

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

имени М.В.Ломоносова

Научно-исследовательский институт ядерной физики

имени Д.В.Скобельцына

На правах рукописи

Песков Николай Николаевич

**ОЦЕНКА СЕЧЕНИЙ ФОТОНЕЙТРОННЫХ РЕАКЦИЙ,
ПОЛУЧЕННЫХ НА ПУЧКАХ АННИГИЛЯЦИОННЫХ
И ТОРМОЗНЫХ ФОТОНОВ**

Специальность – 01.04.16

Физика атомного ядра и элементарных частиц

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Москва 2007

Работа выполнена в Отделе электромагнитных процессов и взаимодействий атомных ядер Научно-исследовательского института ядерной физики им. Д.В.Скобельцына Московского государственного университета им. М.В.Ломоносова.

Научный руководитель доктор физико-математических наук
профессор Владимир Васильевич
Варламов

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор Евгений Александрович
Романовский (Отдел научно-технической
информации, НИИЯФ МГУ)

кандидат физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник Анатолий
Иванович Блохин (ГНЦ «Физико-
энергетический институт», г. Обнинск)

Ведущая организация: Институт ядерных исследований
Российской академии наук (г. Москва)

Защита состоится “1” марта 2007 года в 15 час. на заседании
Диссертационного совета К 501.001.06 в Московском Государственном
университете им. М.В.Ломоносова.

Адрес: 119992, Москва, Ленинские горы, НИИЯФ МГУ, 19-й корпус,
аудитория 2-15.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИИЯФ МГУ.
Автореферат разослан “29” января 2007 года.

Ученый секретарь
Диссертационного совета К 501.001.06
кандидат физико-математических наук



О.В.Чуманова.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации определяется, прежде всего, тем, что решение сформулированных в ней задач позволяет в значительной степени преодолеть существующие трудности исследований природы и свойств гигантского дипольного резонанса (ГДР), наблюдаемого в энергетических зависимостях сечений фотоядерных реакций в различных экспериментах. Изучение свойств ГДР сыграло и продолжает играть важную роль в становлении современных представлений о структуре и динамике атомного ядра, механизмах ядерных реакций.

Экспериментальные исследования ГДР представляют собой весьма непростую задачу, в первую очередь, вследствие отсутствия до настоящего времени интенсивных пучков моноэнергетических фотонов. Такое положение дел требует использования разнообразных методов создания условий, в которых эффективный энергетический спектр фотонов с теми или иными допущениями может рассматриваться как близкий к моноэнергетическому. Такие методы зачастую весьма сильно различаются, следствием чего является наличие расхождений в данных. Существенные расхождения в фотоядерных данных представляют серьезную проблему при интерпретации результатов различных экспериментов и часто не позволяют детально изучить многие эффекты, связанные с особенностями возбуждения и распада высоковозбужденных состояний ядер.

Все это делает весьма актуальной и задачу получения точных надежных данных о сечениях фотоядерных реакций на основании анализа результатов разных экспериментов в условиях, когда результаты отдельных экспериментов не согласуются друг с другом. Она связана с проблемой определения и учета систематических погрешностей отдельных результатов и для своего решения требует:

- накопления информации, полученной в разных экспериментах, создания соответствующего банка данных;

- совместного анализа всей совокупности накопленных данных с учетом условий тех экспериментов, в которых они были получены, исследования причин расхождения данных в разных экспериментах;
- разработки методов учета влияния этих причин на результат каждого конкретного эксперимента.

Решение проблем оценки не согласующихся данных и получения данных, свободных от систематических погрешностей, во многих случаях создает возможности для получения новой информации о полных и парциальных сечениях фотоядерных реакций, сечениях многочастичных реакций, а, следовательно, и о каналах распада ГДР. Такая информация, в свою очередь, позволяет на качественно новом уровне провести новые детальные исследования особенностей фоторасщепления атомных ядер.

Актуальным исследованиям широкого круга вопросов (систематика, причины, методы устранения, новые данные, физические последствия), связанных с проблемой существенных систематических расхождений результатов различных экспериментов, прежде всего, выполненных на пучках квазимоноэнергетических аннигиляционных фотонов в Саклэ (Франция) и Ливерморе (США), в первую очередь, применительно к данным по сечениям парциальных фотонейтронных реакций (γ, n) и $(\gamma, 2n)$, а дополнительно и полных фотонейтронных реакций (γ, xn) и (γ, sn) , и посвящена настоящая работа.

Основными целями диссертационной работы являлись создание полной БД по ядерным реакциям, проведение с ее помощью детального анализа известных значительных систематических расхождений результатов различных фотоядерных экспериментов, разработка методов учета и устранения таких расхождений, получение новых проанализированных, взаимно скорректированных и согласованных точных и надежных данных по сечениям различных фотоядерных реакций, а также использование новых

данных для оценки ряда физических эффектов, непосредственно зависящих от соотношения сечений различных парциальных фотоядерных реакций.

Научная новизна и практическая значимость работы заключаются в следующем:

- в рамках международной Сети Центров ядерных данных МАГАТЭ создана новая полная база данных (БД) по ядерным реакциям под действием фотонов, нейтронов, заряженных частиц и тяжелых ионов, предоставляющая пользователям уникальные возможности единого подхода к анализу результатов различных экспериментов с использованием формализованных сведений об условиях их получения (лаборатория, тип пучка налетающих γ -квантов, тип детектора, способ определения множественности фотонейтронов и др.);
- впервые выполнены системные исследования, позволившие с единых позиций подойти к проблемам определения причин и разработки методов устранения систематических расхождений результатов различных фотоядерных экспериментов;
- получено значительное количество новых данных по сечениям полных и парциальных фотонейтронных реакций (γ, xn) , (γ, sn) , (γ, n) и $(\gamma, 2n)$ для 19 ядер (^{51}V , ^{75}As , ^{89}Y , ^{90}Zr , ^{115}In , $^{116,117,118,120,124}\text{Sn}$, ^{127}I , ^{133}Cs , ^{159}Tb , ^{165}Ho , ^{181}Ta , ^{197}Au , ^{208}Pb , ^{232}Th , ^{238}U), согласованных между собой и свободных от обсуждаемых систематических погрешностей;
- выполнены новые оценки таких физических эффектов как, соотношения величин интегральных сечений реакции фотопоглощения с предсказаниями дипольного правила сумм, а также прямых и статистических процессов в нейтронном канале распада ГДР;
- решены некоторые актуальные проблемы мониторингирования пучков современных суперколлайдеров.

Научная достоверность полученных результатов подтверждается применением строгих методов их обработки и анализа, а также их согласием с соответствующими результатами известных экспериментальных работ.

Автор выносит на защиту следующие результаты:

- 1) впервые созданная новая полная база данных по характеристикам ядерных реакций под действием фотонов, нейтронов, заряженных частиц и тяжелых ионов с уникальной мощной и гибкой поисковой системой (<http://cdfе.sinp.msu.ru/exfor/index.php>);
- 2) впервые полученные результаты детального анализа систематических расхождений сечений полных и парциальных фотонейтронных реакций, систематика зависимости этих расхождений от особенностей выполненных экспериментов;
- 3) метод взаимного согласования и корректировки результатов различных экспериментов по сечениям парциальных фотонейтронных реакций, основанный на учете особенностей использованных методик определения множественности фотонейтронов;
- 4) новые данные по сечениям полных и парциальных реакций для 19 ядер 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), взаимно согласованные между собой и с результатами других экспериментов, свободные от обсуждаемых систематических расхождений;
- 5) новые оценки соотношений интегральных сечений полного фотопоглощения с предсказаниями дипольного правила сумм;
- 6) новые оценки соотношения прямых и статистических процессов в нейтронном канале распада ГДР;
- 7) результаты использования оцененных реакций (γ, n) , $(\gamma, 2n)$ и $(\gamma, 3n)$ для существенного повышения точности расчётов сечений

электромагнитной диссоциации, используемых для решения проблем мониторинга пучков суперколлайдеров.

