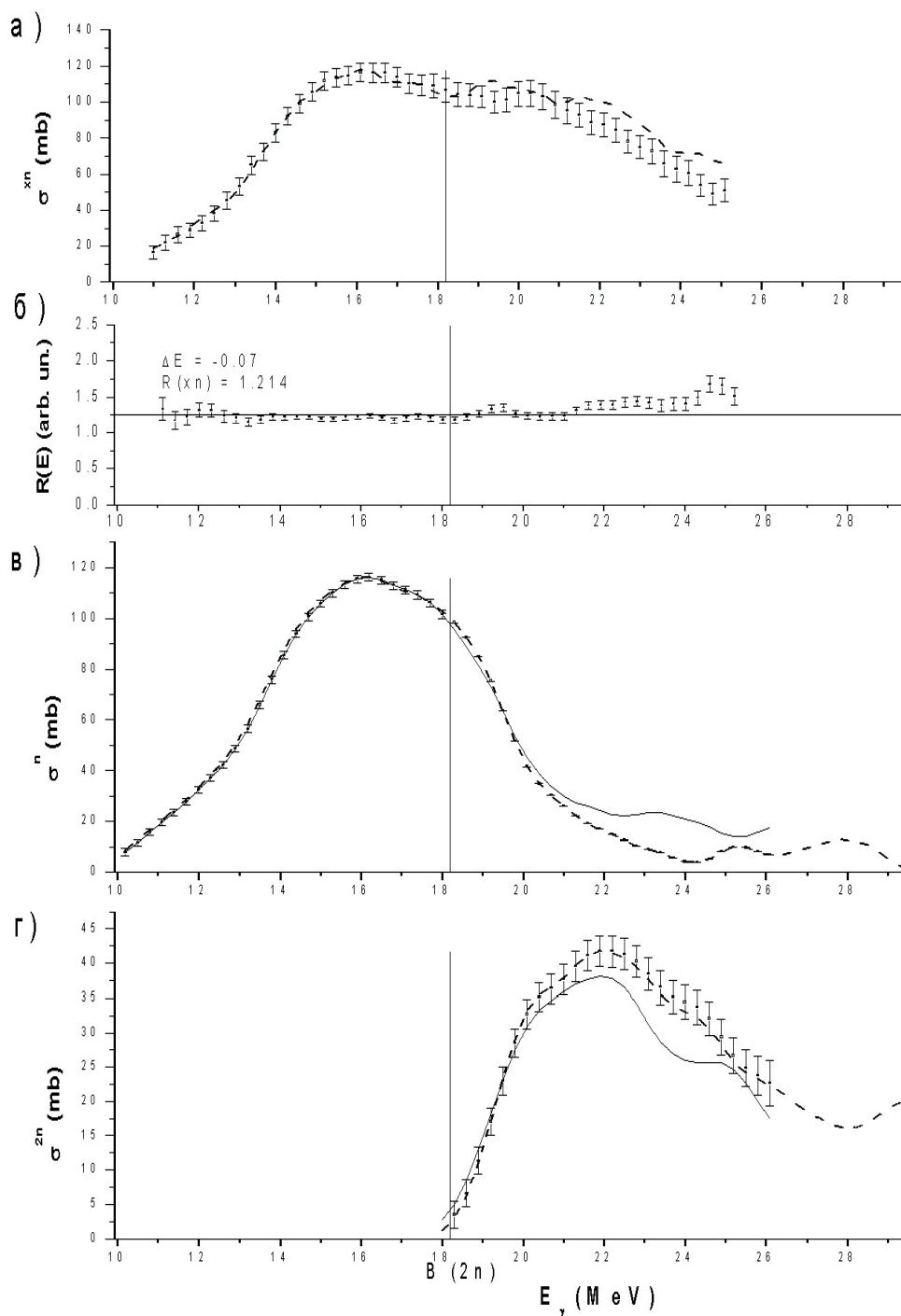


Рис. 6. Результаты взаимной корректировки («особый случай») сечений реакций, полученных в Саклэ и Ливерморе для ядра  $^{75}\text{As}$ :

- а) данные Саклэ (пунктир – исходные  $\sigma^{xn}_C$ , точки с ошибками – скорректированные  $\sigma^{xn}_C = \sigma^{xn}_C R/R(E)$ ) по сечениям реакции  $(\gamma, xn)$ ;
- б) отношения  $R(E)$  сечений  $(\gamma, xn)$  реакции; указаны значения  $\Delta E$  и  $R(xn)$ ;
- в) данные для сечений реакций  $(\gamma, n)$ : сплошная линия – исходные данные Саклэ  $\sigma^n_C$ , точки с ошибками – **оцененные** (12) данные Саклэ  $\sigma^n_C$ , пунктир – **оцененные** данные Ливермора  $R\sigma^n_L$ ;
- г) данные для сечений реакций  $(\gamma, 2n)$ : сплошная линия – исходные данные Саклэ  $\sigma^{2n}_C$ , точки с ошибками – **оцененные** ((9) – (11)) данные Саклэ  $\sigma^{2n}_C$ , пунктир – **оцененные** данные Ливермора  $R\sigma^{2n}_L$ .



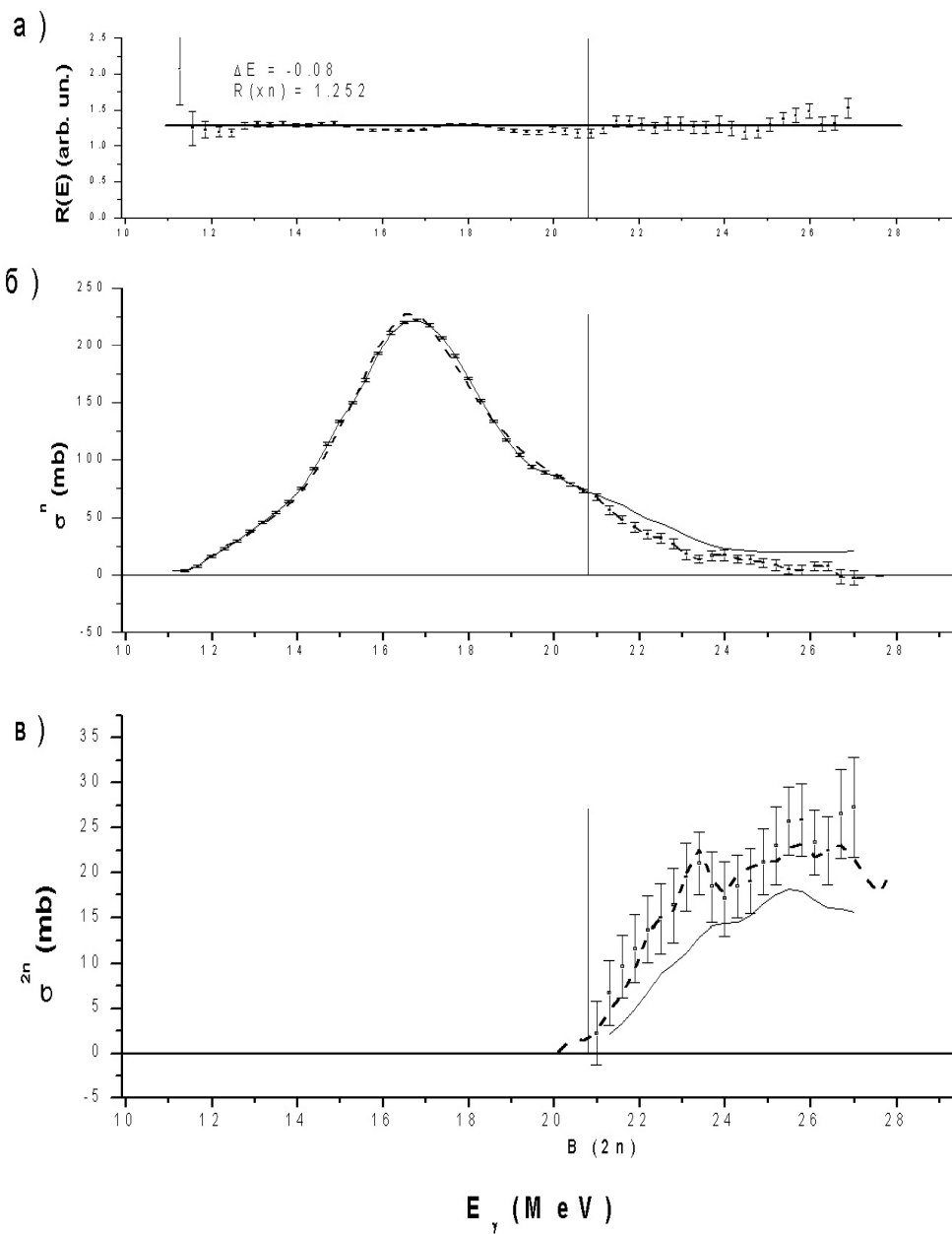


Рис. 7. Результаты взаимной корректировки («стандартная ситуация») сечений полной и парциальных фотонейтронных реакций для ядра  $^{89}\text{Y}$ , полученных в Саклэ и Ливерморе:

- а) отношения  $R(E)$  сечений  $(\gamma, xn)$  реакции; указаны значения  $\Delta E$  и  $R(xn)$ ;
- б) данные для сечений реакций  $(\gamma, n)$ :
  - сплошная линия – исходные данные Саклэ  $\sigma^n_C$ ;
  - точки с ошибками – **оцененные** данные (12) Саклэ  $\sigma^n_{C^*}$ ;
  - пунктир – **оцененные** данные Ливермора  $R\sigma^n_L$ ;
- в) данные для сечений реакций  $(\gamma, 2n)$ :
  - сплошная линия – исходные данные Саклэ  $\sigma^{2n}_C$ ;
  - точки с ошибками – **оцененные** данные ((9) – (11)) Саклэ  $\sigma^{2n}_{C^*}$ ;
  - пунктир – **оцененные** данные Ливермора  $R\sigma^{2n}_L$ .

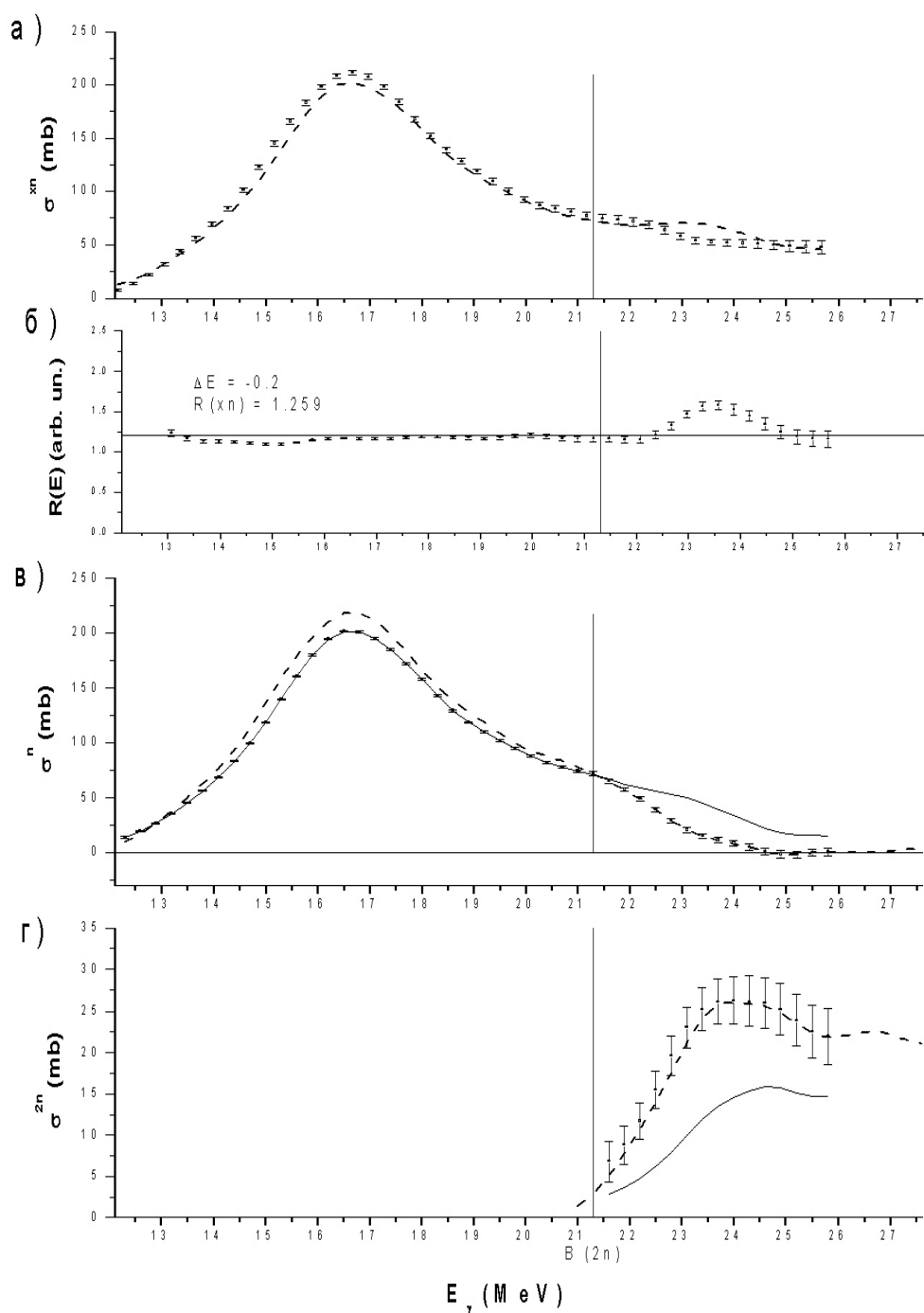


Рис. 8. Результаты взаимной корректировки («особый случай») сечений реакций, полученных в Саклэ и Ливерморе для ядра  $^{90}\text{Zr}$ :

