

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. М.В.ЛОМОНОСОВА

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ им. Д.В.СКОБЕЛЬЦИНА

В.В.Варламов, Б.С.Ишханов, И.В.Макаренко, В.Н.Орлин, Н.Н.Песков

**ОЦЕНКА СЕЧЕНИЙ ФОТОНЕЙТРОННЫХ РЕАКЦИЙ
НА ЯДРЕ ^{127}I**

Препринт НИИЯФ МГУ - 2006 - 9/808

Москва 2006

УДК 539.17
ББК 22.386

V.V. Varlamov, B.S.Ishkhanov, I.V.Makarenko, V.N.Orlin, N.N.Peskov

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

EVALUATION OF ^{127}I PHOTONEUTRON REACTION CROSS SECTIONS

Preprint MSU SINP - 2006 - 9/808

Joint combined evaluation of total (γ, xn) and (γ, sn) and partial (γ, n), ($\gamma, 2n$) and ($\gamma, 3n$) photoneutron reactions cross sections for ^{127}I was carried out based on the results of investigation of those in experiments used the bremsstrahlung and quasimonoenergetic annihilation photon beams. The reasons of data disagreements were analyzed, the values of normalization factors for putting all data in consistency to each other were obtained. The evaluated cross sections energy dependencies were obtained, integrated cross section values have been calculated.

В.В.Варламов, Б.С.Ишханов, И.В.Макаренко, В.Н.Орлин, Н.Н.Песков

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

ОЦЕНКА СЕЧЕНИЙ ФОТОНЕЙТРОННЫХ РЕАКЦИЙ НА ЯДРЕ ^{127}I

Препринт НИИЯФ МГУ - 2006 - 9/808

Выполнена совместная оценка сечений полных (γ, xn) и (γ, sn), а также парциальных (γ, n), ($\gamma, 2n$) и ($\gamma, 3n$) фотонейтронных реакций на ядре ^{127}I по результатам их исследования в экспериментах, проведенных в разных лабораториях с помощью пучков тормозного γ -излучения и квазимоноэнергетических аннигиляционных фотонов. Проанализированы причины расхождения данных, получены величины нормализующих множителей, согласующих данные друг с другом. Получены энергетические зависимости оцененных сечений реакций, рассчитаны интегральные сечения.

© В.В.Варламов, Б.С.Ишханов, И.В.Макаренко,
В.Н.Орлин, Н.Н.Песков, 2006
© НИИЯФ МГУ, 2006

Оценка сечений фотонейтронных реакций на ядре ^{127}I .

В.В.Варламов, Б.С.Ишханов, И.В.Макаренко, В.Н.Орлин, Н.Н.Песков.

В настоящее время в НИИЯФ МГУ разрабатывается программа фотоядерных исследований на новом электронном ускорителе нового поколения - разрезном микротроне НИИЯФ МГУ с максимальной энергией ускоряемых электронов 70 МэВ. Его характеристики делают возможным проведение эффективных измерений сечений не только полных, но и парциальных фотоядерных, прежде всего, фотонейтронных реакций. В этой связи большой интерес представляет анализ современной ситуации с экспериментальными и оцененными данными по сечениям фотонейтронных реакций с различной множественностью образующихся частиц, таких как (γ, n) , $(\gamma, 2n)$, $(\gamma, 3n)$ и т.д. Прежде всего, это относится к ядрам, на которых эти реакции могут быть исследованы прямыми методами, например, методом наведенной активности в условиях минимальной конкуренции от подобных процессов на соседних изотопах. Среди относительно небольшого количества изотопов, удовлетворяющих подобным условиям, выделяется ядро ^{127}I . Во-первых, это – моноизотоп (распространенность в естественной смеси – 100 %), а, следовательно, конкуренция других изотопов исключена. Во-вторых, периоды полураспада изотопов йода, образующихся в фотонейтронных реакциях различной множественности на ядре ^{127}I , оказываются вполне подходящими (Таблица 1) для использования современных вариантов метода наведенной активности.

Таблица 1.

Характеристики основных фотонейтронных реакций на ядре ^{127}I

Реакция	Энергетический порог, МэВ	Конечное ядро	Период полураспада
(γ, n)	9.1	^{126}I	13.11 дн
$(\gamma, 2n)$	16.2	^{125}I	59.4 дн
$(\gamma, 3n)$	25.8	^{124}I	4.18 дн
$(\gamma, 4n)$	33.3	^{123}I	13.27 час

Исследование энергетических зависимостей сечений различных фотонейтронных реакций на ядре ^{127}I в разное время было выполнено с помощью пучков как квазимоноэнергетических аннигиляционных (КМА) фотонов так и тормозного γ -излучения (ТИ). Наиболее точные и полные данные первого типа были получены в Ливерморе (США) /1, 2/ и Саклэ (Франция) /3/, второго – в Мельбурне (Австралия) /4/.

В работе /1/ приведены сечения реакций

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

$$(\gamma, sn) = (\gamma, n) + (\gamma, 2n) + (\gamma, 3n) = (\gamma, xn) - (\gamma, 2n) - 2(\gamma, 3n) \quad (2)$$

(γ, n) , $(\gamma, 2n)$ и $(\gamma, 3n)$ реакций, в работе /2/ - только (γ, xn) , в работе /3/ - (γ, xn) , (γ, sn) , (γ, n) , $(\gamma, 2n)$, в работе /4/ - только (γ, sn) и $(\gamma, 2n)$, из которых до порога B_{3n} реакции $(\gamma, 3n) = 25.8$ МэВ суммированием ((1), (2)) может быть получено и сечение реакции $(\gamma, xn) = (\gamma, sn) + (\gamma, 2n)$.

К сожалению, результаты всех трех упомянутых экспериментов заметно расходятся, что хорошо видно на Рис. 1. Так, амплитуды максимумов ГДР, расположенных в сечениях трех реакций (γ, xn) , (γ, sn) , и (γ, n) при энергиях около 15 МэВ должны совпадать между собой, поскольку порог реакции $(\gamma, 2n)$ составляет $B_{2n} = 16.3$ МэВ. Однако данные об этих амплитудах заметно расходятся (Таблица 2).

Таблица 2.

Сравнение данных о различных параметрах ГДР ядра ^{127}I .