Апробация работы. Основные результаты и положения диссертации опубликованы, представлены и обсуждены на международных и всероссийских научных и научно-технических конференциях:

- Всероссийская конференция по электронным библиотекам «RCDL'2001 – 2006».
- Всероссийская научно-методическая конференция «Телематика'2002, 3 – 6 июня 2002 г., Санкт-Петербург.
- Всероссийская научная конференция «Научный сервис в сети Интернет», Новороссийск, 2002 - 2006 гг.
- Международное совещание по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра «Ядро-2003 - 2006».
- IAEA Consultant's Meeting on the Co-ordination of Nuclear Reaction Data Centres, 2003 – 2006 гг.
- International Conference on Nuclear Data for Science and Technology. Santa Fe, New Mexico, 26 September – 1 October 2004.

Публикации.

Всего опубликованы 22 печатные работы: 3 статьи в журналах («Ядерная физика», «Известия РАН, серия физическая», «Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерные константы»); 2 препринта НИИЯФ МГУ, 11 докладов и 6 тезисов докладов на международных и всероссийских научных и научно-технических конференциях. Список 8 работ, в которых опубликованы основные результаты диссертации, представлен ниже.

Все результаты, представленные в диссертации, получены самим автором, либо при его непосредственном участии.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, содержит 164 страницы, 77 рисунков и 17 таблиц и 7 страниц Приложения с иллюстрациями работы созданной базы данных по ядерным реакциям. Список литературы содержит 91 наименование.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **Введении** описаны актуальность, основные цели, научная новизна практическая значимость, а также структура диссертационной работы.

Глава 1 посвящена рассмотрению основных систематических расхождений данных по сечениям фотонейтронных реакций, обусловленных особенностями различных фотоядерных экспериментов.

Особенностью экспериментов с тормозным γ -излучением (ТИ) является то, что энергетический спектр налетающих фотонов является сплошным (непрерывно и плавно спадающая функция), вследствие чего искомое сечение реакции $\sigma(E)$ не может быть измерено прямо, а извлекается из информации о ее выходе с помощью одного из нескольких широко известных методов («разности фотонов», «обратной матрицы», «Пенфолда-Лейсса», «наименьшей структуры (метод Кука)», «регуляризации (метод Тихонова)» и ряда других) решения неустойчивой обратной задачи.

Метод, основанный на получении квазимоноэнергетических аннигиляционных (КМА) фотонов “непосредственно” в эксперименте был предложен как альтернатива процедуре решения неустойчивой обратной задачи и был призван обеспечить прямое измерение сечения реакции. Использован эффект образования фотонов с энергией $E_\gamma = E_{e^+} + 0.511$ МэВ при аннигиляции в тонкой мишени из легкого (малый заряд Z) элемента быстрых позитронов.

Основной проблемой таких экспериментов являются разностная процедура определения вклада от квазимоноэнергетических фотонов и

сложный метод отсечения вклада тормозных фотонов, образующихся при аннигиляции позитронов. Статистическая точность результатов относительно невысока, а взаимная привязка (нормировка) результатов разных измерений затруднительна.

Существенно различные процедуры получения информации о сечении реакции из выходов, непосредственно измеряемых в экспериментах, являются источниками значительных систематических расхождений их результатов. В то время как в ТИ-эксперименте конечным результатом является именно сечение реакции $\sigma(E)$, хотя и полученное для аппаратной функции сложной формы, затрудняющей оценку реально достигаемого энергетического разрешения, в ТИ-экспериментах, конечный результат, по существу, является не сечением реакции, а лишь ее выходом - разностью двух реально измеряемых выходов. Вследствие трехэтапной процедуры его получения статистическая точность выхода невысока, а определение потока налетающих фотонов, к которому он должен быть отнесен - затруднено.

Рис. 1 иллюстрирует характерные систематические расхождения сечений фотонейтронных реакций.

Представлены непосредственно определенные в в одном ТИ- (НИИЯФ МГУ) и двух КМА-экспериментах (Саклэ и Ливермор) сечения полной фотонейтронной реакции $^{16}\text{O}(\gamma, xn)$

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

Хорошо видно, что наблюдаемые во всех трёх сравниваемых сечениях максимумы заметно различаются: в обоих КМА-сечениях они имеют ширины большие, а абсолютные величины меньшие, по сравнению с резонансами в ТИ-сечении.

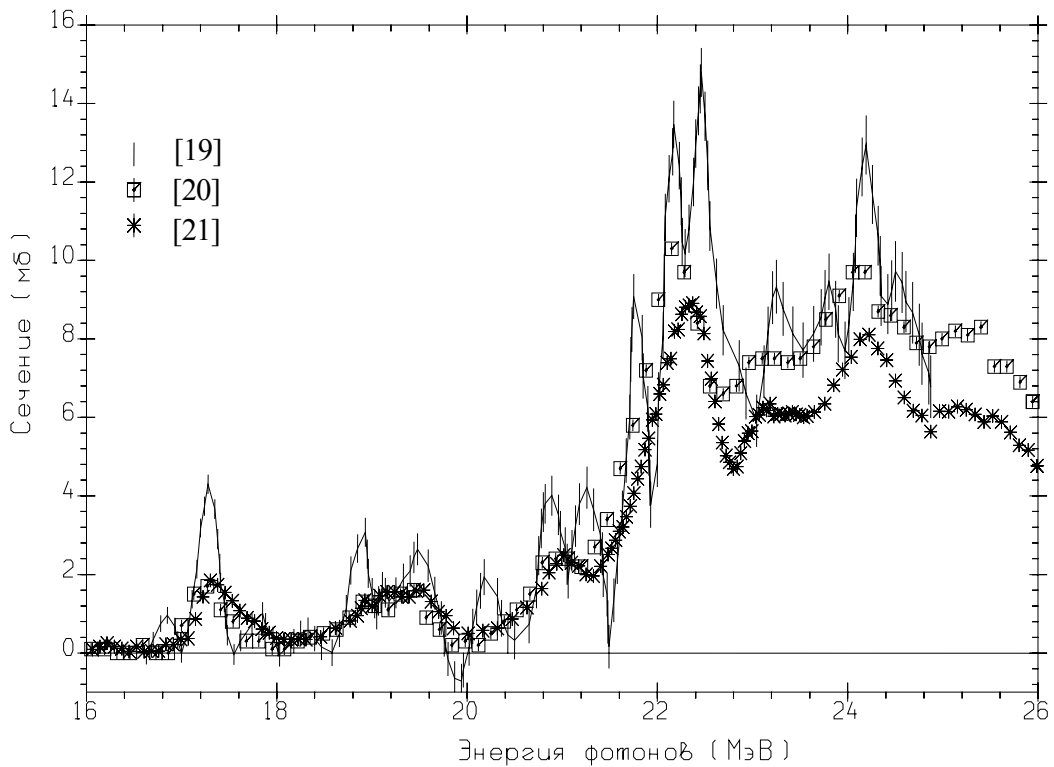


Рис. 1. Сравнение сечений реакции $^{16}\text{O}(\gamma, xn)$, полученных в разных экспериментах при близких значениях энергетического разрешения: точки с ошибками - ТИ-эксперимент, энергетическое разрешение $\Delta = 200$ кэВ; квадраты - КМА-эксперимент, выполненный в Саклэ (Франция), $\Delta = 180 - 280$ кэВ; звёздочки - КМА-эксперимент, выполненный в Ливерморе (США), $\Delta = 200 - 300$ кэВ.