- а) данные Саклэ (пунктир – исходные  $\sigma^{xn}_C$ , точки с ошибками – скорректированные  $\sigma^{xn*} = \sigma^{xn} R(E)$ ) по сечениям реакции  $(\gamma, xn)$ ;
- б) отношения  $R(E)$  сечений  $(\gamma, xn)$  реакции; указаны значения  $\Delta E$  и  $R(xn)$ ;
- в) данные для сечений реакций  $(\gamma, n)$ : сплошная линия – исходные данные Саклэ  $\sigma^n_C$ , точки с ошибками – **оцененные** (12) данные Саклэ  $\sigma^{n*}_C$ , пунктир – **оцененные** данные Ливермора  $R\sigma^n_L$ ;
- г) данные для сечений реакций  $(\gamma, 2n)$ : сплошная линия – исходные данные Саклэ  $\sigma^{2n}_C$ , точки с ошибками – **оцененные** данные ((9) – (11)) Саклэ  $\sigma^{2n*}_C$ , пунктир – **оцененные** данные Ливермора  $R\sigma^{2n}_L$ .



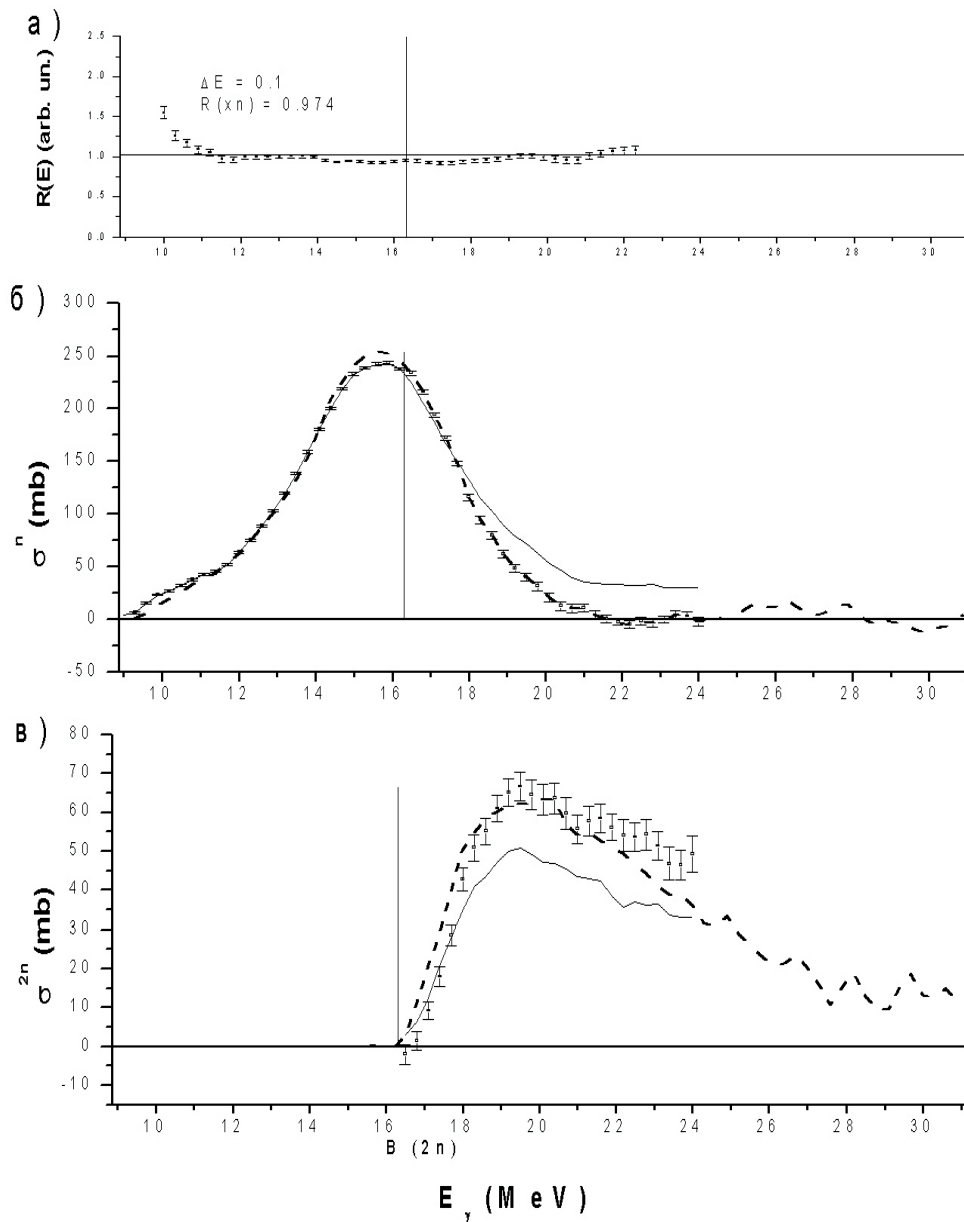


Рис. 9. Результаты взаимной корректировки («стандартная ситуация») сечений полной и парциальных фотонейтронных реакций для ядра  $^{115}\text{In}$ , полученных в Саклэ и Ливерморе:

- а) отношения  $R(E)$  сечений  $(\gamma, xn)$  реакции; указаны значения  $\Delta E$  и  $R(xn)$ ;
- б) данные для сечений реакций  $(\gamma, n)$ :
- сплошная линия – исходные данные Саклэ  $\sigma_C^n$ ;
  - точки с ошибками – **оцененные** данные (12) Саклэ  $\sigma_C^{n*}$ ;
  - пунктир – **оцененные** данные Ливермора  $R\sigma_L^n$ ;
- в) данные для сечений реакций  $(\gamma, 2n)$ :
- сплошная линия – исходные данные Саклэ  $\sigma_C^{2n}$ ;
  - точки с ошибками – **оцененные** данные ((9) – (11)) Саклэ  $\sigma_C^{2n*}$ ;
  - пунктир – **оцененные** данные Ливермора  $R\sigma_L^{2n}$ .

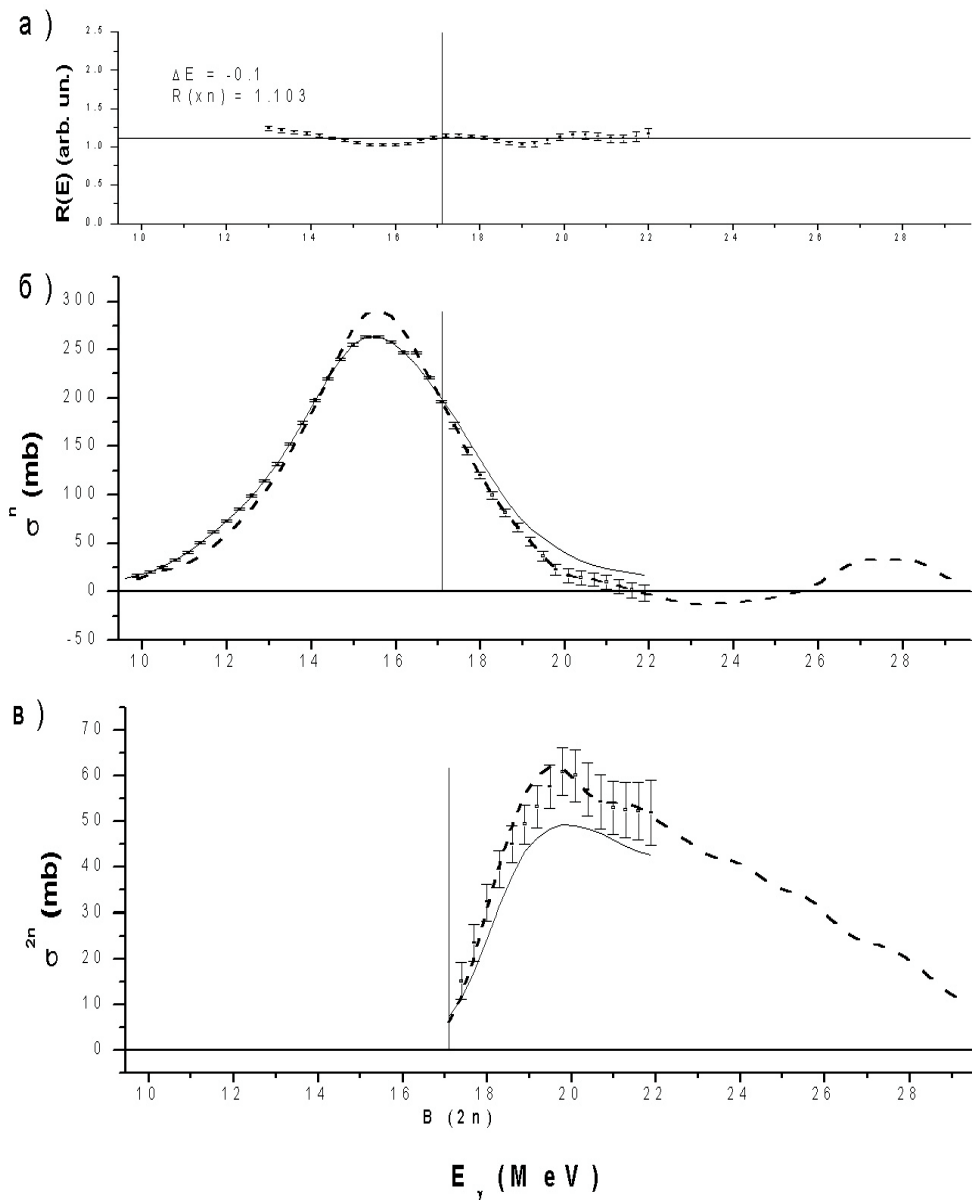


Рис. 10. Результаты взаимной корректировки («стандартная ситуация») сечений полной и парциальных фотонейтронных реакций для ядра  $^{116}\text{Sn}$ , полученных в Саклэ и Ливерморе:

- а) отношения  $R(E)$  сечений  $(\gamma, xn)$  реакции; указаны значения  $\Delta E$  и  $R(xn)$ ;
- б) данные для сечений реакций  $(\gamma, n)$ :
  - сплошная линия – исходные данные Саклэ  $\sigma^n_C$ ;
  - точки с ошибками – **оцененные** данные (12) Саклэ  $\sigma^{n*}_C$ ;
  - пунктир – **оцененные** данные Ливермора  $R\sigma^n_L$ ;
- в) данные для сечений реакций  $(\gamma, 2n)$ :
  - сплошная линия – исходные данные Саклэ  $\sigma^{2n}_C$ ;
  - точки с ошибками – **оцененные** данные ((9) – (11)) Саклэ  $\sigma^{2n*}_C$ ;
  - пунктир – **оцененные** данные Ливермора  $R\sigma^{2n}_L$ .