Положение максимума, МэВ	Амплитуда максимума, мб	Лаборатория	Интегральное сечение		Пучок	Ссылка
			интегрирование до E^{int} , МэВ	σ^{int} , МэВ•мб		
14.98	222.61	Ливермор	16.0	841.7	КМА	/1/
			22.5	1764.3		
			25.0	1954.1		
			30.0	2171.0		
14.94	252.26	Ливермор	16.0	921.9	КМА	/2/
14.88	309.00	Саклэ	16.0	1158.3	КМА	/3/
			22.5	2228.4		
			25.0	2388.5		
15.20	289.53	Мельбурн	16.0	1051.3	ТИ	/4/
			22.5	1912.1		

Следует отметить, что работа /2/ была специально выполнена с целью определения причин и устранения значительных расхождений (в случае обсуждаемого ядра ^{127}I - 222.61 и 309.00 мб /1, 3/) данных об амплитуде ГДР для 5 ядер Zr, I, Pr, Au и Pb, полученных ранее помощью практически идентичных методик КМА-экспериментов в Саклэ и Ливерморе. Было установлено, что причинами обсуждаемых расхождений могут быть погрешности в определении как потока налетающих фотонов и эффективности нейтронного детектора.

В качестве способа преодоления существенных наблюдающихся расхождений было предложено /2/ изъять из обращения данные работы /1/, заменив их данными работы /2/. Это заметно улучшило согласие амплитуд обоих сечений реакций (252.00 и 309.00 мб), однако полностью проблему не сняло. Для согласования данных было предложено уменьшить данные работы /3/ с помощью нормировочного коэффициента $0.82 \approx 252.26/309.00$.

Именно в связи с этим обстоятельством работа /4/, выполненная в Мельбурне с помощью альтернативной методики определения сечений фотоядерных реакций с помощью пучка тормозного γ -излучения (измерение кривой выхода с последующим извлечением из него сечения с помощью метода Пенфолда-Лейсса с переменным шагом анализа), по существу была заявлена как независимый эксперимент по определению сечения реакции $^{127}\text{I}(\gamma, xn)$. Полученные в этой работе новые данные о положении, форме и амплитуде ГДР ядра ^{127}I были проанализированы совместно с результатами работ /2, 3/. К анализу привлекались также данные по другим ядрам экспериментов на пучках меченых фотонов /5/. Были сделаны выводы о том, что значительные расхождения полученных данных с данными работы /2/ объяснения так и не получают (при этом результаты работы /1/ вообще не рассматривались), согласие же с данными работы /3/ (и в определенном смысле – с данными работы /5/) может быть достигнуто путем введения для них дополнительного согласующего множителя $0.9 \approx 289.53/309.00$.

Из сказанного выше очевидна противоречивость предлагавшихся методов устранения обсуждаемых расхождений абсолютных величин сечений фотонейтронных реакций на ядре ^{127}I . Так, в работе /2/ предлагалось отказаться от использования данных работы /1/, считать эталоном данные именно работы /2/, а данные работы /3/ привести к ним, как упомянуто выше, путем значительного уменьшения (умножения на коэффициент 0.82). В то же время, в работе /4/ данные работы /1/ фактически не рассматриваются, предлагается отказаться и от использования данных работы /2/, истинным сечением считать данные именно работы /4/, а данные работы /3/ согласовать с ними, уменьшив, как тоже уже отмечалось, путем умножения на коэффициент 0.9.

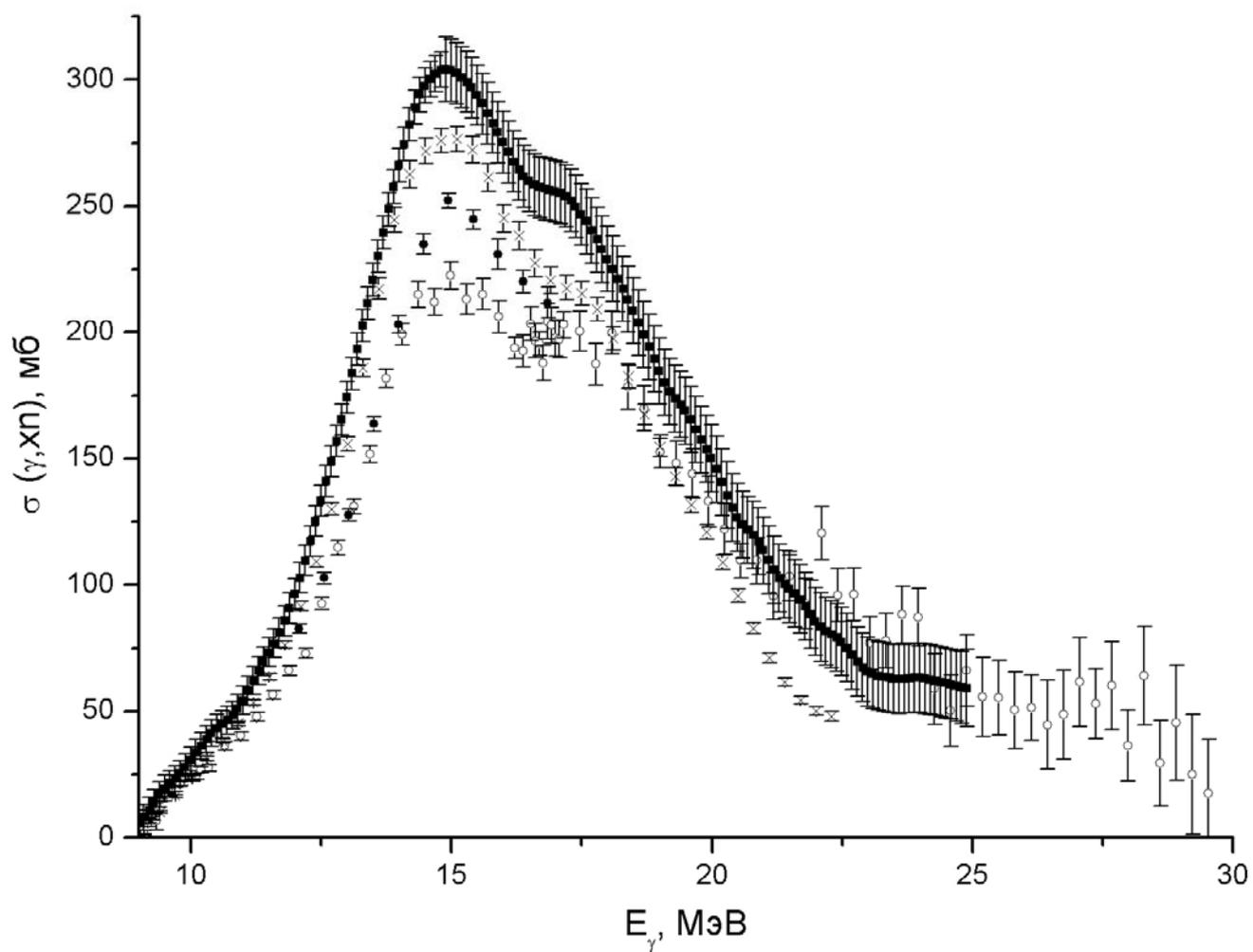


Рис. 1. Сравнение экспериментальных данных по сечению реакции $^{127}\text{I}(\gamma, xn)$:

- кружки пустые – данные Ливермора /1/;
- кружки заполненные – данные Ливермора /2/;
- квадраты – данные Саклэ /3/;
- кресты – сечение, полученное суммированием данных /4/ по сечениям реакций (γ, sn) и $(\gamma, 2n)$.