При этом ТИ-сечение и КМА-сечение Саклэ близки (интегральные сечения ТИ- и КМА-эксперимента Саклэ составляют 36.90 и 34.52 МэВ•мб), тогда как КМА-сечение Ливермора значительно отличается по величине от двух других и приближается к ним лишь после дополнительной нормировки ($35.00 = 1.26 \times 27.64$ МэВ•мб).

Таблица 1 иллюстрирует существенные расхождения данных по сечению реакции (γ, xn) , полученных в экспериментах одного типа – КМА – на практически идентичных установках в Ливерморе и Саклэ.

Таблица 1.

Сравнение интегральных сечений реакции (γ, xn) , полученных в КМА-экспериментах в Саклэ (верхние значения) и Ливерморе (нижние значения)

Ядро	^{51}V	^{75}As	^{90}Zr	^{133}Cs	^{165}Ho
$E_{\gamma}^{\text{int-макс}}$ (МэВ)	27.8	26.2	25.9	24.2	26.8
	27.8	29.5	27.6	29.5	28.9
$\sigma_{\text{л}}^{\text{int}}/\sigma^{\text{int}}$	689/654 = 1.06	1306/1130 \geq 1.16	1309/1158 \geq 1.13	2484/250 5 \approx 1	3667/3385 \geq 1.08

Очевидно, что значения Саклэ превышают соответствующие значения Ливермора на 6 – 16 % (для случая ядра ^{133}Cs отношение близко к 1, однако в этом случае пределы интегрирования различаются более, чем на 5 МэВ).

В более ранних работах данных для свыше 500 сечений реакций для ядер от ^3H до ^{238}U была получена полная систематика отношений

$$R = R_{\text{сист}}^{\text{int}} = \sigma_{\text{разные лаборатории}}^{\text{int}}(\gamma, xn) / \sigma_{\text{Ливермор}}^{\text{int}}(\gamma, xn) \quad (2)$$

интегральных сечений реакций (γ, xn) , полученных в разных лабораториях, к значениям, полученным в одной из них (конкретно в Ливерморе). Эта систематика свидетельствуют о явном расхождении по абсолютной величине данных Ливермора с данными большинства других лабораторий: подавляющее большинство отношений R располагается в области значений, больших 1: $\langle R \rangle = \langle R_{\text{сист}}^{\text{int}} \rangle = 1.12$. Важно, что КМА-данные Саклэ по абсолютной величине согласуются не с однотипными КМА-данными Ливермора, а с данными, полученными в других КМА- и ТИ-экспериментах. Полная систематика данных свидетельствует о возможных причинах расхождений: ошибки (погрешности) процедур определения потока фотонов и эффективности регистрации нейтронов, использованных в Ливерморе.

Абсолютные величины сечений парциальных (γ, n) и $(\gamma, 2n)$ реакций соотносятся между собой существенно иначе. В то время как для реакции

(γ, n) данные Саклэ заметно превышают данные Ливермора, для реакции $(\gamma, 2n)$ наблюдается обратное соотношение. Так, например, для ядра ^{159}Tb отношение интегральных сечений $R^{\text{int}}(xn) = 1.06$, но при этом интегральное сечение реакции (γ, n) оказывается в Саклэ больше, чем в Ливерморе на 37 % ($R^{\text{int}}(n) = 1.37 (1936/1413)$), а интегральное сечение реакции $(\gamma, 2n)$ – в Ливерморе больше, чем в Саклэ, на 47 % ($R^{\text{int}}(2n) = 1.47(887/605)$). На основании детального анализа данных были сделаны следующие выводы об основных расхождениях сечений реакций по абсолютной величине:

1. сечения обеих реакции с испусканием одного нейтрона в области энергий до порога реакции с испусканием двух нейтронов ($V(2n)$), полученные в обеих лабораториях, весьма близки друг к другу по форме, имеющиеся различия по абсолютной величине (как в случае ядра ^{181}Ta) могут быть легко устранены введением простой нормировки;
2. в области энергий выше $V(2n)$ сечения реакций с испусканием как одного, так и двух нейтронов, полученных в Ливерморе и Саклэ, существенно отличаются друг от друга не только по форме, но и по абсолютной величине:
 - абсолютные величины сечений реакции с образованием одного нейтрона, полученных в Саклэ, оказываются заметно больше соответствующих значений, полученных в Ливерморе;
 - абсолютные величины сечений реакции с образованием двух нейтронов, полученных в Саклэ, оказываются заметно меньше соответствующих значений, полученных в Ливерморе.

Характер расхождений сечений парциальных реакций делает абсолютно недостаточной простую перенормировку данных и требует применения специальных методов их согласования.

В Главе 2 обоснован и описан метод взаимного согласования абсолютных величин сечений парциальных фотонейтронных реакций, полученных с помощью КМА-фотонов.

С целью детального изучения соотношения данных о сечениях парциальных фотонейтронных реакций (γ, n) и $(\gamma, 2n)$ и исследования систематических расхождений КМА-данных, полученных в Саклэ и Ливерморе, был выполнен их анализ, который включал несколько этапов:

- с целью контроля возможных расхождений абсолютных величин сечений полной фотонейтронной реакции (1) во всей исследованной области энергий получались энергетические зависимости отношения

$$R(E) = \sigma_{\text{Саклэ}}(\gamma, xn) / \sigma_{\text{Ливермор}}(\gamma, xn); \quad (3)$$

- на основании систематики 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)) в сторону меньших энергий (к данным Саклэ) на величину ΔE , такую, чтобы в области энергий от порога реакции (γ, 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 (γ, n) вновь в области энергий до порога реакции $(\gamma, 2n)$ определялся коэффициент

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

который в принципе должен быть равным коэффициенту

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

а в пересекающихся областях энергии рассчитывался коэффициент

$$R(2n) = \sigma_{\text{Саклэ}}^{\text{int}}(\gamma, 2n) / \sigma_{\text{Ливермор}}^{\text{int}}(\gamma, 2n). \quad (6)$$

Систематика полученных значений коэффициентов $R(n)$ и $R(2n)$ для всех 19 исследованных ядер приведена на Рис. 2.