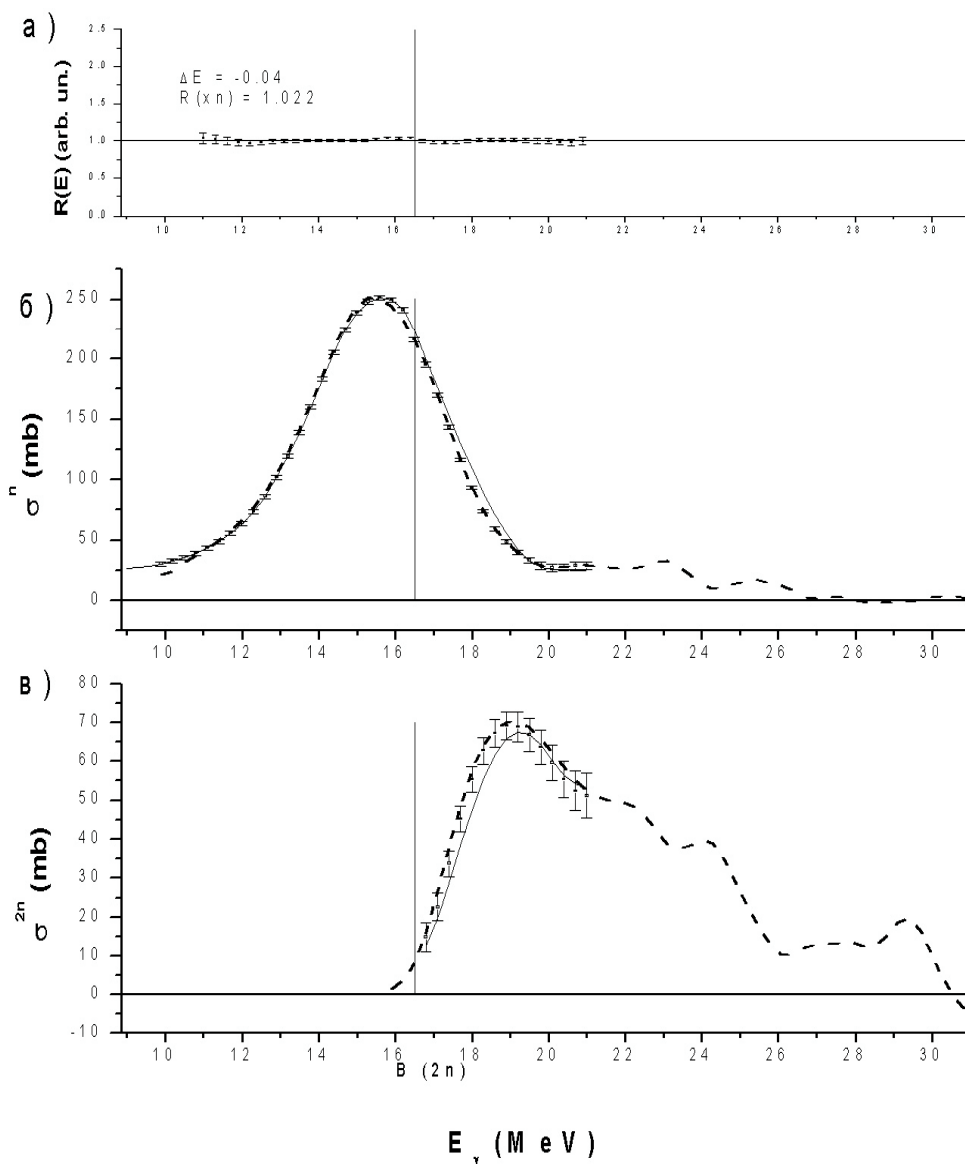


Рис. 11. Результаты взаимной корректировки («стандартная ситуация») сечений полной и парциальных фотонейтронных реакций для ядра  $^{117}\text{Sn}$ , полученных в Саклэ и Ливерморе:

- а) отношения  $R(E)$  сечений  $(\gamma, xn)$  реакции; указаны значения  $\Delta E$  и  $R(xn)$ ;
- б) данные для сечений реакций  $(\gamma, n)$ :
  - сплошная линия – исходные данные Саклэ  $\sigma^n_{\text{С}}$ ;
  - точки с ошибками – **оцененные** данные (12) Саклэ  $\sigma^n_{\text{С}}^*$ ;
  - пунктир – **оцененные** данные Ливермора  $R\sigma^n_{\text{Л}}$ ;
- в) данные для сечений реакций  $(\gamma, 2n)$ :
  - сплошная линия – исходные данные Саклэ  $\sigma^{2n}_{\text{С}}$ ;
  - точки с ошибками – **оцененные** данные ((9) – (11)) Саклэ  $\sigma^{2n}_{\text{С}}^*$ ;
  - пунктир – **оцененные** данные Ливермора  $R\sigma^{2n}_{\text{Л}}$ .

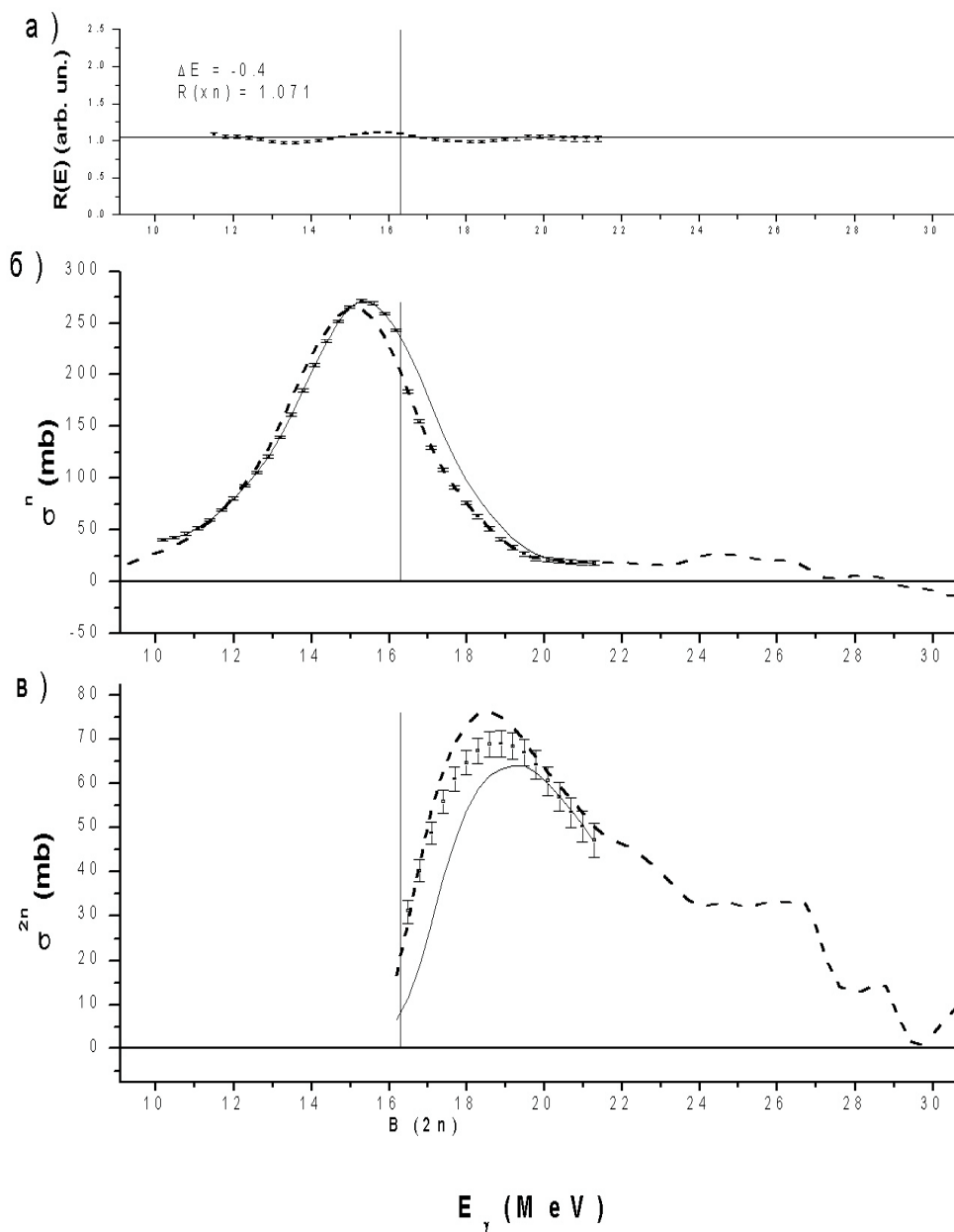


Рис. 12. Результаты взаимной корректировки («стандартная ситуация») сечений полной и парциальных фотонейтронных реакций для ядра  $^{118}\text{Sn}$ , полученных в Саклэ и Ливерморе:

- а) отношения  $R(E)$  сечений  $(\gamma, xn)$  реакции; указаны значения  $\Delta E$  и  $R(xn)$ ;
- б) данные для сечений реакций  $(\gamma, n)$ :
  - сплошная линия – исходные данные Саклэ  $\sigma^n_C$ ;
  - точки с ошибками – **скорректированные** данные (12) Саклэ  $\sigma^{n*}_C$ ;
  - пунктир – **оцененные** данные Ливермора  $R\sigma^n_L$ ;
- в) данные для сечений реакций  $(\gamma, 2n)$ :
  - сплошная линия – исходные данные Саклэ  $\sigma^{2n}_C$ ;
  - точки с ошибками – **оцененные** данные ((9) – (11)) Саклэ  $\sigma^{2n*}_C$ ;
  - пунктир – **оцененные** данные Ливермора  $R\sigma^{2n}_L$ .

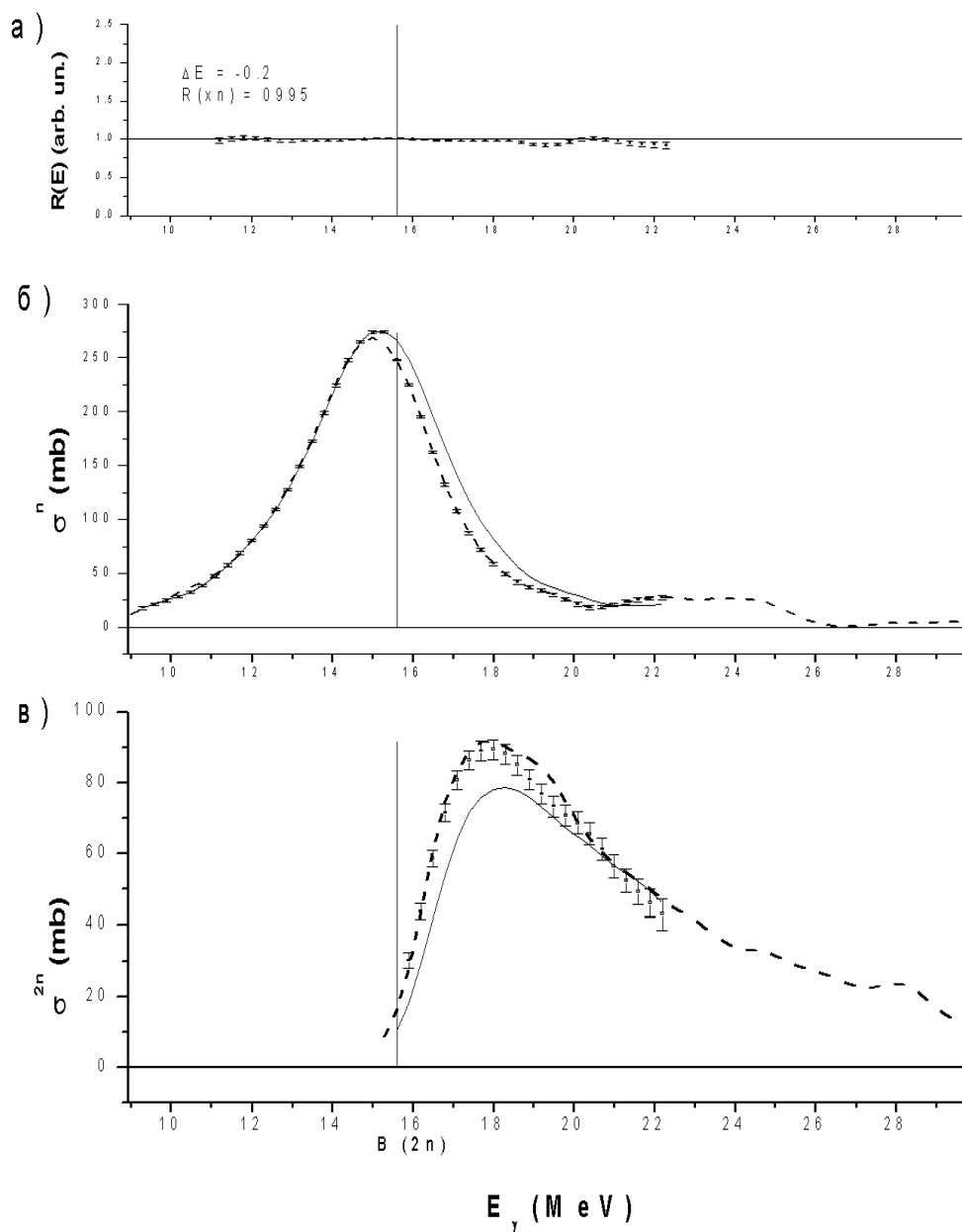


Рис. 13. Результаты взаимной корректировки («стандартная ситуация») сечений полной и парциальных фотонейтронных реакций для ядра  $^{120}\text{Sn}$ , полученных в Саклэ и Ливерморе:

- а) отношения  $R(E)$  сечений  $(\gamma, xn)$  реакции; указаны значения  $\Delta E$  и  $R(xn)$ ;
- б) данные для сечений реакций  $(\gamma, n)$ :
  - сплошная линия – исходные данные Саклэ  $\sigma_C^n$ ;
  - точки с ошибками – **скорректированные** данные (12) Саклэ  $\sigma_C^{n*}$ ;
  - пунктир – **оцененные** данные Ливермора  $R\sigma_{\text{Л}}^n$ ;
- в) оцененные данные для сечений реакций  $(\gamma, 2n)$ :
  - сплошная линия – исходные данные Саклэ  $\sigma_C^{2n}$ ;
  - точки с ошибками – **оцененные** данные ((9) – (11)) Саклэ  $\sigma_C^{2n*}$ ;
  - пунктир – **оцененные** данные Ливермора  $R\sigma_{\text{Л}}^{2n}$ .