Дополнительно при сравнении между собой данных, приведенных на Рис. 1 и в Таблице 2, обращает на себя внимание и то, что максимумы в сравниваемых сечениях оказываются расположенными при несколько различных энергиях (14.88 – 15.20 МэВ). При этом очевидно, что и форма сечений реакции в области энергий, как слева, так и справа от положения максимума ГДР оказывается слегка различной. Так, например, отношение амплитуд сечений, полученных в Мельбурне /4/ и Ливерморе /2/, равно 1.3 (289.53/222.61), тогда как отношение их интегральных сечений, рассчитанных до энергии 16.0 МэВ – 1.25, а до энергии 22.5 – 1.08. Аналогичные отношения для данных Мельбурна /4/ и Саклэ /3/ имеют значения соответственно 0.94, 0.92, 0.85. Кроме того, видно, что во всех обсуждаемых экспериментах в сечении реакции в области максимума ГДР обнаружены структурные особенности, форма и амплитуда которых также различаются, что делает выполненный /4/ сравнительный анализ результатов разных экспериментов по амплитудным значениям сечений реакций не вполне надежным.

Противоречивость подобного подхода к согласованию данных разных экспериментов отмечалась в работах /6 - 7/: на основании систематики большого количества данных об интегральных сечениях полной фотонейтронной (γ, xn) реакции (1) были сделаны определенные выводы о природе систематических расхождений данных различных экспериментов и предложены пути их преодоления. С целью исследования количественных характеристик отмеченных выше расхождений результатов разных экспериментов на основании большого числа данных (525 сечений реакций), полученных в области энергий ГДР для ядер от ^3H до ^{238}U была проанализирована /8/ систематика специально рассчитанных отношений интегральных сечений. Для анализа выбирались данные именно по сечениям полной фотонейтронной реакции (1), поскольку они свободны от характерных для реакций другого типа расхождений, обусловленных различиями методик учета множественности фотонейтронов.

С целью выяснения влияния различных условий получения сечений реакций на их абсолютные величины были проанализированы /8/ отношения R значений интегральных сечений реакций (γ, xn), полученных в разных лабораториях, к значениям, полученным в одной из них (конкретно в Ливерморе):

$$r = R_{\text{сист}}^{\text{int}} = \sigma_{\text{р.л.}}^{\text{int}}(\gamma, xn) / \sigma_{\text{л}}^{\text{int}}(\gamma, xn) = \int \sigma_{\text{р.л.}}(E) dE / \int \sigma_{\text{л}}(E) dE, \quad (3)$$

где $\sigma_{\text{р.л.}}$ - сечения, полученные в разных лабораториях с помощью фотонных пучков различных типов, $\sigma_{\text{л}}$ - КМИ- сечения, полученные в Ливерморе, а интегрирование проводилось по области энергий, общей для всех экспериментальных результатов на каждом ядре (то есть для различных ядер эти области могли различаться).

С тем, чтобы по возможности избежать упомянутых проблем, связанных с измерением множественности фотонейтронов, интегральные сечения сравнивались в области энергий налетающих фотонов между энергетическими порогами реакций (γ, n) и ($\gamma, 2n$): тем самым, фактически анализировались (сравнивались) данные о реакции (γ, n) в области энергий до порога реакции ($\gamma, 2n$). Такие отношения интегральных сечений рассматривались потому, что величины интегральных сечений зависят от массового числа ядра-мишени, а следовательно для рассмотрения систематических различий нормировок отдельных экспериментов следует приводить данные различных типов к данным какого-либо одного типа, выбранного в качестве своеобразного «эталона». Выбор в качестве такого «эталона» данных из Ливермора не означал их какого-либо приоритета перед другими и был обусловлен лишь тем обстоятельством, что наибольшее количество КМА-данных было получено именно в Ливерморе.

Полученные значения отношения R (3) для всех исследованных ядер представлены на Рис. 2 и свидетельствуют о явном систематическом расхождении данных Ливермора с данными большинства других лабораторий. Видно, что среднее значение отношения $\langle R_{\text{сист}}^{\text{int}} \rangle \neq 1$, при этом отчетливо проявляется концентрация значений исследуемого отношения вокруг среднего значения $\langle r \rangle = \langle R_{\text{сист}}^{\text{int}} \rangle = 1.12 \pm 0.24$.