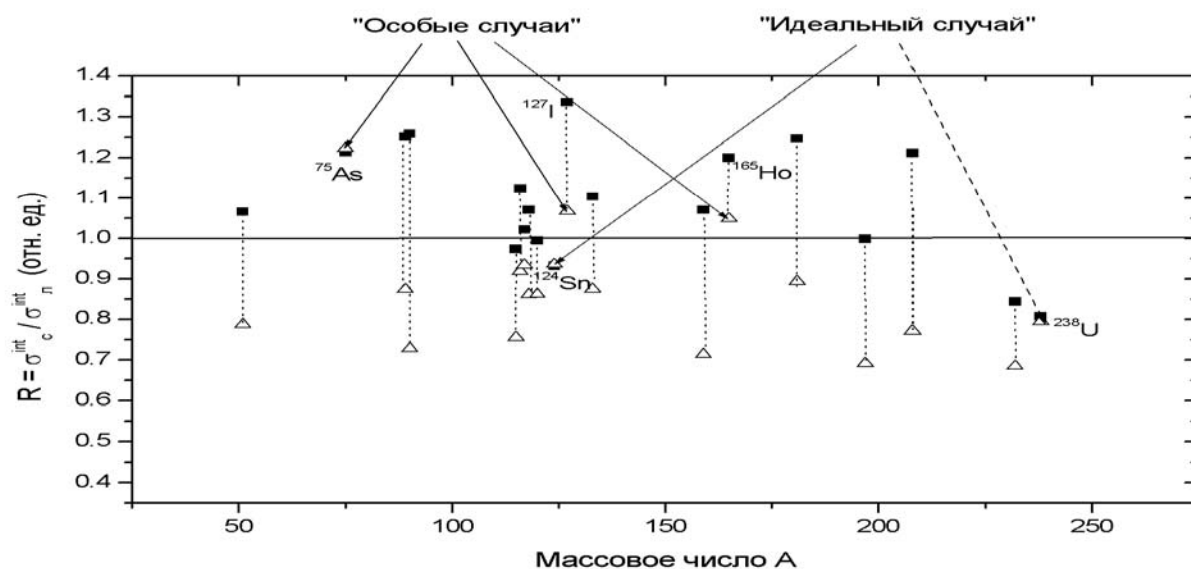


Рис. 2. Систематика значений отношений $R(n) = \sigma_{\text{Саклэ}}^{\text{int}}(\gamma, n) / \sigma_{\text{Ливермор}}^{\text{int}}(\gamma, n)$ — квадраты и $R(2n) = \sigma_{\text{Саклэ}}^{\text{int}}(\gamma, 2n) / \sigma_{\text{Ливермор}}^{\text{int}}(\gamma, 2n)$ — треугольники, полученных после соответствующей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

Полученная систематика наглядно подтверждает всю драматичность ситуации соотношения между собой величин сечений парциальных фотонейтронных реакций с различной множественностью фотонейтронов, свидетельствуя 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 значений $R_{\text{сист}}^{\text{int}}$, по определению соответствующих им (другая лаборатория – Саклэ, область интегрирования та же – между порогами реакций (γ, n) и $(\gamma, 2n)$);
- коэффициенты $R(2n)$ в большинстве случаев имеют значения, заметно меньшие 1.

Усредненные по данным для всех 19 ядер значения отношений величин интегральных сечений соответствующих реакций оказываются равны соответственно $\langle R(n) \rangle = 1.09$ и $\langle R(2n) \rangle = 0.8$.

Способы учёта и устранения таких расхождений были рассмотрены специально при использовании информации о различии методов определения множественность фотонейтронных реакций в Ливерморе и Саклэ.

В Ливерморе использовался метод кольцевых отношений (кольца BF₃-счетчиков в замедлителе из парафина), позволяющий независимо и достаточно точно определять средние энергии нейтронов и, соответственно, отношения для событий реакций с одним и двумя нейтронами, а, следовательно, с использованием данных об эффективности регистрации нейтронов различных энергий - сечения парциальных реакций любой (1, 2, 3) множественности.

Метод Саклэ основан на прецизионной калибровке Gd-жидкого сцинтиллятора большого объема с помощью источника ²⁵²Cf. Использовалось сомнительное предположение о том, что энергия фотонейтронов в области гигантского резонанса не превосходит значения $E_n \sim 3$ МэВ. Другие очевидные и весьма важные недостатки процедуры определения множественности фотонейтронов, реализованной в Саклэ: весьма высокий фон детектора Саклэ и существенно более плохое, чем в Ливерморе, отношение «сигнал-шум» очевидно затрудняли процедуру выделения и вычитания этого фона, а также внесение поправок на случайные совпадения в срабатывании счетчиков. Все это приводило к очевидному завышению

определяемой доли событий однопнейтронных реакций (γ, n) по сравнению с событиями реакций с испусканием двух (трех и более нейтронов).

Вопрос о том, какая именно процедура более правильна или, напротив, ошибочна, представлял особый интерес и решался в специальном исследовании реакций (e, Tn) , (e, n) и $(e, 2n)$ на ядре ^{181}Ta . Было установлено, что сечение $\sigma(e, 2n)$ согласуется с данными, пересчитанными из данных по $(\gamma, 2n)$ реакции Ливермора, но не согласуется с соответствующими данными Сакле: эти последние для сечений реакций $(\gamma, 2n)$ оказываются заниженными, тогда как для сечений (γ, n) реакций – напротив завышенными. Все это позволяет интерпретировать расхождения между данными Сакле и Ливермора как следствия проявления погрешностей процедуры определения в Сакле множественности фотонейтронных реакций (часть нейтронов из реакции $(\gamma, 2n)$ приписывается реакции (γ, n)). Суть метода учёта подобных расхождений заключается в том, что данные для сечений реакций $(\gamma, 2n)$, полученные в Сакле, пересчитываются и часть сечения реакции (γ, n) , возвращается в сечение двух-нейтронной:

- после корректировки энергетических шкал сравниваемых сечений по данным о сечениях полной фотонейтронной реакции (γ, xn) - сдвига сечений, полученных в Ливерморе, по энергии на некоторую величину ΔE к данным Сакле - определяется коэффициент $R = R(xn)$ (5), нормирующий сечения полной фотонейтронной реакции в области энергий до порога $V(2n)$ реакции $(\gamma, 2n)$, в которой они в обеих лабораториях должны быть идентичны;
- в области перекрытия сечений парциальных реакций (γ, n) и $(\gamma, 2n)$ соотношение (1) может быть существенно упрощено ($(\gamma, xn) = (\gamma, n) + 2(\gamma, 2n)$), а использование коэффициента R позволяет получить соотношение, которое используется для обсуждаемого возврата части сечения реакции (γ, n) , полученного в Сакле, в скорректированное сечение реакции $(\gamma, 2n)$:

$$R = \sigma^{xn}_C / \sigma^{xn}_L = (\sigma^n_C + 2\sigma^{2n}_C) / (\sigma^n_L + 2\sigma^{2n}_L), \quad (7)$$

$$\sigma^{xn}_C = (\sigma^n_C + 2\sigma^{2n}_C) = R\sigma^{xn}_L = R(\sigma^n_L + 2\sigma^{2n}_L), \quad (8)$$

$$R\sigma^{2n}_L = \sigma^{2n}_C^* = \sigma^{2n}_C + 1/2(\sigma^n_C - R\sigma^n_L). \quad (9)$$

Правая часть основного соотношения (9) метода корректировки данных Сакле по сечению реакции $(\gamma, 2n)$ – имеет смысл, обсуждавшийся выше: к значению Сакле σ^{2n}_C сечения реакции $(\gamma, 2n)$ добавляется часть $(1/2(\sigma^n_C - R\sigma^n_L))$ сечения реакции (γ, n) , рассчитанная с учетом коэффициента R (7), пересчитанное сечение Сакле $\sigma^{2n}_C^*$ согласуется с сечением Ливермора σ^{2n}_L , умноженным на коэффициент R (7) - $\sigma^{2n}_L^* = R\sigma^{2n}_L$.