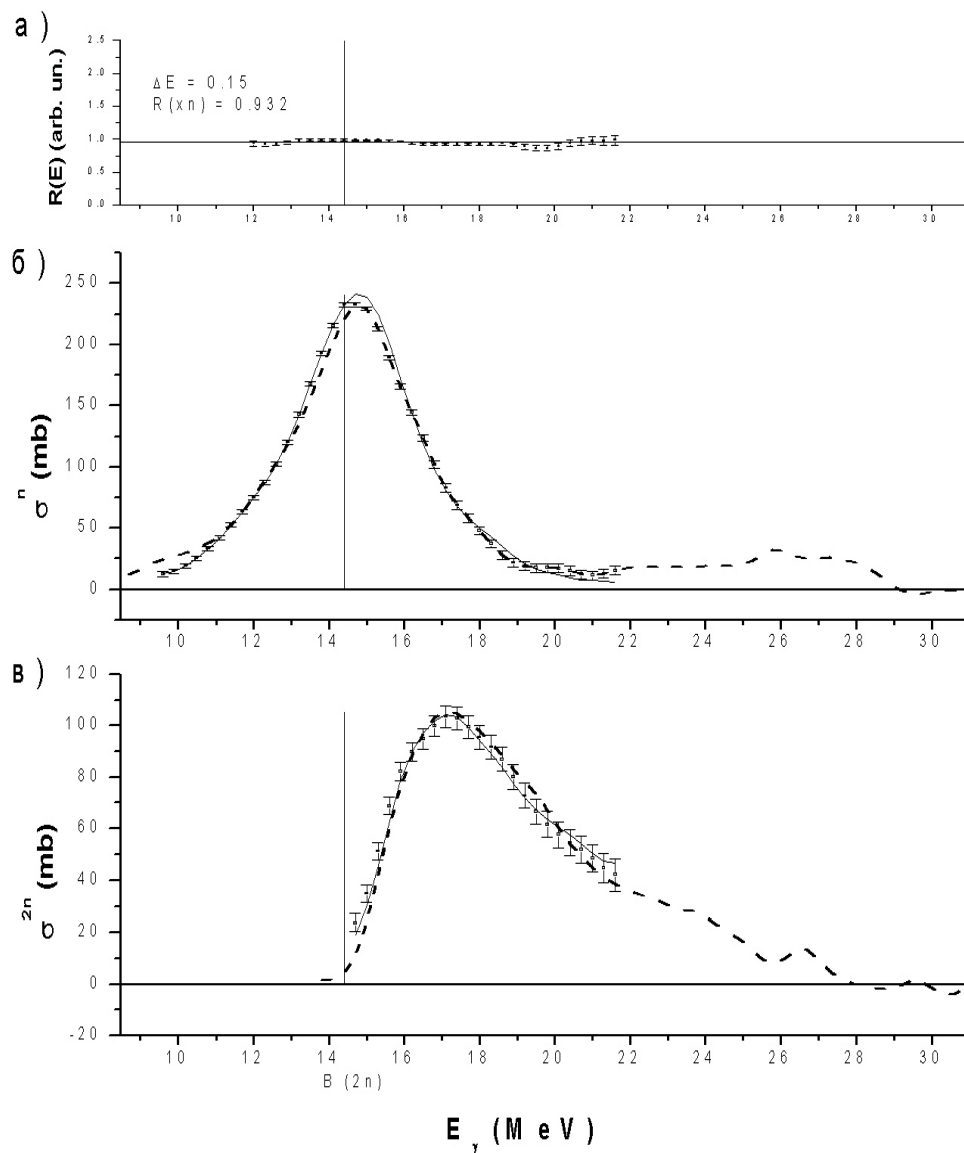


Рис. 14. Результаты взаимной корректировки («идеальный случай») сечений полной и парциальных фотонейтронных реакций для ядра  $^{124}\text{Sn}$ , полученных в Саклэ и Ливерморе:

- а) отношения  $R(E)$  сечений  $(\gamma, xn)$  реакции; указаны значения  $\Delta E$  и  $R(xn)$ ;
- б) данные для сечений реакций  $(\gamma, n)$ :
  - сплошная линия – исходные данные Саклэ  $\sigma^n_{\text{С}}$ ;
  - точки с ошибками – **оцененные** данные (12) Саклэ  $\sigma^n_{\text{С}}^*$ ;
  - пунктир – **оцененные** данные Ливермора  $R\sigma^n_{\text{Л}}$ ;
- в) данные для сечений реакций  $(\gamma, 2n)$ :
  - сплошная линия – исходные данные Саклэ  $\sigma^{2n}_{\text{С}}$ ;
  - точки с ошибками – **оцененные** данные ((9) – (11)) Саклэ  $\sigma^{2n}_{\text{С}}^*$ ;
  - пунктир – **оцененные** данные Ливермора  $R\sigma^{2n}_{\text{Л}}$ .

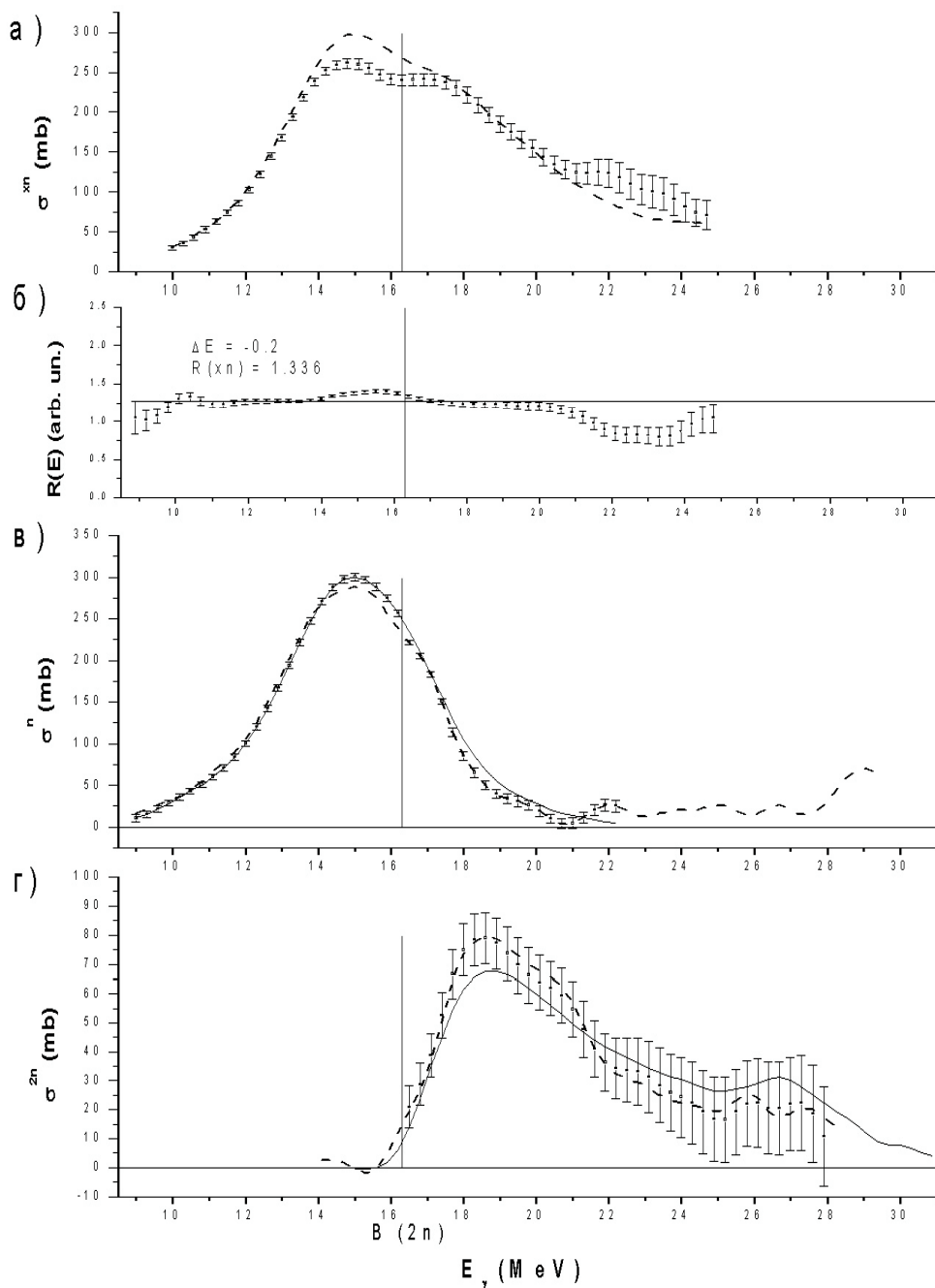


Рис. 15. Результаты взаимной корректировки («особый случай») сечений реакций, полученных в Саклэ и Ливерморе для ядра  $^{127}\text{I}$ :

- а) данные Саклэ (пунктир – исходные  $\sigma^{xn}_C$ , точки с ошибками – скорректированные  $\sigma^{xn}_C = \sigma^{xn}_C R/R(E)$ ) по сечениям реакции  $(\gamma, xn)$ ;
- б) отношения  $R(E)$  сечений  $(\gamma, xn)$  реакции; указаны значения  $\Delta E$  и  $R(xn)$ ;
- в) данные для сечений реакций  $(\gamma, n)$ : сплошная линия – исходные данные Саклэ  $\sigma^n_C$ , точки с ошибками – **оцененные** (12) данные Саклэ  $\sigma^n_{C^*}$ , пунктир – **оцененные** данные Ливермора  $R\sigma^n_L$ ;
- г) данные для сечений реакций  $(\gamma, 2n)$ : сплошная линия – исходные данные Саклэ  $\sigma^{2n}_C$ , точки с ошибками – **оцененные** ((9) – (11)) данные Саклэ  $\sigma^{2n}_{C^*}$ , пунктир – **оцененные** данные Ливермора  $R\sigma^{2n}_L$ .