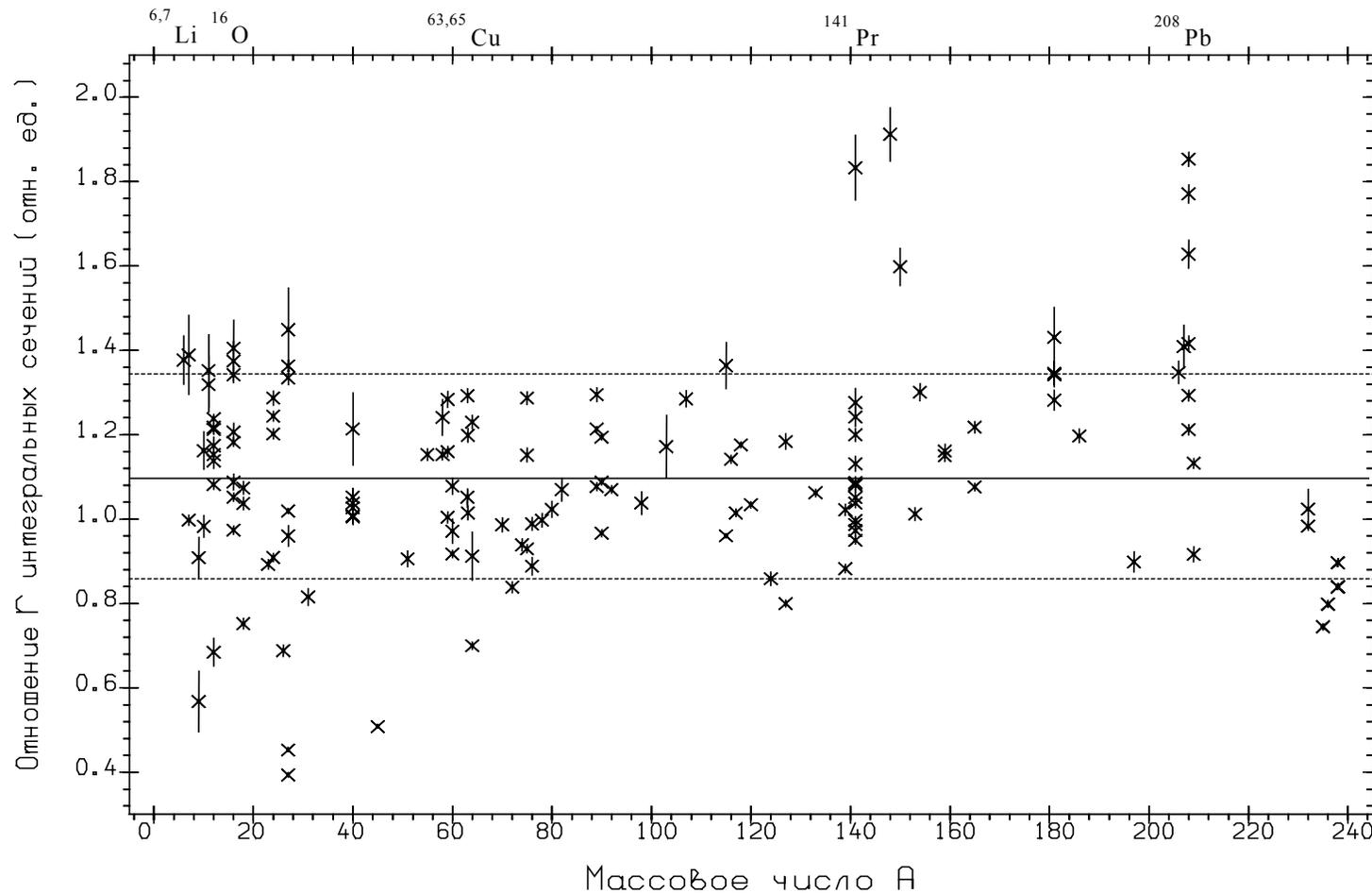


Рис. 2. Систематика /8/ значений отношения $r = R_{\text{сист}}^{\text{int}} = \sigma_{\text{р. л.}}^{\text{int}}(\gamma, xn) / \sigma_{\text{л}}^{\text{int}}(\gamma, xn)$ величин интегральных сечений полной фотонейтронной реакции до порога реакции $(\gamma, 2n)$ для различных ядер, полученных с помощью различных фотонных пучков в разных лабораториях и с помощью квазимоноэнергетических фотонов в Ливерморе. Сплошная линия - среднее значение $\langle r \rangle = \langle R_{\text{сист}}^{\text{int}} \rangle$. Пунктирные линии - границы области стандартного отклонения.

Полученные из приведенной систематики оценки величины и погрешности значения r (3) согласуются с данными работы /9/, в которой средняя величина отношения сечений фотонейтронных реакций для 12 ядер от ^{89}Y до ^{208}Pb , полученных в Ливерморе и Сакле, определенного аналогично отношению r (3), составила 1.16. Очевидно также, что между данными различных лабораторий существуют определенные расхождения (разброс данных от ~ 0.4 до ~ 1.9). Это фактически свидетельствует о наличии заметных погрешностей в нормировке сечений в разных экспериментах, не учтенных при обработке данных.

При анализе систематики, приведенной на Рис. 2, 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 (например, General Atomic (США), Pennsylvania (США), Illinois (США), Giessen (Германия)), так и с данными экспериментов с тормозным γ -излучением (выполненными преимущественно в Москве и Мельбурне (Австралия)). Полная систематика расхождений данных о сечении полной фотонейтронной реакции (γ, xn) , принималась во внимание в работе /7/, в которой проводилось взаимное согласование данных для 19 ядер, полученных, как в Саклэ, так и в Ливерморе. При этом с помощью специального метода определялись и учитывались погрешности в определении множественности фотонейтронов в экспериментах, выполненных в Саклэ /7, 9/.

При анализе данных работы /1/ было показано /7/, что, несмотря на расхождение данных для полной фотонейтронной реакции (γ, xn) с результатами других экспериментов, сечения этой реакции и парциальных реакций (γ, sn) , (γ, n) , $(\gamma, 2n)$ из работы /1/ согласованы между собой, поскольку недостатков в процедуре определения множественности фотонейтронов (в отличие от ситуации с данными Саклэ) не обнаружено. В работе /2/ специально отмечалось, что обсуждаемые расхождения абсолютных величин сечений реакций могут быть обусловлены такими причинами, как, например, погрешности в определении потоков фотонов, вызывающих реакции, и эффективности регистрации фотонейтронов различных энергий.

Такого типа расхождения экспериментальных сечений реакций могут быть относительно просто устранены путем введения специального нормировочного множителя.

Поскольку в работе /2/ было получено только сечение полной фотонейтронной (γ, xn) реакции (1) и лишь в 11 точках в очень узкой области энергий от 12.1 до 16.9 МэВ, а в работе /1/ измерения были выполнены для очень большого количества значений в широком диапазоне энергии налетающих фотонов и, как отмечалось выше, для четырех реакций (γ, xn) , (γ, sn) , (γ, n) , $(\gamma, 2n)$, для анализа данных по фоторасщеплению ядра ^{127}I (согласованной оценки сечений как полной, так и парциальных фотонейтронных реакций) были использованы /7/ данные работы /1/. При проведении такой оценки было показано, что:

1. экспериментальные данные по сечениям полной фотонейтронной реакции (γ, xn) , полученные в Ливерморе, расходятся с данными других лабораторий; их согласие с большинством данных достигается путем дополнительной нормировки с помощью коэффициентов R (3); для исследованных специально /7/ 19 ядер (^{51}V , ^{75}As , ^{89}Y , ^{90}Zr , ^{115}In , $^{116,117,118,120,124}\text{Sn}$, ^{127}I , ^{133}Cs , ^{159}Tb , ^{165}Ho , ^{181}Ta , ^{197}Au , ^{208}Pb , ^{232}Th , ^{238}U) оцененные сечения реакции (γ, xn) получены с использованием индивидуальных данных для каждого ядра