Могут быть скорректированы и сечения реакции (γ, n) , полученные в Саклэ, для чего из сечения реакции (γ, n) должна быть удалена та ошибочно приписанная ему часть, которая согласно соотношению (9) перемещается в сечение реакции $(\gamma, 2n)$.

В Главе 3 представлены данные по полным и парциальным фотоядерным реакциям, в первую очередь по (γ, n) и $(\gamma, 2n)$, скорректированные с помощью описанного метода для всех перечисленных выше 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). Приводятся графики полученных сечений в сравнении с исходными данными (Рис. 3 – иллюстрация для ядра ^{51}V) и таблицы с интегральными сечениями до и после корректировки.

Для всех рассмотренных ядер оцененные данные хорошо согласуются друг с другом, что подтверждается данными по интегральным сечениям в совпадающих пределах интегрирования взаимно скорректированных сечений реакций (γ, xn) , (γ, n) и $(\gamma, 2n)$, полученных в Саклэ и Ливерморе.

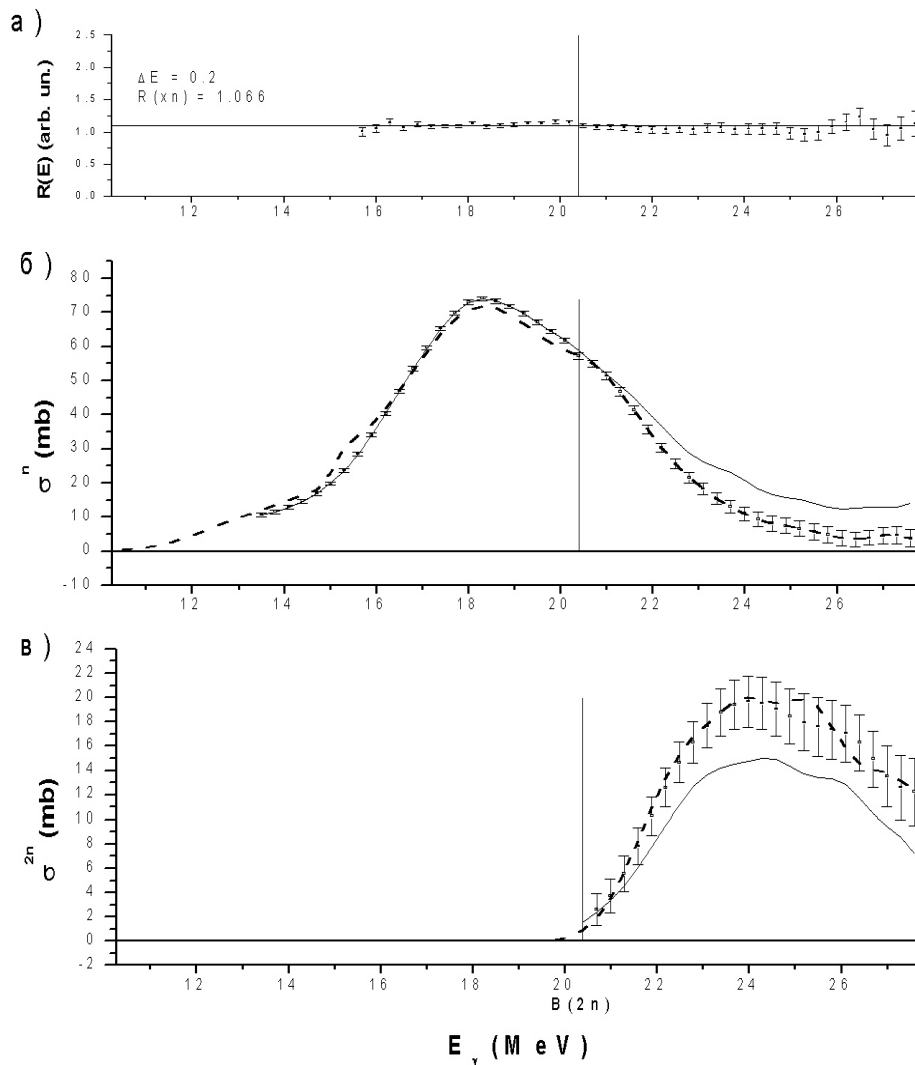


Рис. 3. Результаты взаимной корректировки («стандартная ситуация») сечений полной и парциальных фотонейтронных реакций для ядра ^{51}V , полученных в Саклэ и Ливерморе:

- а) отношения $R(E)$ сечений (γ, xn) реакции; указаны значения ΔE и $R(xn)$;
- б) данные для сечений реакций (γ, n) :
- сплошная линия – исходные данные Саклэ $\sigma^n_{\text{С}}$;
 - точки с ошибками – **оцененные** данные (9) 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 ((7) – (9)) Саклэ $\sigma^{2n}_{\text{С}^*}$;
 - пунктир – **оцененные** данные Ливермора $R\sigma^{2n}_{\text{Л}}$

На основании выполненных исследований были сделаны следующие основные утверждения и рекомендации.

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 $R = R(xn)$ ((2) или (5)). Для исследованных в настоящей работе 19 ядер от ^{51}V до ^{238}U оцененные сечения реакции (γ, xn) получены с использованием для каждого ядра индивидуального коэффициента, величина которого была специально обоснована. В других случаях без дополнительных исследований может использоваться коэффициент $\langle R_{\text{сист}}^{\text{int}} \rangle = 1.12$, полученный ранее 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) : оцененные сечения могут быть также получены путем простой нормировки с использованием тех же значений R (или $\langle R_{\text{сист}}^{\text{int}} \rangle$).
3. Экспериментальные данные Саклэ по сечениям полной фотонейтронной реакции (γ, xn) согласуются с данными других лабораторий и могут использоваться как оцененные без дополнительной нормировки. Экспериментальные данные Саклэ по сечениям парциальных фотонейтронных реакций (γ, n) и $(\gamma, 2n)$ не согласуются с данными других экспериментов - определены некорректно и должны быть пересчитаны с помощью предложенного метода совместной корректировки. Использование описанного выше метода приводит к согласованию между собой данных, полученных в Саклэ и Ливерморе, по сечениям парциальных реакций (γ, n) и $(\gamma, 2n)$. Это согласование достигается увеличением сечений двухнейтронных реакций Саклэ за счет уменьшения в области энергий выше порога $B(2n)$ сечений однеитронных реакций. Для обеих реакций после такой

корректировки данные Саклэ согласуются с соответствующими данными Ливермора, домноженными на коэффициент R.

Все сказанное выше относительно необоснованного завышения в области энергий выше порога $V(2n)$ сечений однеитронной реакций, полученных в Саклэ, заставляет пересмотреть целый ряд физических выводов, сделанных ранее на основании различных интерпретаций таких больших высокоэнергетичных «хвостов» сечений реакций (γ, n) . Среди таких эффектов особый интерес вызывают заметные превышения интегральных сечений фотопоглощения над предсказаниями дипольного правила сумм и существенно большие по сравнению с данными Ливермора оценки доли прямых процессов в нейтронном канале распада ГДР.

Глава 4 посвящена рассмотрению некоторых физических следствий из выполненной взаимной корректировки сечений полных и парциальных фотонейтронных реакций.

Соотношение интегрального сечения фотопоглощения и дипольного правила сумм.