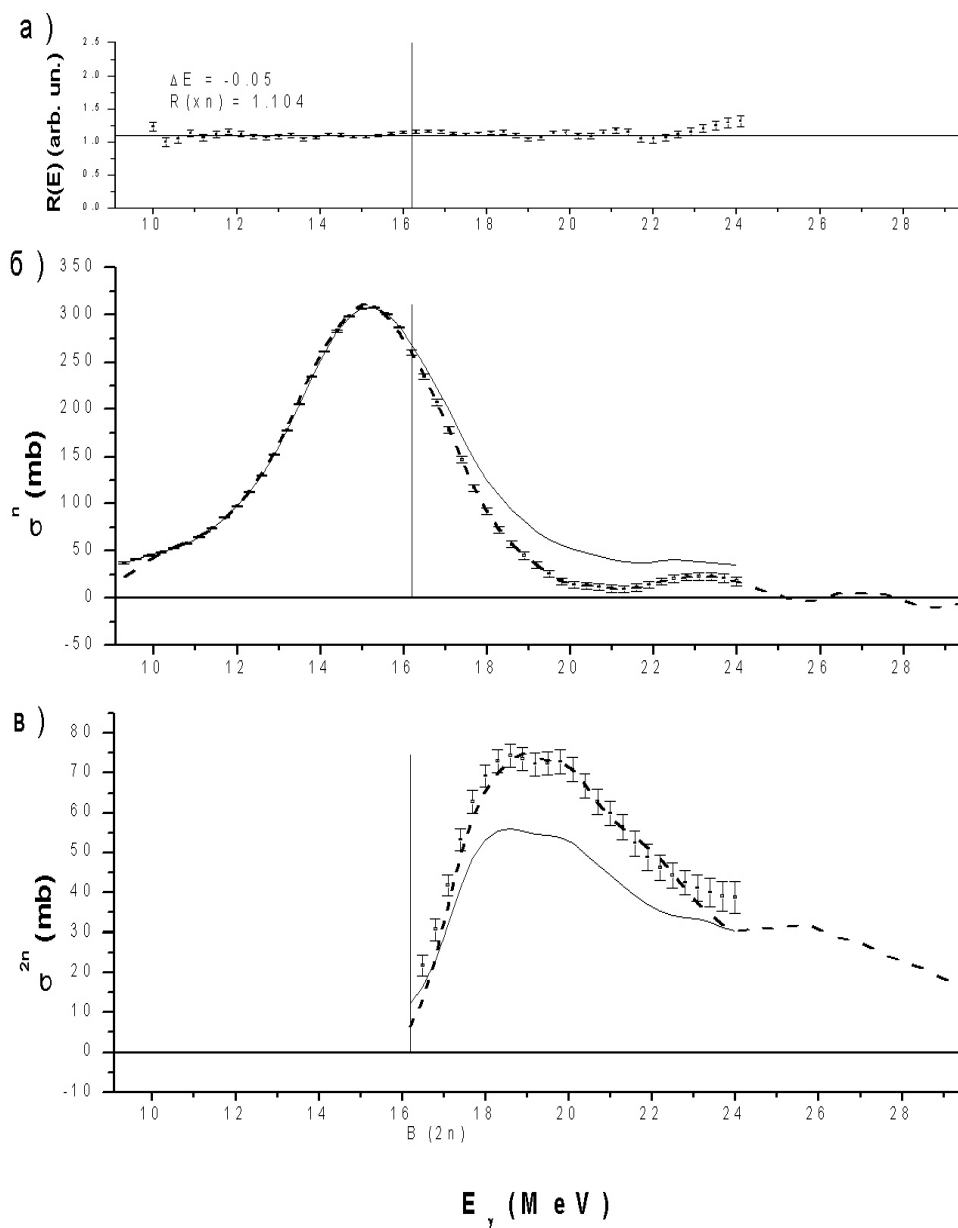


Рис. 16. Результаты взаимной корректировки («стандартная ситуация») сечений полной и парциальных фотонейтронных реакций для ядра  $^{133}\text{Cs}$ , полученных в Саклэ и Ливерморе:

- а) отношения  $R(E)$  сечений  $(\gamma, xn)$  реакции; указаны значения  $\Delta E$  и  $R(xn)$ ;
- б) данные для сечений реакций  $(\gamma, n)$ :
  - сплошная линия – исходные данные Саклэ  $\sigma_C^n$ ;
  - точки с ошибками – **оцененные** данные (12) Саклэ  $\sigma_C^{n*}$ ;
  - пунктир – **оцененные** данные Ливермора  $R\sigma_L^n$ ;
- в) данные для сечений реакций  $(\gamma, 2n)$ :
  - сплошная линия – исходные данные Саклэ  $\sigma_C^{2n}$ ;
  - точки с ошибками – **оцененные** данные ((9) – (11)) Саклэ  $\sigma_C^{2n*}$ ;
  - пунктир – **оцененные** данные Ливермора  $R\sigma_L^{2n}$ .



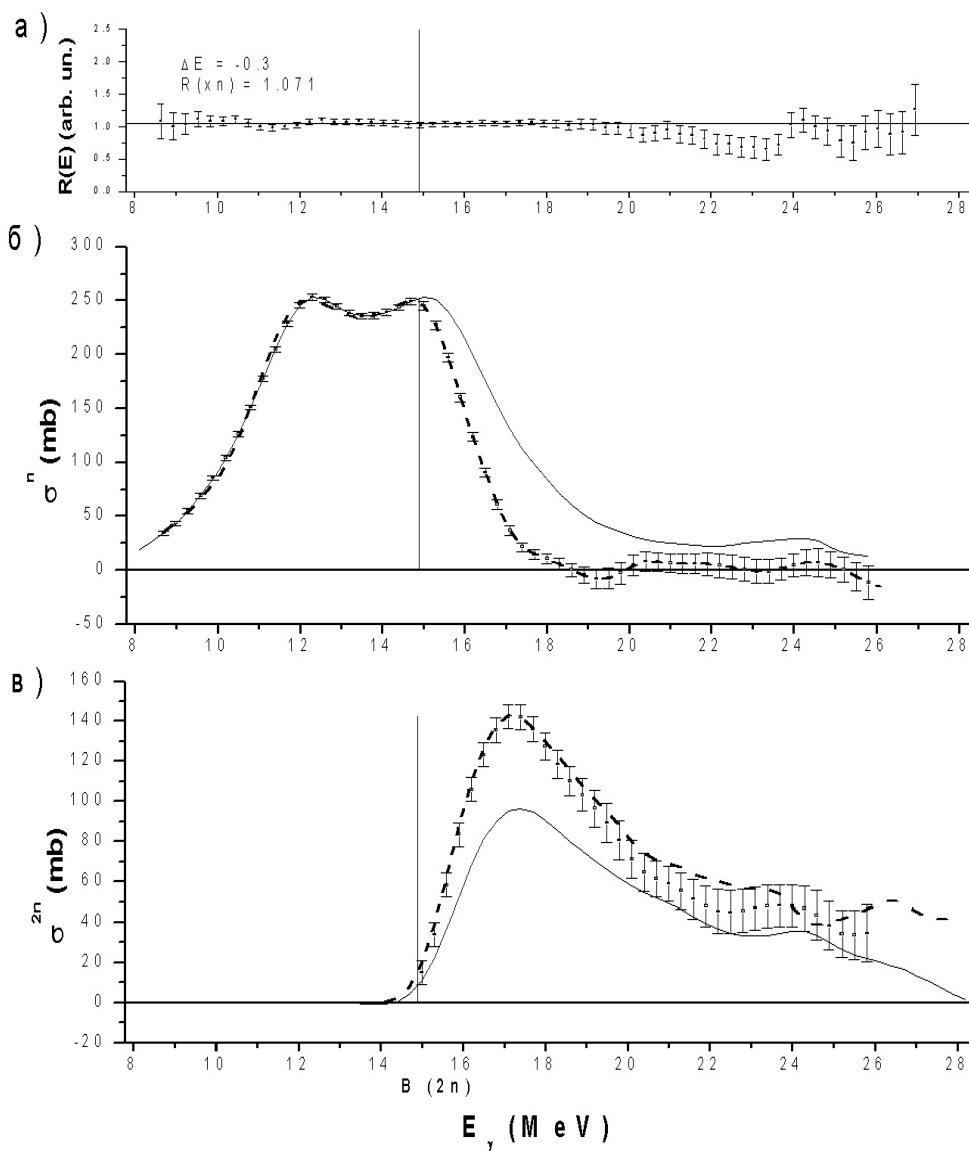


Рис. 17. Результаты взаимной корректировки («стандартная ситуация») сечений полной и парциальных фотонейтронных реакций для ядра  $^{159}\text{Tb}$ , полученных в Саклэ и Ливерморе:

- а) отношения  $R(E)$  сечений  $(\gamma, xn)$  реакции; указаны значения  $\Delta E$  и  $R(xn)$ ;
- б) данные для сечений реакций  $(\gamma, n)$ :
  - сплошная линия – исходные данные Саклэ  $\sigma^n_{\text{С}}$ ;
  - точки с ошибками – **оцененные** данные (12) Саклэ  $\sigma^n_{\text{С}}^*$ ;
  - пунктир – **оцененные** данные Ливермора  $R\sigma^n_{\text{Л}}$ ;
- в) данные для сечений реакций  $(\gamma, 2n)$ :
  - сплошная линия – исходные данные Саклэ  $\sigma^{2n}_{\text{С}}$ ;
  - точки с ошибками – **оцененные** данные ((9) – (11)) Саклэ  $\sigma^{2n}_{\text{С}}^*$ ;
  - пунктир – **оцененные** данные Ливермора  $R\sigma^{2n}_{\text{Л}}$ .

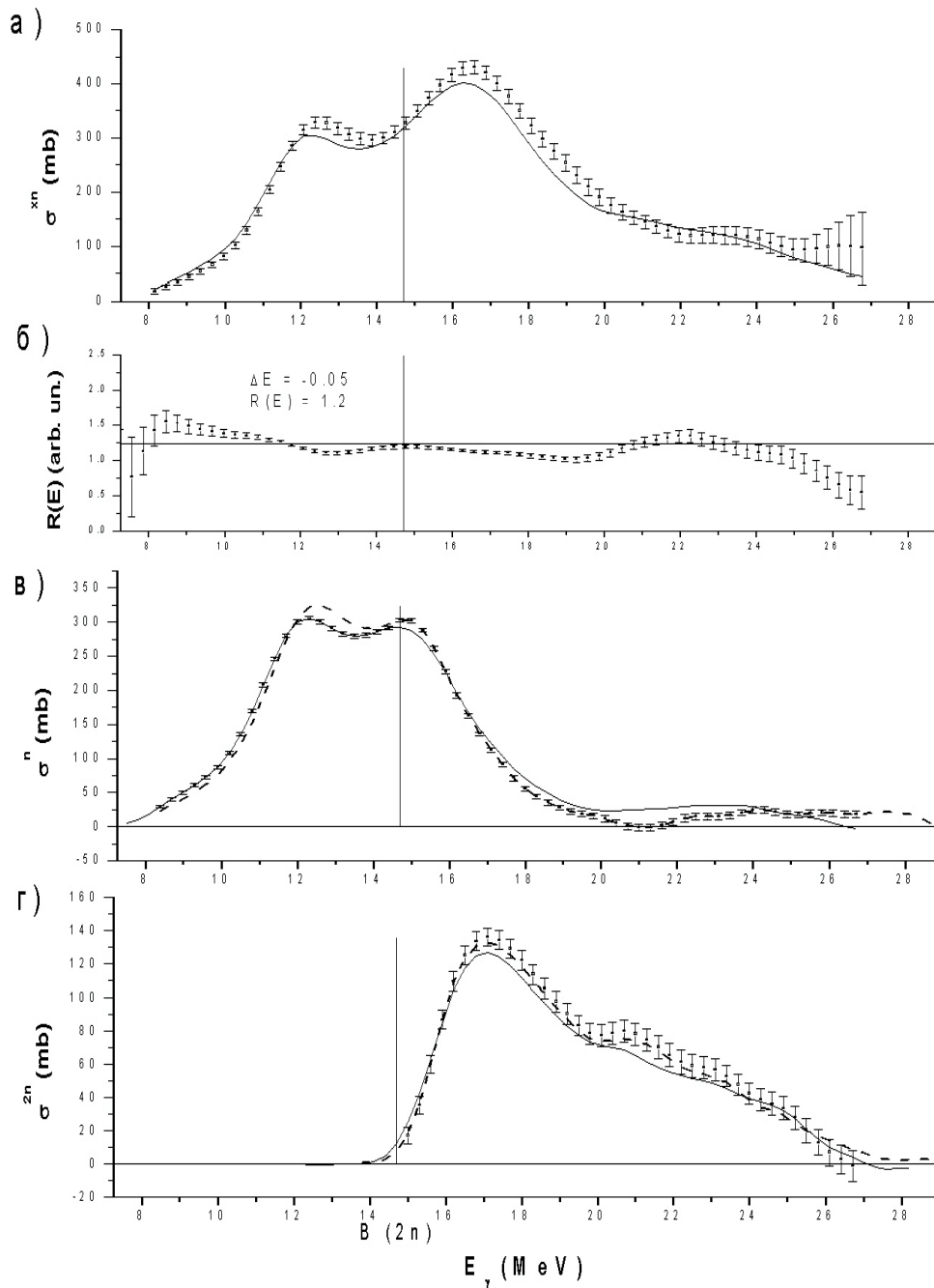


Рис. 18. Результаты взаимной корректировки («особый случай») сечений реакций, полученных в Саклэ и Ливерморе для ядра  $^{165}\text{Ho}$ :

- а) данные Саклэ (пунктир – исходные  $\sigma_{\text{C}}^{\text{xn}}$ , точки с ошибками – скорректированные  $\sigma_{\text{C}}^{\text{xn}*} = \sigma_{\text{C}}^{\text{xn}} R(E)$ ) по сечениям реакции  $(\gamma, \text{xn})$ ;
- б) отношения  $R(E)$  сечений  $(\gamma, \text{xn})$  реакции; указаны значения  $\Delta E$  и  $R(\text{xn})$ ;
- в) данные для сечений реакций  $(\gamma, \text{n})$ : сплошная линия – исходные данные Саклэ  $\sigma_{\text{C}}^{\text{n}}$ , точки с ошибками – **оцененные** (12) данные Саклэ  $\sigma_{\text{C}}^{\text{n}*}$ , пунктир – **оцененные** данные Ливермора  $R\sigma_{\text{Л}}^{\text{n}}$ ;
- г) данные для сечений реакций  $(\gamma, 2\text{n})$ : сплошная линия – исходные данные Саклэ  $\sigma_{\text{C}}^{2\text{n}}$ , точки с ошибками – **оцененные** ((9) – (11)) данные Саклэ  $\sigma_{\text{C}}^{2\text{n}*}$ , пунктир – **оцененные** данные Ливермора  $R\sigma_{\text{Л}}^{2\text{n}}$ .