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

в других случаях без дополнительных исследований может использоваться коэффициент $\langle r \rangle = \langle R^{\text{int}}_{\text{сист}} \rangle = 1.12$, полученный /8/ на основе данных большой систематики;

2. экспериментальные данные по сечениям парциальных фотонейтронных реакций (γ, n) и ($\gamma, 2n$), полученные в Ливерморе, корректно согласуются между собой и с данными по сечениям полной фотонейтронной реакции (γ, xn); следовательно, по ним оцененные сечения могут быть также получены путем простой нормировки с использованием тех же значений $\langle r \rangle$ (или $R(xn)$);
3. экспериментальные данные по сечениям полной фотонейтронной реакции (γ, 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 (γ, n) и ($\gamma, 2n$), полученные в Саклэ, определены некорректно и должны быть пересчитаны с помощью предложенного метода совместной корректировки; такое 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 .

Результаты выполненной /7/ путем согласования данных Саклэ и Ливермора по сечениям фотонейтронных реакций различной множественности оценки для ядра ^{127}I приведены на Рис. 3.

При детальном анализе данных Ливермора и Саклэ в ходе проведения оценки /7/ было установлено, что в конкретном случае ядра ^{127}I расхождение данных работ /1, 4/ оказывается столь большим, что для согласования данных должен быть использован нормировочный коэффициент $R(xn)$ (4) = 1.34, заметно превосходящий $\langle r \rangle = R_{\text{сист}}^{\text{int}} = 1.12$.

Проведенное в работе /7/ систематическое согласование данных двух лабораторий, полученных с помощью пучков КМА-фотонов, было ориентировано, прежде всего, на устранение значительных расхождений в данных по сечениям парциальных фотонейтронных реакций (γ, n) и ($\gamma, 2n$). Результаты ТИ-экспериментов, в частности данные работы /4/ для ядра ^{127}I , не учитывались, поскольку прямыми методами, парциальные реакции, как правило, не могут быть выделены в этих экспериментах. В ТИ-экспериментах вклад сечения реакции ($\gamma, 2n$) в непосредственно определяемое в эксперименте сечение реакции (γ, xn) определяется, как правило, лишь с помощью теоретического расчета в рамках статистической модели. Именно таким способом были определены опубликованные в работе /4/ сечения реакций (γ, sn) и ($\gamma, 2n$), вследствие чего для новой оценки сечений парциальных реакций эти данные не использовались.

Ниже перечислены основные принципы новой оценки сечений полных и парциальных фотонейтронных реакций на ядре ^{127}I , выполненной в настоящей работе, основанные на учете всех обсуждавшихся выше особенностей исследования фоторасщепления этого ядра в различных экспериментах.

- 1) В работах /2, 6 – 8/ отмечалось, что в КМА-экспериментах значительные погрешности в определении абсолютных величин сечений реакций возможны вследствие неточностей в определении потока фотонов, вызывающих реакцию (типичная разностная процедура определения сечения реакции, невысокие интенсивности аннигиляционных фотонов).

В этой связи в новой оценке абсолютной величины сечения полной фотонейтронной реакции (γ, xn) предпочтение было отдано результату типичного ТИ-эксперимента /4/. Новые оценки данных Ливермора и Саклэ были получены при использовании специально полученных (Рис. 4) нормирующих множителей (соответственно – 1.20 ± 0.02 и 0.90 ± 0.02), согласующих данные и Ливермора и Саклэ с данными Мельбурна.