Для оценки абсолютной величины ГДР (амплитуды сечения фотопоглощения

$$(\gamma, \text{abs}) = (\gamma, 1n) + (\gamma, np) + (\gamma, 2n) + (\gamma, 3n) + (\gamma, 1p) + (\gamma, 2p) + \dots + (\gamma, f), \quad (10)$$

где (γ, f) – реакция деления относительно тяжелых ядер) по соответствующему интегральному сечения используется значение классического правила сумм для E1 переходов

$$\sigma^{\text{int}} = 60 NZ/A \text{ МэВ} \cdot \text{мб}. \quad (11)$$

Основанием для этого является твердое установление того факта, что гигантский резонанс в сечениях фоторасщепления атомных ядер вызван преимущественным поглощением электрических дипольных фотонов. Предсказание дипольного правила сумм представляет собой, по существу, верхний предел для величины сечения фотопоглощения. Однако в ряде работ, преимущественно выполненных в Саклэ, были обнаружены значительные (в 1.3 – 1.5 раза) превышения интегральных сечений фотопоглощения над значением $60NZ/A$, для интерпретации которых пришлось вводить понятие эффективной массы нейтрона внутри ядра.

Из проведённых исследований следует, что эти данные также требуют уточнений, поскольку они основываются на использовании комбинаций сечений реакций

$$\sigma(\gamma, \text{abs}) = \sigma(\gamma, \text{xn}) - \sigma(\gamma, 2n) + \sigma(\gamma, p), \quad (12)$$

в которых присутствуют сечения реакции $(\gamma, 2n)$, существенные погрешности в определении которых, детально рассмотрены выше. Было показано, что корректировка сечений этой реакции приводит к заметному возрастанию её значений, а следовательно и к естественному уменьшению значений сечений реакций (γ, abs) . Таким образом, очевидно, что и соотношения $\sigma^{\text{int}}(\gamma, \text{abs})$ с оценкой дипольного правила сумм должны быть уточнены.

С использованием новых оцененных данных по сечениям различных фотоядерных реакций была получена полная систематика новых данных по интегральным сечениям фотопоглощения $\sigma^{\text{int}}(\gamma, \text{abs})$, которая представлена на Рис. 4. При этом к анализу были привлечены как все новые полученные в настоящей работе данные, так и подборка данных для других ядер, полученных различными методами в других работах. Приведены также традиционная (11) и новая (13) аппроксимации систематизированных значений интегральных сечений фотопоглощения.

На основании полученных данных можно сделать вывод о том, что широко высказывавшиеся в научной литературе сомнения в том, что именно дипольное правило сумм (11) дает надежную верхнюю оценку абсолютной величины ГДР, полученными в настоящей работе данными получают дополнительное обоснование, поскольку со значительно большей точностью полученные данные согласуются с зависимостью

$$\sigma^{\text{int}} = 66.18 \text{ NZ/A} + 99.83 \text{ МэВ} \cdot \text{мб}. \quad (13)$$

Соотношение прямых и статистических процессов в нейтронном канале распада ГДР.

Соотношение сечений реакций с испусканием одного и двух нейтронов является важной характеристикой процесса фоторасщепления, зависящей от механизма возбуждения и распада ядра. Расхождение энергетической зависимости сечения реакции испускания единственного нейтрона с предсказаниями статистической модели, может служить доказательством проявления процессов прямого выбивания нейтронов γ -квантами из ядра, а степень этого расхождения – мерой соотношения различных механизмов реакции.

Обоснованность таких заключений в значительной степени зависит от того, с какой точностью и надежностью определяется сечение реакции с испусканием единственного нейтрона (γ, n) в той области энергий, где становится возможным процесс испускания двух нейтронов в реакции ($\gamma, 2n$). Как показано выше, данные по реакциям (γ, n) и ($\gamma, 2n$) оказываются взаимно связанными и влияющими друг на друга.

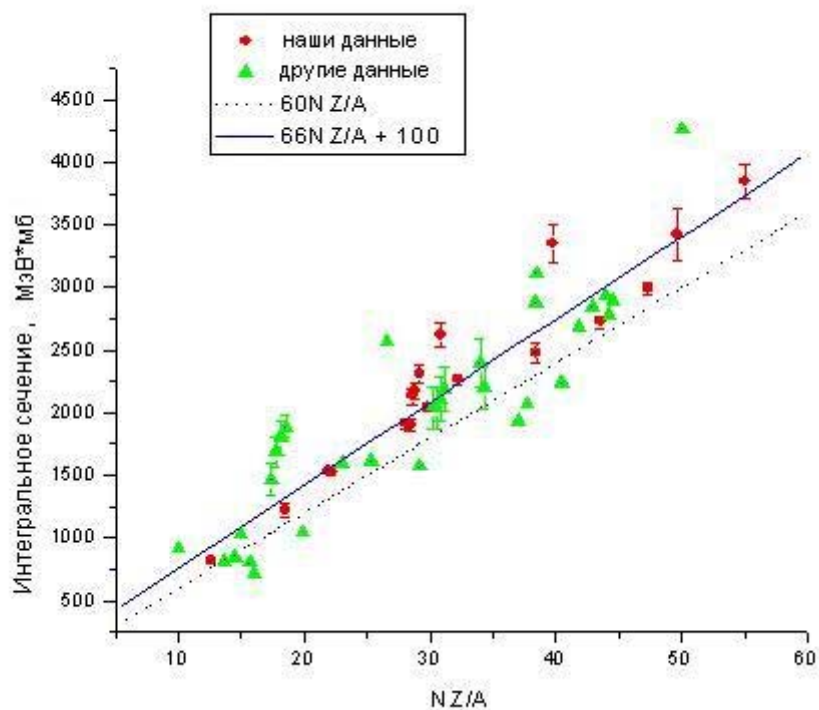
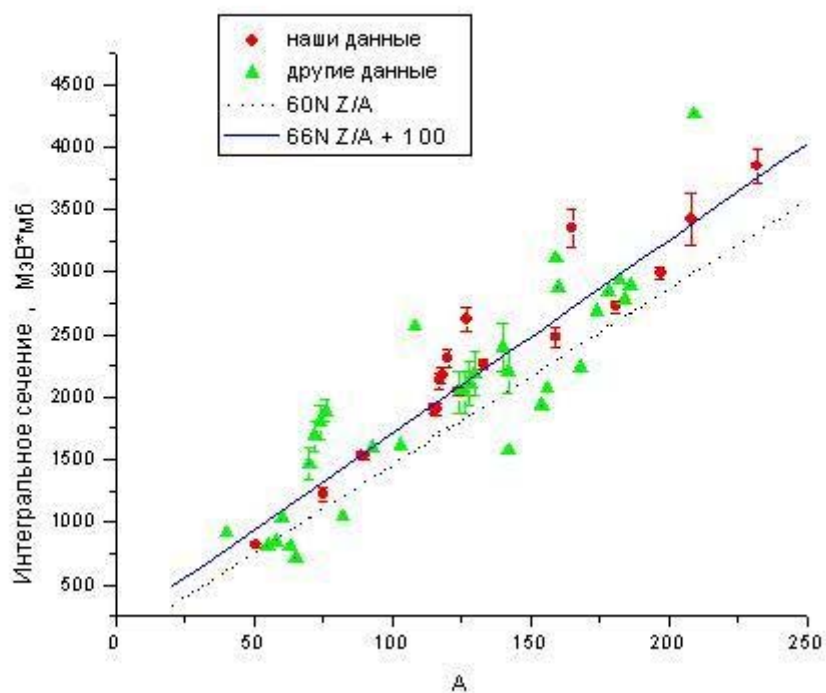


Рис. 4. Полная систематика данных по интегральным сечениям фотопоглощения $\sigma^{\text{int}}(\gamma, \text{abs})$.