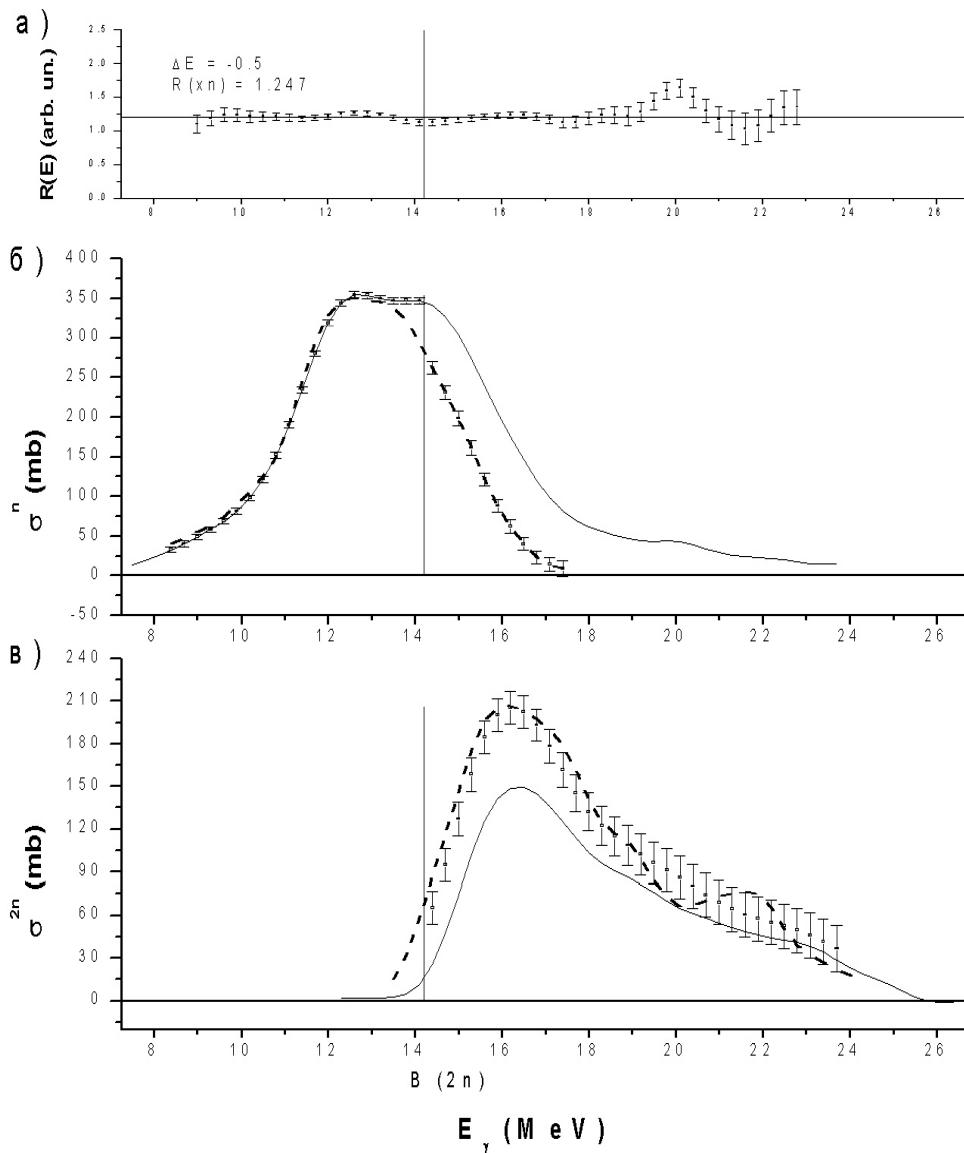


Рис. 19. Результаты взаимной корректировки («стандартная ситуация») сечений полной и парциальных фотонейтронных реакций для ядра  $^{181}\text{Ta}$ , полученных в Саклэ и Ливерморе:

- отношения  $R(E)$  сечений  $(\gamma, xn)$  реакции; указаны значения  $\Delta E$  и  $R(xn)$ ;
- данные для сечений реакций  $(\gamma, n)$ :
  - сплошная линия – исходные данные Саклэ  $\sigma^n_C$ ;
  - точки с ошибками – **скорректированные** данные (12) Саклэ  $\sigma^{n*}_C$ ;
  - пунктир – **оцененные** данные (12) Ливермора  $R\sigma^n_L$ ;
- данные для сечений реакций  $(\gamma, 2n)$ :
  - сплошная линия – исходные данные Саклэ  $\sigma^{2n}_C$ ;
  - точки с ошибками – **оцененные** данные ((9) – (11) Саклэ  $\sigma^{2n*}_C$ ;
  - пунктир – **оцененные** данные Ливермора  $R\sigma^{2n}_L$ .

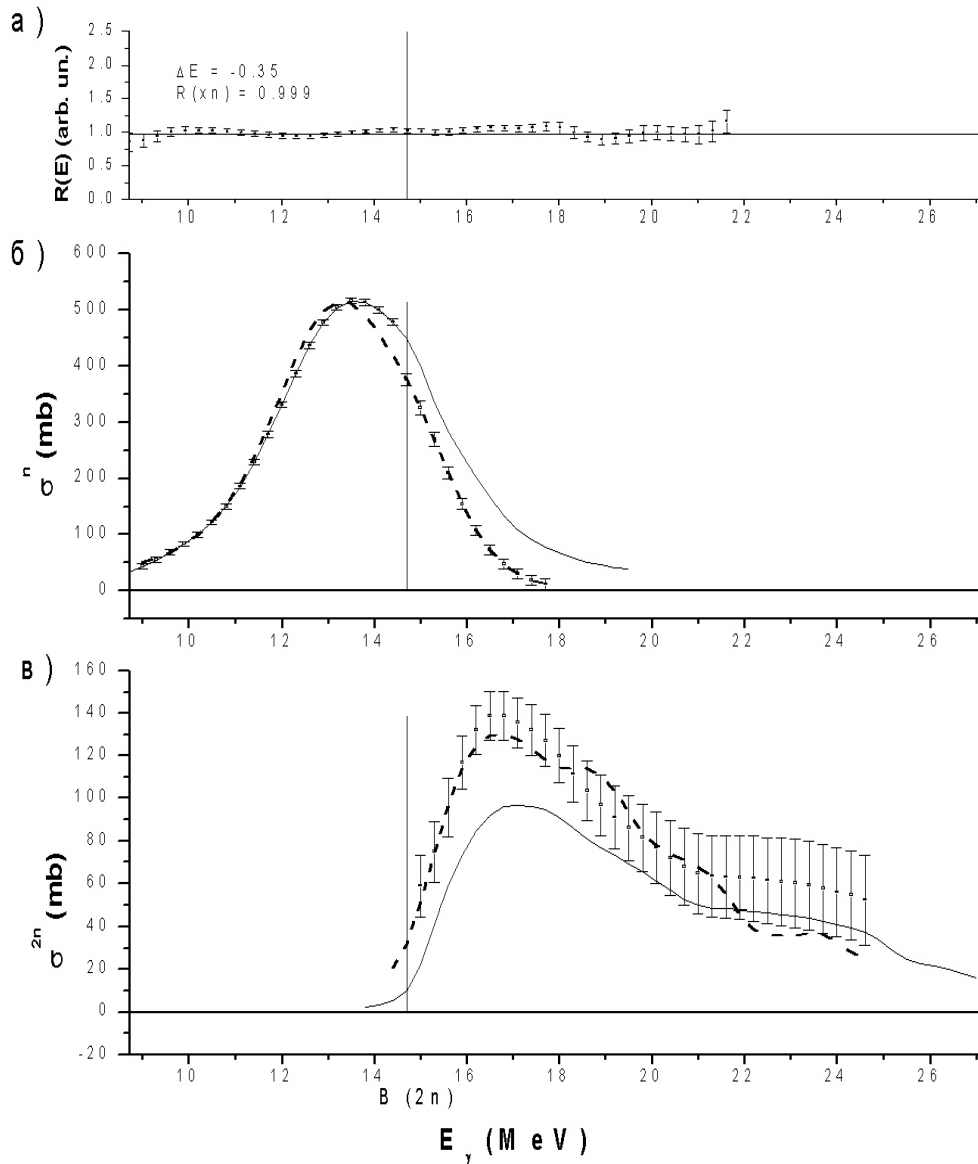


Рис. 20. Результаты взаимной корректировки («стандартная ситуация») сечений полной и парциальных фотонейтронных реакций для ядра  $^{197}\text{Au}$ , полученных в Саклэ и Ливерморе:

- а) отношения  $R(E)$  сечений  $(\gamma, xn)$  реакции; указаны значения  $\Delta E$  и  $R(xn)$ ;
- б) данные для сечений реакций  $(\gamma, n)$ :
  - сплошная линия – исходные данные Саклэ  $\sigma_C^n$ ;
  - точки с ошибками – **скорректированные** данные (12) Саклэ  $\sigma_C^{n*}$ ;
  - пунктир – **оцененные** данные Ливермора  $R\sigma_L^n$ ;
- в) данные для сечений реакций  $(\gamma, 2n)$ :
  - сплошная линия – исходные данные Саклэ  $\sigma_C^{2n}$ ;
  - точки с ошибками – **оцененные** данные ((9) – (11)) Саклэ  $\sigma_C^{2n*}$ ;
  - пунктир – **оцененные** данные Ливермора  $R\sigma_L^{2n}$ .