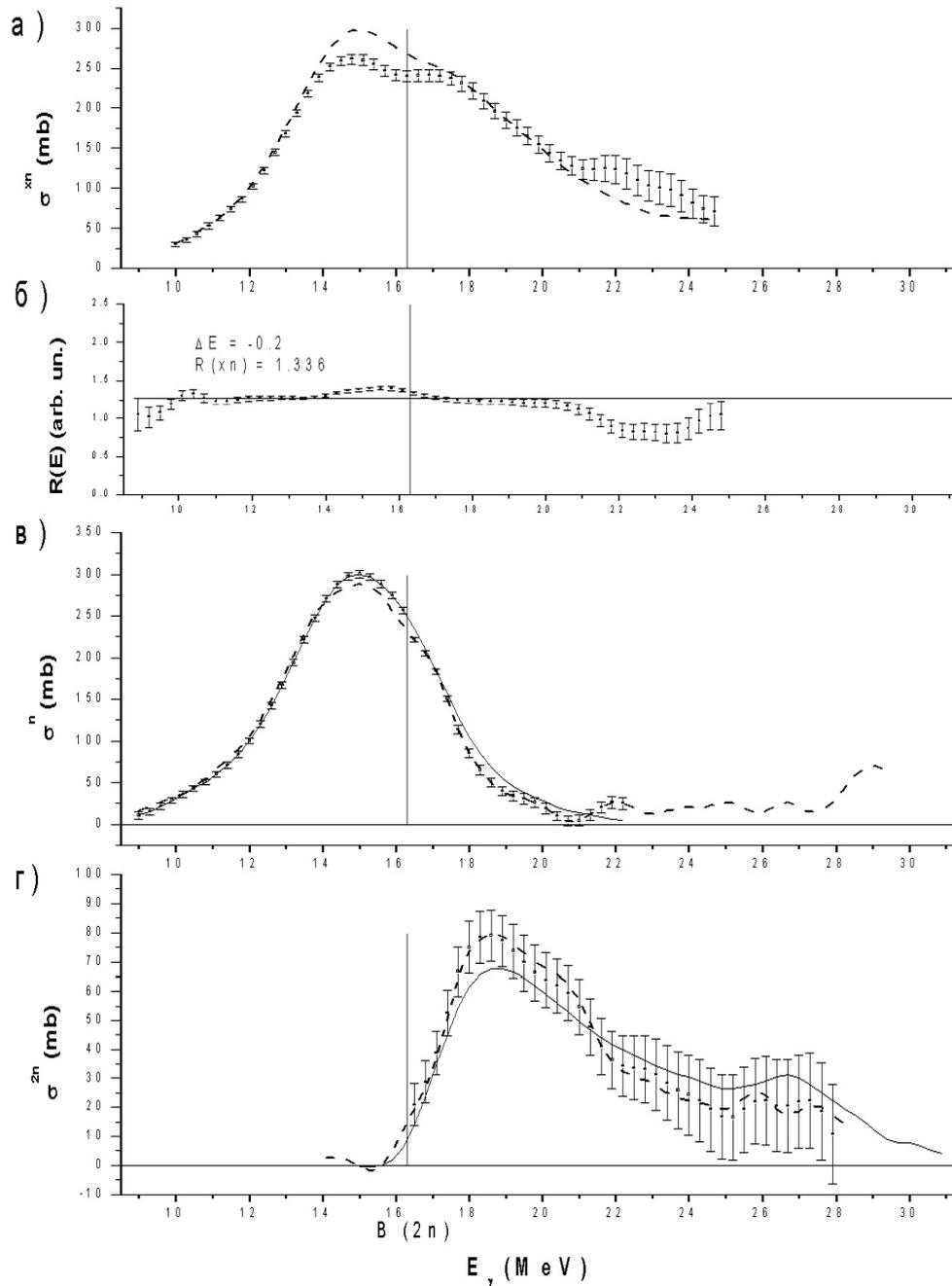


Рис. 3. Результаты взаимной корректировки сечений реакций, полученных в Саклэ и Ливерморе для ядра ^{127}I :

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

- 2) В работах /7, 9/ было установлено, что между данными различных экспериментов имеются различия в форме сечений и калибровке энергетической шкалы. Поэтому для достижения наибольшей точности в определении нормирующих множителей сечения реакций, полученные в Ливерморе и Мельбурне, сдвигались к данным Саклэ (первые в сторону меньших энергий на величину $\Delta E = 0.15$ МэВ, вторые – в сторону больших на величину $\Delta E = 0.05$ МэВ), таким образом, чтобы в области энергий от порога реакции (γ, n) до порога ($B(2n) = 16.2$ МэВ) реакции ($\gamma, 2n$), то есть в области, в которой множественность фотонейтронов точно равна 1, коэффициент $R(E)$ оказывался бы максимально близким к некоторому постоянному значению; процедура проводилась итерационно, коэффициент $R(E)$ рассчитывался в каждой точке $R(E) = \sigma_{\text{Саклэ}}(\gamma, xn) / \sigma_{\text{Ливермор}}(\gamma, xn)$; каждый раз после перевода обоих сравниваемых сечений на общую шкалу (интерполяция по Гауссу); после этого определялся коэффициент нормировки $R(x, n)$ (4).
- 3) В работе /7/ было показано, что в экспериментах, выполненных в Ливерморе (в отличие от выполненных в Саклэ), данные по сечениям реакций (γ, xn), (γ, sn), (γ, n) и ($\gamma, 2n$) согласованы между собой. Поэтому новые оцененные данные для этих реакций были получены при использовании нормирующего множителя (1.20 ± 0.02), согласующего сечение реакции (γ, xn) с результатами ТИ-эксперимента /4/.
- 4) В соответствии со сказанным, данные Саклэ, более корректные с точки зрения процедуры определения множественности фотонейтронов /7, 9/ - сечения реакций (γ, xn) и ($\gamma, 3n$) – были получены с использованием специально определенного нормирующего множителя (0.90 ± 0.02).

При анализе полученных результатов новой оценки следует особо отметить два весьма существенных обстоятельства:

- полученный при проведении новой оценки множитель 1.2, нормирующий данные Ливермора к данным Мельбурна, намного лучше соответствует полной систематике данных ($\langle r \rangle = 1.12$), приведенной на Рис. 2, чем использованный ранее в работе /7/ множитель 1.34; это является дополнительным аргументом в пользу сделанного при новой оценке предпочтения данных Мельбурна перед данными Саклэ при новой оценке абсолютной величины сечения реакции $^{127}\text{I}(\gamma, xn)$. Уменьшение нормирующего множителя очевидно связано с тем обстоятельством, что величина сечения Саклэ, использованного в работе /7/ для нормировки данных для ядра ^{127}I , оказывается завышенной;
- значение полученного при проведении новой оценки множителя 0.9, нормирующего данные Саклэ к данным Мельбурна, совпадает со значением, предложенным в работе /4/ для нормировки соответствующих данных в отличие от значения 0.82, предлагавшегося ранее в работе /2/.

Новые оценки сечений полных и парциальных фотонейтронных реакций на ядре $^{127}\text{I}(\gamma, xn)$, выполненные с помощью описанного выше подхода, приведены на Рис. 5. Данные о величинах соответствующих интегральных сечений представлены в Таблице 3.