Пунктир – A-зависимости $60NZ/A$, $\chi^2 = 23.25$;

Сплошная линия – A-зависимость $66,18 NZ/A(\pm 4,13) + 99,83 (\pm 133,65)$, $\chi^2 = 7.41$.

Хорошо известно, что данные Сакле и Ливермора приводят к существенно (~ в 3 раза) различным выводам о доле прямых процессов в нейтронном канале распада ГДР: для первых она составляет 0.16 - 0.37 (среднее значение $\langle n_{\text{прям}} \rangle = 0.27$), для вторых 0.04 - 0.25 (среднее значение $\langle n_{\text{прям}} \rangle = 0.12$).

Для разделения процессов с образованием одного и двух нейтронов и количественного определения доли прямых процессов используется выражение для множественности испускаемых фотонейтронов

$$M(E) = [\sigma^n + 2\sigma^{2n}]/[\sigma^n + \sigma^{2n}] = \sigma^{xn}/\sigma^{sn}, \quad (14)$$

асимптотическая форма которого при энергиях выше порога B_{2n} имеет вид

$$M_A = (2 - x_A) = [x_A\sigma^{\text{tot}} + 2(1 - x_A)\sigma^{\text{tot}}]/[x_A\sigma^{\text{tot}} + (1 - x_A)\sigma^{\text{tot}}] \quad (15)$$

и позволяет оценить вклад прямых распадов $n_{\text{прям}}$ с помощью соотношения

$$n_{\text{прям}} = x_A/(2 - x_A), \quad (16)$$

который зависит от соотношения сечений реакций (γ, xn) (1) и (γ, sn)

$$(\gamma, sn) = (\gamma, 1n) + (\gamma, np) + (\gamma, 2n) + (\gamma, 3n) + \dots, \quad (17)$$

а, следовательно, вновь от соотношения сечений реакций (γ, n) и $(\gamma, 2n)$. Предложенная в Саклэ интерпретация сечений реакций (γ, n) в областях энергий, на $\sim 3 - 5$ МэВ превышающих пороги реакций $(\gamma, 2n)$, как вкладов высокоэнергетичных прямых нейтронов, требует серьезных уточнений. Описанная выше корректировка данных Сакле приводит их в согласие с данными Ливермора (Таблица 2).

Таблица 2.

Вклад $n_{\text{прям}}$ прямых процессов в распад ГДР по нейтронному каналу

Ядро	Данные Саклэ		Данные Ливермора
	старые	новые	
^{51}V	0,34	0,22	0,20
^{75}As	0,24	0,06	0,07
^{89}Y	0,36	0,30	0,25
^{90}Zr	0,37	0,01	0,17
^{115}In	0,30	0,14	0,10
^{116}Sn	0,20	0,09	0,11
^{117}Sn	0,19	0,22	0,21
^{118}Sn	0,16	0,18	0,14
^{120}Sn	0,21	0,22	0,16
^{124}Sn	0,22	0,16	0,11
^{127}I	0,23	0,22	0,18
^{133}Cs	0,33	0,09	0,06
^{159}Tb	0,23	0,03	0,05
^{165}Ho	<u>0,16</u>	<u>0,22</u>	<u>0,14</u>
^{181}Ta	0,23	0,09	0,04
^{197}Au	0,25	0,09	0,06
^{208}Pb	0,19	0,09	0,21
<$n_{\text{прям}}$>	0.27	0.14	0.12

В свете выполненных исследований доля нестатистической компоненты ГДР не превышает 10%, а, следовательно, распад ГДР происходит преимущественно статистически.

Для ядер ^{127}I и ^{181}Ta было проведено специальное сравнение с данными полученными в экспериментах на пучках тормозного γ -излучения. Сравнение выявило хорошее согласие данных и послужило дополнительным аргументом в пользу надежности полученных в настоящей работе оценок вкладов прямых процессов в фоторасщепление ГДР по нейтронному каналу

на основе корректировок результатов экспериментов на пучках квазимоноэнергетических фотонов, выполненных в Саклэ.

Мониторирование пучков суперколлайдеров.

Как еще одно физическое следствие выполненных исследований рассматривается решение проблемы мониторинга пучков коллайдеров, достигнутое вследствие устранения значительных расхождений в используемых в этой области фотоядерных данных.

Для ее решения было предложено регистрировать коррелированные пары нейтронов от процессов взаимной электромагнитной диссоциации каждого из сталкивающихся (конкретно Au-Au и Pb-Pb) ядер, основным механизмом которой является возбуждение и последующий распад по однонейтронному каналу ГДР в каждом из сталкивающихся ядер. Основу метода мониторинга составляет достоверный расчет сечений каналов взаимной электромагнитной диссоциации. Подобный метод определения светимости требует детальной проверки предсказаний моделей фотоядерных реакций по сечениям парциальных фотонейтронных реакций путем их сравнения с соответствующими экспериментальными данными. До выполнения настоящей работы это было практически невозможно сделать из-за наличия значительных (до десятков %) систематических расхождений экспериментальных данных для обсуждаемых ядер Au и Pb.

С использованием ранее оцененных данных по сечениям парциальных реакций (γ, n) и $(\gamma, 2n)$ были оценены взаимно скорректированные данные по сечениям реакции $(\gamma, 3n)$ для ^{197}Au и ^{208}Pb . Трудности такой оценки, связанные с тем, что для обоих ядре эта реакция имеет достаточно высокие энергетические пороги, и она совершенно не пересекается по энергии с реакцией (γ, n) и лишь частично - с реакцией $(\gamma, 2n)$, были преодолены с помощью специальных интер- и экстраполяций.

Оцененные сечения реакций сравнивались с результатами теоретических расчетов, выполненных при использовании компьютерного кода RELDIS,

реализующего каскадно - испарительно - делительную модель фотоядерных реакций, и кода GNASH, реализующего предравновесную экситонную модель. Установлено, что оцененные с помощью предложенной в диссертационной работе методики сечения реакций (γ, n) , $(\gamma, 2n)$ и $(\gamma, 3n)$ близки к результатам расчётов с использованием кода GNASH, а также и RELDIS, но лишь в его варианте без учета прямых нейтронов (полная доля прямых (нестатистических) распадов ГДР по нейтронному каналу $P_n^{\text{dir}} = 0$).

Перечисленные способы моделирования фотоядерных реакций были применены в расчетах сечений электромагнитной диссоциации, сравнение результатов которых с экспериментальными данными проводится в Таблице 3 для каналов $^{208}\text{Pb}(\gamma, n)^{207}\text{Pb}$ и $^{208}\text{Pb}(\gamma, 2n)^{206}\text{Pb}$. В эксперименте измерялись сечения вылета определенного числа нейтронов $^{208}\text{Pb}(\gamma, 1nX)$ и $^{208}\text{Pb}(\gamma, 2nX)$ в совокупности с другими нерегистрируемыми частицами X.