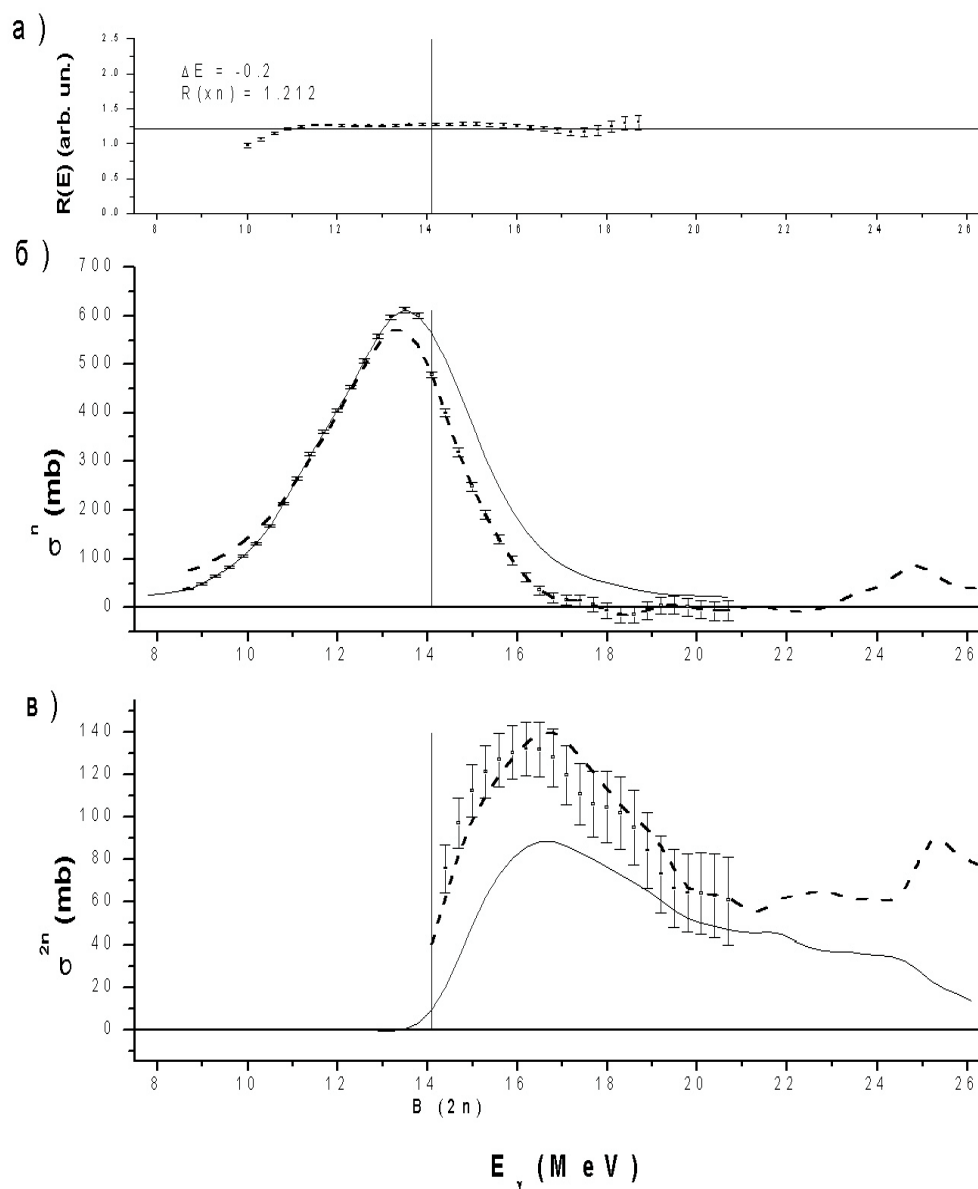


Рис. 21. Результаты взаимной корректировки («стандартная ситуация») сечений полной и парциальных фотонейтронных реакций для ядра  $^{208}\text{Pb}$ , полученных в Саклэ и Ливерморе:

- а) отношения  $R(E)$  сечений  $(\gamma, xn)$  реакции; указаны значения  $\Delta E$  и  $R(xn)$ ;
- б) данные для сечений реакций  $(\gamma, n)$ :
  - сплошная линия – исходные данные Саклэ  $\sigma_C^n$ ;
  - точки с ошибками – **скорректированные** данные (12) Саклэ  $\sigma_C^{n*}$ ;
  - пунктир – **оцененные** данные Ливермора  $R\sigma_L^n$ ;
- в) данные для сечений реакций  $(\gamma, 2n)$ :
  - сплошная линия – исходные данные Саклэ  $\sigma_C^{2n}$ ;
  - точки с ошибками – **оцененные** данные ((9) – (11)) Саклэ  $\sigma_C^{2n*}$ ;
  - пунктир – **оцененные** данные Ливермора  $R\sigma_L^{2n}$ .

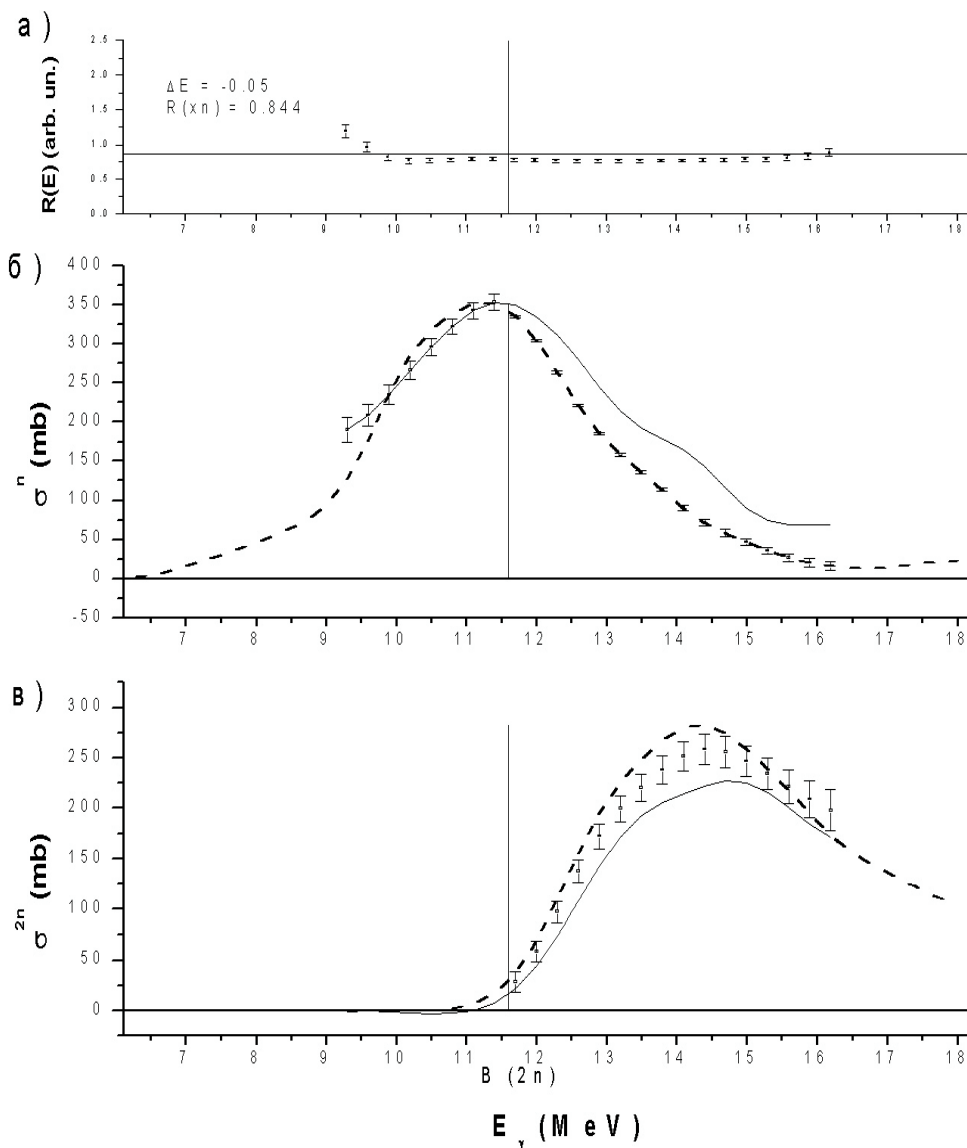


Рис. 22. Результаты взаимной корректировки («стандартная ситуация») сечений полной и парциальных фотонейтронных реакций для ядра  $^{232}\text{Th}$ , полученных в Саклэ и Ливерморе:

- а) отношения  $R(E)$  сечений  $(\gamma, xn)$  реакции; указаны значения  $\Delta E$  и  $R(xn)$ ;
- б) данные для сечений реакций  $(\gamma, n)$ :
  - сплошная линия – исходные данные Саклэ  $\sigma_C^n$ ;
  - точки с ошибками – **оцененные** данные (12) Саклэ  $\sigma_C^{n*}$ ;
  - пунктир – **оцененные** данные Ливермора  $R\sigma_L^n$ ;
- в) данные для сечений реакций  $(\gamma, 2n)$ :
  - сплошная линия – исходные данные Саклэ  $\sigma_C^{2n}$ ;
  - точки с ошибками – **оцененные** данные ((9) – (11)) Саклэ  $\sigma_C^{2n*}$ ;
  - пунктир – **оцененные** данные Ливермора  $R\sigma_L^{2n}$ .

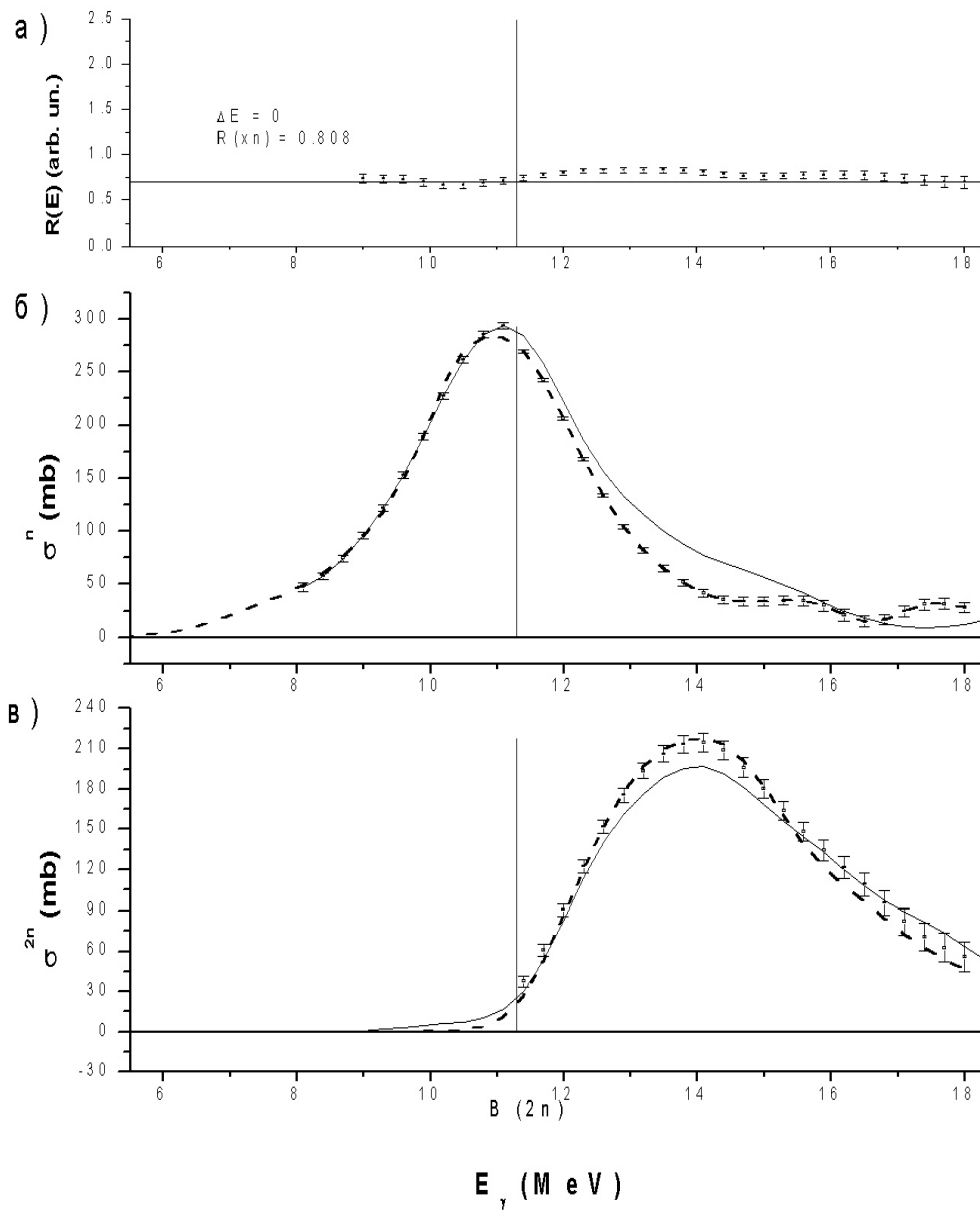


Рис. 23. Результаты взаимной корректировки («стандартная ситуация») сечений полной и парциальных фотонейтронных реакций для ядра  $^{238}\text{U}$ , полученных в Саклэ и Ливерморе:

- а) отношения  $R(E)$  сечений  $(\gamma, xn)$  реакции; указаны значения  $\Delta E$  и  $R(xn)$ ;
- б) данные для сечений реакций  $(\gamma, n)$ :
  - сплошная линия – исходные данные Саклэ  $\sigma^n_{\text{С}}$ ;
  - точки с ошибками – **оцененные** данные (12) Саклэ  $\sigma^n_{\text{С}}^*$ ;
  - пунктир – **оцененные** данные Ливермора  $R\sigma^n_{\text{Л}}$ ;
- в) данные для сечений реакций  $(\gamma, 2n)$ :
  - сплошная линия – исходные данные Саклэ  $\sigma^{2n}_{\text{С}}$ ;
  - точки с ошибками – **оцененные** данные ((9) – (11)) Саклэ  $\sigma^{2n}_{\text{С}}^*$ ;
  - пунктир – **оцененные** данные Ливермора  $R\sigma^{2n}_{\text{Л}}$ .