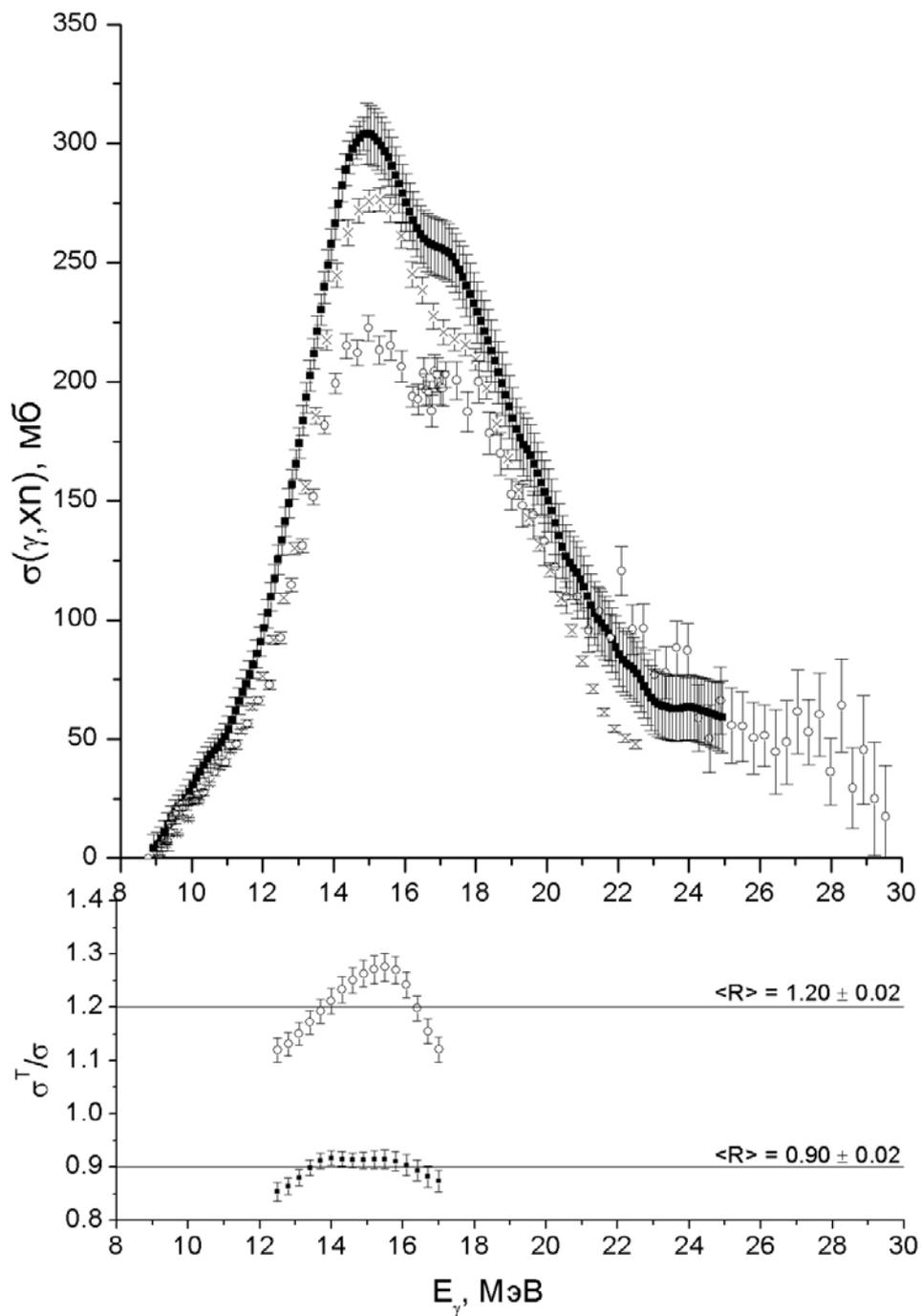


Рис. 4. Скорректированные (соответствующие сдвиги по энергии) сечения реакции $^{127}\text{I}(\gamma, xn)$ и их отношения.

Верхний рисунок – сечения реакций:

- кружки – данные Ливермора /1/,
- квадраты – данные Саклэ /3/,
- кресты – данные Мельбурна /4/.

Нижний рисунок – отношения сечений реакций:

- кружки - отношения σ^T/σ^L сечений, полученных в Мельбурне и Ливерморе ($\langle \sigma^T/\sigma^L \rangle = 1.2$);
- квадраты – отношения σ^T/σ^C сечений, полученных в Мельбурне и Саклэ ($\langle \sigma^T/\sigma^C \rangle = 0.9$).

Таблица 3.

Интегральные сечения полной и парциальных фотонейтронных реакций на ядре ^{127}I , определенные по новым оцененным сечениям реакций (Рис. 5).

Реакция	Интегральное сечение		Примечание
	интегрирование до E^{int} , МэВ	σ^{int} , МэВ•мб	
(γ, xn)	29.5	2605.8	
(γ, sn)	29.5	2075.7	
(γ, n)	29.5	1575.0	Без трех последних точек (Рис. 5) *)
	28.5	1508.4	
($\gamma, 2n$)	28.9	531.4	Без трех последних точек (Рис. 5) *)
	28.5	527.3	
($\gamma, 3n$)	31.2	27.7	

Сделанные в Таблице 3 примечания *) требуют некоторого комментария. Как видно на Рис. 5, в области энергий выше 28.5 МэВ в сечении реакции (γ, n) наблюдается отчетливо проявляющийся выброс до значения ~ 100 мб, а в сечении реакции ($\gamma, 2n$) – провал до отрицательных значений до ~ 15 мб. Мощный положительный максимум в сечении реакции (γ, n) в этой области энергий должен был бы проявиться и в сечениях полных реакций (1) и (2). Однако величины сечений обеих полных реакций в этой области энергий не превышают значения 50 мб. Очевидно, что такое соотношение сечений двух реакций связано с отчетливо антикоррелирующим нефизическим провалом в сечении реакции ($\gamma, 2n$), который при соответствующем суммировании компенсирует упомянутый выброс, проявляющийся в сечении реакции (γ, n), в обоих полных сечениях (1, 2). Следовательно, и выброс в сечении реакции (γ, n) и провал в сечении реакции ($\gamma, 2n$) являются результатом проявления определенных погрешностей процедуры разделения фотонейтронов по множественности, не нашедших объяснения в работе /1/. В этой связи, поскольку речь идет о высокоэнергетических областях сечений реакций (γ, n) и ($\gamma, 2n$), в качестве оцененных величин соответствующих интегральных сечений целесообразно использовать значения (Таблица 3), рассчитанные до энергий 28.5 МэВ.

Специально может быть прокомментирована еще одна особенность полученных новых оцененных данных. Выше отмечалось, что в работе /4/ разделение фотонейтронов по множественности проводилось традиционным для ТИ-экспериментов методом при использовании теоретических расчетов в рамках статистической модели ядерных реакций. В работах /7, 9/ был сделан вывод о том, что в Ливерморе в целом, и в частности, в работе /1/, такое разделение проводилось более корректно, что и было использовано и в настоящей работе. Это позволяет сравнить два метода разделения фотонейтронов по множественности по соотношению между собой величин сечений реакций (γ, sn) и ($\gamma, 2n$). В настоящей работе соотношение амплитуд сечений реакции (γ, sn) оказывается в пользу ТИ-эксперимента (289.5 и 267.1 мб), а соотношение амплитуд реакции ($\gamma, 2n$) – напротив, в пользу настоящей работы (80.5 и 73.3 мб). Таким образом, может быть сделан вывод о том, что величина сечения реакции ($\gamma, 2n$), определенная в работе /4/ на основе экспериментальных данных для сечения реакции (γ, xn) и вклада в него сечения реакции (γ, n), рассчитанного в рамках статистической теории ядерных реакций, оказалась заниженной.