По предсказаниям современных теорий такие сечения должны отличаться по величине менее чем на 0.2 бн от сечений $^{208}\text{Pb}(\gamma, n)^{207}\text{Pb}$ и $^{208}\text{Pb}(\gamma, 2n)^{206}\text{Pb}$, которые и приведены в Таблице 3. Видно, 1nX канал диссоциации свинца лучше всего описывается расчетом с использованием результатов кода GNASH. Канал 2nX описывается теорией заметно хуже, однако и в этом случае вариант с использованием кода GNASH является наиболее предпочтительным. Расчеты электромагнитной диссоциации опираются на предположение о том, что вероятности многофотонных возбуждений контролируются в соответствии с распределением Пуассона, как это имеет место, например, для гармонического осциллятора.

Сумму сечений каналов эмиссии одного и двух нейтронов было предложено использовать в методе мониторинга светимости коллайдеров посредством измерений выходов нейтронов от взаимной электромагнитной диссоциации.

Таблица 3.

Измеренные и расчетные сечения (величины в бн) электромагнитной диссоциации ядер свинца на свинцовой мишени при энергиях 30 ГэВ/нуклон.

Канал	Эксперимент	Код RELDIS		Код GNASH
		$P_n^{\text{dir}} = 0.25$	$P_n^{\text{dir}} = 0.00$	
1nX	16.7 ± 1.5	18.8	18.0	17.6
2nX	5.2 ± 0.5	2.5	3.1	3.4
Сумма	21.9 ± 1.6	21.3	21.1	21.0

Результаты и выводы

1. Впервые создана новая полная база данных по характеристикам ядерных реакций под действием фотонов, нейтронов, заряженных частиц и тяжелых ионов с уникальной мощной и гибкой поисковой системой (<http://cdfc.sinp.msu.ru/exfor/index.php>).
2. Впервые детально проанализированы систематические расхождения сечений полной и парциальных фотонейтронных реакций в зависимости от особенностей выполненных экспериментов с тормозными и квазимоноэнергетическими аннигиляционными фотонами.
3. Развита метод взаимного согласования и корректировки результатов различных экспериментов по определению сечений парциальных фотонейтронных реакций, основанный на учете особенностей использованных методов определения множественности фотонейтронов.
4. Получены новые данные по сечениям реакций (γ, xn) , (γ, sn) , (γ, n) и $(\gamma, 2n)$ для 19 ядер (^{51}V , ^{75}As , ^{89}Y , ^{90}Zr , ^{115}In , $^{116,117,118,120,124}\text{Sn}$, ^{127}I , ^{133}Cs , ^{159}Tb , ^{165}Ho , ^{181}Ta , ^{197}Au , ^{208}Pb , ^{232}Th , ^{238}U), взаимно согласованные между собой и с результатами других экспериментов различных типов, свободные от обсуждаемых систематических расхождений.

5. Сделаны новые оценки соотношений интегральных сечений полного фотопоглощения с предсказаниями дипольного правила сумм. Показано, что полная совокупность скорректированных интегральных сечений реакции полного фотопоглощения с высокой точностью может быть аппроксимирована зависимостью $\sigma^{\text{int}} = 66.18 \text{ NZ/A} + 99.83 \text{ МэВ} \cdot \text{мб}$.
6. Сделаны новые оценки соотношения прямых и статистических процессов в нейтронном канале распада ГДР, установлено, что согласованные взаимно скорректированные данные Ливермора и Саклэ свидетельствуют о том, что ГДР распадается преимущественно статистически: для всех исследованных ядер доля прямых процессов в нейтронном канале распада ГДР составляет 12 – 14 %.
7. Впервые для целей мониторингирования пучков суперколлайдеров оценены сечения реакции $(\gamma, 3n)$ на ядрах ^{197}Au и ^{208}Pb . На примере сравнения новых экспериментальных данных с результатами теоретических расчетов по диссоциации ядер ^{208}Pb при энергиях 30 ГэВ/нуклон показано, что использование оцененных сечений парциальных фотонейтронных реакций (γ, n) , $(\gamma, 2n)$ и $(\gamma, 3n)$ позволяют существенно повысить точность расчётов сечений электромагнитной диссоциации и делает возможным их использование для эффективного мониторингирования интенсивности встречных пучков современных суперколлайдеров.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. В.В.Варламов, Песков Н.Н., Руденко Д.С., Степанов М.Е. Согласованная оценка сечений фотонейтронных реакций по данным, полученным в экспериментах на пучках квазимоноэнергетических аннигиляционных фотонов в Ливерморе (США) и Саклэ (Франция). Вопросы атомной науки и техники. Сер. «Ядерные константы», 1 - 2 (2003) 48 - 89.
2. В.В.Варламов, Б.С.Ишханов, Н.Н.Песков, Д.С.Руденко, М.Е.Степанов. Сечения фотонейтронных реакций из экспериментов с

квазимоноэнергетическими аннигиляционными фотонами: систематические расхождения и метод их преодоления. 53 Международное совещание по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра «Ядро-2003». 7 - 10 октября 2003 г., Москва. Тезисы докладов. ISBN 5-983040-004-5, Издательство ООО «Соло», -С-Пб, 2003, сс. 55 - 56.

3. В.В.Варламов, Б.С.Ишханов, Н.Н.Песков, М.Е.Степанов, И.А.Пшеничников. Электромагнитная диссоциация ультрарелятивистских ядер и сечения фотоядерных реакций в области гигантских резонансов. Ядерная физика, 67, №12, (2004) 2145 - 2156.
4. В.В.Варламов, Б.С.Ишханов, Н.Н.Песков, Д.С.Руденко, М.Е.Степанов, В.В.Чесноков. Сечения фотонейтронных реакций из экспериментов с квазимоноэнергетическими аннигиляционными фотонами: систематические расхождения и метод их преодоления. Известия РАН, серия физическая, 69, №1 (2005) 149 - 157.
5. B.S.Ishkhanov, V.V.Chesnokov, N.N.Peskov, M.E.Stepanov, V.V.Varlamov. Photonuclear Reactions: Systematical Disagreements, Methods of Overcoming Them, and Physical Consequences. International Conference on Nuclear Data for Science and Technology. Santa Fe, New Mexico, 26 September – 1 October 2004. American Institute of Physics. AIP Conference Proceedings, Volume 769, USA. ISBN 0-7354-0254-X, ISSN 0094-243X. Melville, New York, 2005. Part One. PP. 183 – 186.
6. В.В.Варламов, Ю.Ю.Гуденко, С.Ю.Комаров, Н.Н.Песков, М.Е.Степанов. Новые оценки соотношения прямых и статистических процессов в нейтронном канале распада ГДР. Сборник тезисов докладов. 56 Международная конференция по проблемам ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра «Ядро-2006». 4 - 8 сентября 2006 г., г. Саров, РФЯЦ ВНИИЭФ, 2006, сс. 37 - 38.

7. 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, -М., 2006, сс. 1 – 16.
8. И.Н.Бобошин, В.В.Варламов, С.Ю.Комаров, Н.Н.Песков, М.Е.Степанов, В.В.Чесноков. Научный сервис на основе современных информационных технологий в области исследований атомных ядер и ядерных реакций. Труды Всероссийской научной конференции «Научный сервис в сети Интернет: технологии параллельного программирования». Новороссийск, 18 – 23 сентября 2006 г. ISBN 5-211-05296-X. Издательство Московского университета, Москва, 2006, с. 198 - 202.

Подписано к печати 18.01.2007

Тираж 100 Заказ 5

Отпечатано в отделе оперативной печати
Физического факультета МГУ