## Литература

1. Б.С.Ишханов, И.М.Капитонов. Взаимодействие электромагнитного излучения с атомными ядрами. Издательство Московского университета. Москва, 1979.
2. E.G.Fuller, H.Gerstenberg. Photonuclear Data - Abstracts Sheets 1955 - 1982. NBSIR 83-2742. U.S.A. National Bureau of Standards, 1986.
3. V.V.Varlamov, V.V.Sapunenko, M.E.Stepanov. Photonuclear Data Index 1976 - 1995. Izdatel'stvo Moskovskogo Universiteta, -M., 1996.
4. S.S.Dietrich, B.L.Berman. Atomic Data and Nuclear Data Tables, 38 (1988) 199.
5. R.L.Bergere, H.Beil, A.Veyssiere. Nucl.Phys., A121 (1968) 463.
6. E.Wolyne, M.N.Martins. Revista Brasileira Fisica, 17 (1987) 56.
7. V.V.Varlamov, N.G.Efimkin, N.A.Lenskaja, A.P.Chernjaev. The Investigation of the Reasons for Discrepancies in Results of Photonuclear Experiments at the Beams of Bremsstrahlung and Quasimonoenergetic Gamma-Quanta. The Problem of Interpretation. MSU INP Preprint-89-66/143, -M., 1989.
8. В.В.Варламов, Б.С.Ишханов. Анализ систематических расхождений величин сечений фотоядерных реакций в области ГДР. Международная конференция "Свойства возбужденных состояний атомных ядер и механизмы ядерных реакций". LI Совещание по ядерной спектроскопии и структуре ядра. 3 - 8 сентября 2001 г. Тезисы докладов. Саров, 2001, с. 180.
9. V.V.Varlamov, B.S.Ishkhanov. Study of Consistency Between  $(\gamma, xn)$ ,  $[(\gamma, n) + (\gamma, np)]$  and  $(\gamma, 2n)$  Reaction Cross Sections Using Data Systematics. Vienna, Austria. INDC(CCP)-433, IAEA NDS, Vienna, Austria, 2002.
10. I.N.Boboshin, V.V.Varlamov, E.M.Ivanov, S.V.Ivanov, N.N.Peskov, M.E.Stepanov, V.V.Chesnokov. Relational Nuclear Databases Upon the MSU INP CDFE Web-site and Nuclear Data Centres Network CDFE Activities. Report on the IAEA Consultant's Meeting on the Co-ordination of Nuclear Reaction Data Centres (Technical Aspects), 28 - 30 May 2001, Vienna, Austria. INDC(NDS)-427, IAEA NDS, Vienna, Austria, 2001, p. 49.
11. И.Н.Бобошин, В.В.Варламов, С.Ю.Комаров, Н.Н.Песков, С.Б.Семин, М.Е.Степанов, В.В.Чесноков. Универсальная электронная справочная система по атомным ядрам и ядерным реакциям. Труды Всероссийской научно-методической конференции «Телематика'2002, 3 - 6 июня 2002 г., Санкт-Петербург. ISBN 5-7577-0103-X, -С-Пб., «Университетские телекоммуникации», 2002, с. 148.
12. В.В.Варламов, С.В.Иванов, Н.Н.Песков, М.Е.Степанов. Новая поисковая машина для экспериментальных данных по ядерным реакциям из международной системы EXFOR. Сборник трудов Третьей Всероссийской конференции по Электронным Библиотекам RCDL'2001. Электронные библиотеки: перспективные методы и технологии, электронные коллекции. Петрозаводск, 11 - 13 сентября 2001 года. ISBN 5-9274-0055-8. КарНЦ РАН, 2001, с. 166.
13. Реляционные базы ядерных данных ЦДФЭ НИИЯФ МГУ. URL: [http://depni.sinp.msu.ru/cdfe\\_](http://depni.sinp.msu.ru/cdfe_)
14. Ed. by V.G.Pronyaev, The Nuclear Data Centres Network. IAEA Nuclear Data Section, INDC(NDS)-401, IAEA, Vienna, Austria, 1999.
15. V.Pronyaev, D.Winchell, V.Zerkin, D. Muir, R. Arcilla. Requirements for the Next Generation of Nuclear Databases and Services. International Conference on Nuclear Data for Science and Technology. Embracing the Future at the Beginning of the 21st Century (October 7 - 12, 2001). Tsukuba, Japan, Japan Atomic Energy Research Institute, 2001, p. 263.
16. Ed. by V.McLane, EXFOR Systems Manual. Nuclear Reaction Data Exchange Format. BNL-NCS-63330, BNL, NNDC, USA, 1996.



17. Б.С.Ишханов, И.М.Капитонов, Е.В.Лазутин, И.М.Пискарев, В.С.Сопов, В.Г.Шевченко. Ядерная физика, 12 (1970) 892.
18. A.Veyssiere, H.Beil, R.Bergere, P.Carlos, A.Lepretre, A.De Miniac. Nucl.Phys., A227 (1974) 513.
19. R.L.Bramblett, J.T.Caldwell, R.R.Harvey, S.C.Fultz. Phys.Rev., 133 (1964) B869.
20. R.E.Pywell, M.N.Thompson, B.L.Berman. Nucl.Instr. and Meth., 178 (1980) 149.
21. J.G.Woodworth, K.G.McNeill, J.W.Jury, R.A.Alvarez, B.L.Berman, D.D.Faul, P.Meyer. Phys.Rev., C19 (1979) 1667.
22. В.В.Варламов, Н.Г.Ефимкин, Б.С.Ишханов, В.В.Сапуненко. Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерные константы, 1 (1993) 52.
23. B.L.Berman, R.E.Pywell, S.S.Dietrich, M.N.Thompson, K.G.McNeill, J.W.Jury. Phys.Rev., C36 (1987) 1286.
24. P.Carlos, H.Beil, R.Bergere, J.Fagot, A.Lepretre, A.Veyssiere, G.V.Solodukhov. Nucl.Phys., A259 (1976) 365.
25. B.L.Berman, R.L.Bramblett, J.T.Caldwell, H.S.Davis, M.A.Kelly, S.C.Fultz. Phys.Rev., 177 (1969) 1745.
26. S.C.Fultz, R.L.Bramblett, J.T.Caldwell, N.E.Hansen, C.P.Jupiter. Phys.Rev., 128 (1962) 2345.
27. A.Lepretre, H.Beil, R.Bergere, P.Carlos, A.Veyssiere, M.Sugawara. Nucl.Phys., A175 (1971) 609.
28. B.L.Berman, J.T.Caldwell, R.R.Harvey, M.A.Kelly, R.L.Bramblett, S.C.Fultz. Phys.Rev., 162 (1967) 1098.
29. A.Lepretre, H.Beil, R.Bergere, P.Carlos, A.DeMiniac, A.Veyssiere. Nucl.Phys., A219 (1974) 39.
30. S.C.Fultz, B.L.Berman, J.T.Caldwell, R.L.Bramblett, M.A.Kelly. Phys.Rev., 186 (1969) 1255.
31. R.Bergere, H.Beil, P.Carlos, A.Veyssiere. Nucl.Phys., A133 (1969) 417.
32. R.L.Bramblett, J.T.Caldwell, B.L.Berman, R.R.Harvey, S.C.Fultz. Phys.Rev., 148 (1966) 1198.
33. B.L.Berman, M.A.Kelly, R.L.Bramblrtt, J.T.Caldwell, H.S.Davis, S.C.Fultz. Phys.Rev., 185 (1969) 1576.
34. R.L.Bramblett, J.T.Caldwell, G.F.Auchampaugh, S.C.Fultz. Phys.Rev., 129 (1963) 2723.
35. A.Veyssiere, H.Beil, R.Bergere, P.Carlos, A.Lepretre. Nucl.Phys., A159 (1970) 561.
36. S.C.Fultz, R.L.Bramblett, J.T.Caldwell, N.A.Kerr. Phys.Rev., 127 (1962) 1273.
37. R.R.Harvey, J.T.Caldwell, R.L.Bramblett, S.C.Fultz. Phys.Rev., B136 (1964) 126.
38. A.Veyssiere, H.Beil, R.Bergere, P.Carlos, A.Lepretre, K.Kernbach. Nucl.Phys., A199 (1973) 45.
39. J.T.Caldwell, E.J.Dowdy, B.L.Berman, R.A.Alvarez, P.Meyer. Phys.Rev., C21 (1980) 1215.
40. B.L.Berman, S.C.Fultz. Rev.Mod.Phys. 47 (1975) 713.
41. W.W.Gargaro, D.S.Onley. Phys.Rev., C4 (1971) 1032.
42. C.W.Soto Vargas, D.S.Onley, L.E.Wright. Nucl.Phys., A288 (1977) 45.
43. W.R.Dodge, E.Hayward, E.Wolinec. Phys.Rev., C28 (1983) 150.
44. H.Beil, R.Bergere, P.Carlos, A.Lepretre. Nucl.Phys., A227 (1974) 427.

**УДК 539.17 СОГЛАСОВАННАЯ ОЦЕНКА СЕЧЕНИЙ ФОТОНЕЙТРОННЫХ РЕАКЦИЙ ПО ДАННЫМ, ПОЛУЧЕННЫМ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ НА ПУЧКАХ КВАЗИМОНОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ АННИГИЛЯЦИОННЫХ ФОТОНОВ В**

**ЛИВЕРМОРЕ (США) И САКЛЭ (ФРАНЦИЯ).** / Для 19 (для 7 – впервые) ядер  $^{51}\text{V}$ ,  $^{75}\text{As}$ ,  $^{89}\text{Y}$ ,  $^{90}\text{Zr}$ ,  $^{115}\text{In}$ ,  $^{116,117,118,120,124}\text{Sn}$ ,  $^{127}\text{I}$ ,  $^{133}\text{Cs}$ ,  $^{159}\text{Tb}$ ,  $^{165}\text{Ho}$ ,  $^{181}\text{Ta}$ ,  $^{197}\text{Au}$ ,  $^{208}\text{Pb}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$

выполнен детальный системный анализ данных по сечениям реакций  $(\gamma, xn)$ ,  $(\gamma, n)$  и  $(\gamma, 2n)$ , полученных с помощью пучков квазимоноэнергетических аннигиляционных фотонов в Ливерморе (США) и Саклэ (Франция). Установлено, что сечения реакций  $(\gamma, xn)$ , полученные в обеих лабораториях без учета множественности фотонейтронов, во всех исследованных областях энергий различаются на  $\sim 10 - 15 \%$ . Вместе с тем, обнаружено, что расхождения сечений парциальных реакций  $(\gamma, n)$  и  $(\gamma, 2n)$ , полученных в обеих лабораториях с учетом множественности фотонейтронов, оказываются не только заметно большими (до  $30 - 40 \%$ ) по величине, но и, как правило, направленными в разные стороны. Эти расхождения были интерпретированы как следствия различий процедур определения множественности фотонейтронов: некорректность такой процедуры, использованной в Саклэ, приводит к тому, что часть нейтронов из реакции  $(\gamma, 2n)$  ошибочно приписывается реакции  $(\gamma, n)$ . Для преодоления обнаруженных расхождений данных обеих лабораторий был использован специальный метод. Суть его заключается в том, что данные для сечений реакций  $(\gamma, n)$ , полученные в Саклэ, специальным образом пересчитываются, и при этом часть сечения реакции  $(\gamma, n)$ , ошибочно отнесенная к одно-нейтронной реакции, возвращается обратно в сечение двух-нейтронной реакции. Для всех 19 перечисленных выше ядер оцененные (взаимно скорректированные) сечения реакций  $(\gamma, xn)$ ,  $(\gamma, n)$  и  $(\gamma, 2n)$  оценены и подготовлены для включения в полную базу данных по ядерным реакциям системы EXFOR.