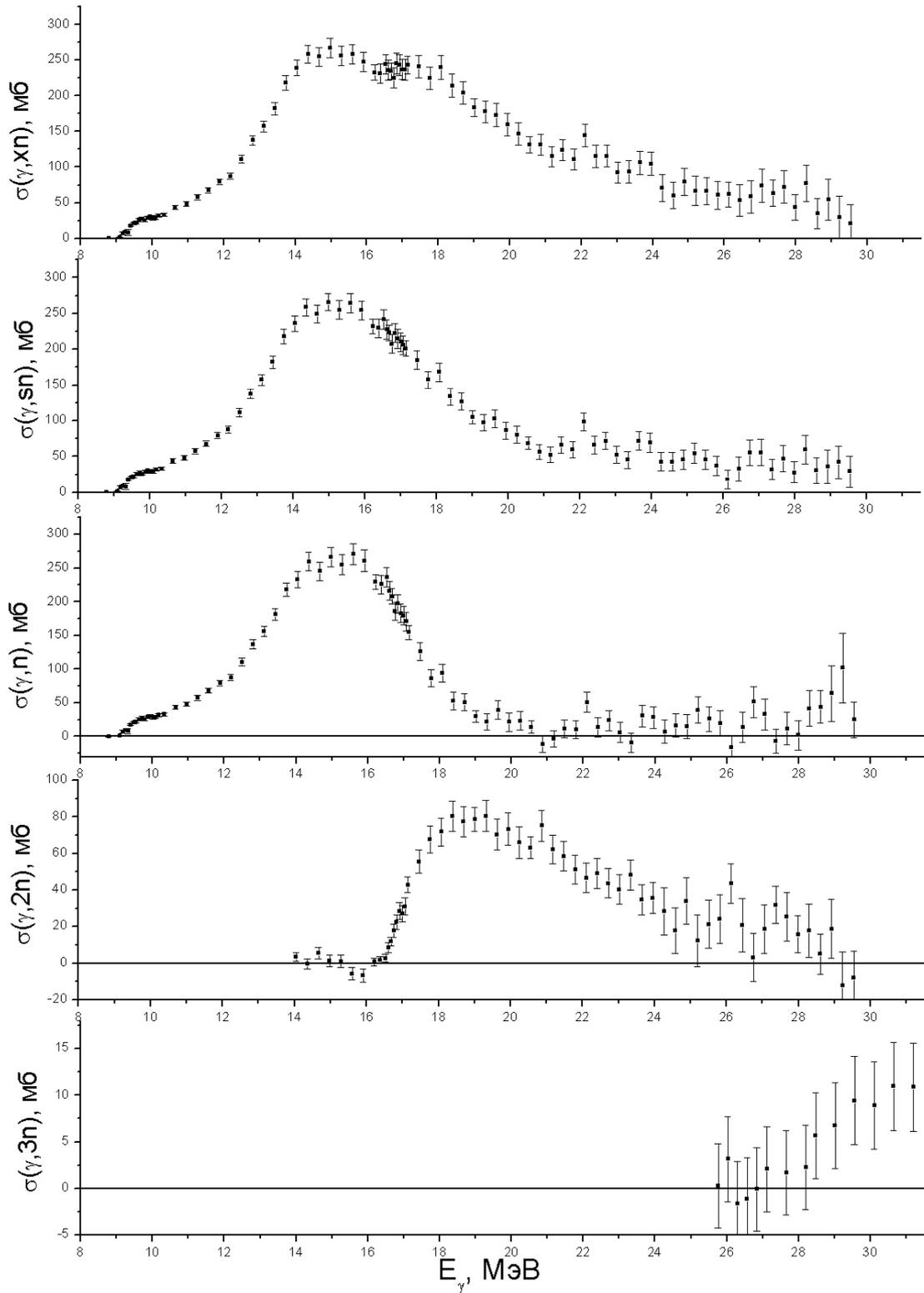


Рис. 5. Новые оцененные данные по сечениям фотонейтронных реакций на ядре ^{127}I (сверху-вниз):

- реакция $(\gamma, xn) = (\gamma, n) + 2(\gamma, 2n) + 3(\gamma, 3n)$,
- реакция $(\gamma, sn) = (\gamma, n) + (\gamma, 2n) + (\gamma, 3n)$,
- парциальная реакция (γ, n) ,
- парциальная реакция $(\gamma, 2n)$,
- парциальная реакция $(\gamma, 3n)$.

Литература.

1. R.L.Bramblett, J.T.Caldwell, B.L.Berman, R.R.Harvey, S.C.Fultz. Photoneutron cross sections of ^{141}Pr and ^{127}I from threshold to 33 MeV. Phys.Rev.,148 (1966) 1198.
2. B.L.Berman, R.E.Pywell, S.S.Dietrich, M.N.Thompson, K.G.Mcneill, J.W.Jury. Absolute photoneutron cross sections for Zr, I, Pr, Au, and Pb. Phys.Rev., C36, (1987) 1286.
3. R.Bergere, H.Beil, P.Carlos, A.Veyssiere. Photoneutron cross Sections of I, Ce, Sm, Er, and Lu. Nucl.Phys., A133 (1969) 417.
4. R.P.Rassool, M.N.Thompson. Absolute photoneutron cross section of ^{127}I . Phys.Rev., C39 (1989) 1631.
5. L.M.Young, Photoneutron cross-sections and spectra from monoenergetic photons on yttrium, praseodymium, lead, and bismuth in the giant-resonance. Ph.D. thesis, University of Illinois, 1972.
6. V.V.Varlamov, B.S.Ishkhanov. Study of Consistency Between (γ, xn) , $[(\gamma, n) + (\gamma, np)]$ and $(\gamma, 2n)$ Reaction Cross Sections Using Data Systematics. Vienna, Austria. INDC(CCP)-433, IAEA NDS, Vienna, Austria, 2002, p. 1.
7. В.В.Варламов, Н.Н.Песков, Д.С.Руденко, М.Е.Степанов. Согласованная оценка сечений фотонейтронных реакций по данным, полученным в экспериментах на пучках квазимоноэнергетических аннигиляционных фотонов в Ливерморе (США) и Сакле (Франция). Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерные константы, № 1 - 2 (2003) 48.
8. В.В.Варламов, Н.Г.Ефимкин, Б.С.Ишханов, В.В.Сапуненко. Оценка сечений фотоядерных реакций с помощью метода редукции в условиях значительных систематических погрешностей. Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерные константы, 1 (1993) 52.
9. E.Wolyneć, M.N.Martins. Photoneutrons cross sections measured by Saclay and Livermore. Revista Brasileira Fisica, 17 (1987) 56.

**Владимир Васильевич Варламов,
Борис Саркисович Ишханов,
Ирина Витальевна Макаренко,
Вадим Николаевич Орлин,
Николай Николаевич Песков**

**ОЦЕНКА СЕЧЕНИЙ ФОТОНЕЙТРОННЫХ РЕАКЦИЙ
НА ЯДРЕ ^{127}I**

Препринт НИИЯФ МГУ - 2006 – 9/808

Работа поступила в ОНТИ 30.06.2006.