

**ОТЗЫВ официального оппонента
на диссертацию на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
Давыдова Александра Ивановича на тему:
«Новые сечения фотонейтронных реакций, оцененные с использованием
физических критериев достоверности»
по специальности 1.3.15 Физика атомных ядер и элементарных частиц,
физика высоких энергий**

Диссертационная работа посвящена решению проблем достоверности экспериментальных данных по сечениям фотоядерных реакций. Наиболее востребованные данные по энергетическим зависимостям полных $\sigma(\gamma, sn)$ и парциальных $\sigma(\gamma, 1n)$, $\sigma(\gamma, 2n)$ и $\sigma(\gamma, 3n)$ сечений фотонейтронных реакций получены в экспериментах, выполненных в двух лабораториях: во Франции (Сакле) и в США (Ливермор). Значительные (до 100%) разнонаправленные величины расхождения по абсолютной величине данных обеих лабораторий, которые определенно являются систематическими, вызвали вопросы о том, какие именно данные являются достоверными. Имеющиеся рекомендации по согласованию данных противоречили друг другу: уменьшая расхождения по сечению одной реакции они увеличивали их по другой (и наоборот), так что вопрос о достоверности фотонейтронных сечений оставался открытым.

Соискателем развит общий подход для исследования расхождений экспериментальных сечений фотонейтронных реакций, базирующийся на физических критериях достоверности, не зависящих от способов получения данных. С помощью корректных методов работы с массивом большого числа данных и экспериментально-теоретического метода оценки сечений, основанного на таких критериях, в диссертации без проведения дополнительных экспериментов впервые получены новые достоверные парциальные и полные сечения реакций для 22 ядер (от ванадия до свинца), включенные в международную электронную базу данных по ядерным реакциям, поддерживаемую Сетью Центров ядерных данных под эгидой МАГАТЭ.

Все вышеизложенные аргументы позволяют утверждать, что новизна, актуальность, научная и практическая ценность диссертации не вызывают сомнений.

Диссертация состоит из Введения, четырех глав, Заключения, библиографии и трех приложений. Общий объем диссертации составляет 126 стр., она содержит 33 рисунка и 20 таблиц. Библиография включает 105 наименований, среди них 23 работы автора, опубликованные в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в Диссертационном совете МГУ по соответствующей специальности. Из них 20 работ опубликованы в изданиях, индексируемых в базах Web of Science и Scopus, а три – входят в перечень ВАК.

ВО ВВЕДЕНИИ систематизированы данные по фотоядерным экспериментам различного типа и имеющимся между ними систематическими расхождениями. Описаны методы, использованные ранее, для устранения этих расхождений. Изложены основные принципы нового подхода к проблемам достоверности данных, методология проведенных в диссертации исследований, их актуальность, новизна, научная значимость и степень достоверности. Показан личный вклад автора в эти результаты. Сформулированы положения, выносимые на защиту. Дано краткое описание структуры диссертации.

ГЛАВА 1 посвящена описанию основного экспериментального метода получения информации о полных и парциальных сечениях фотонейтронных реакций ($\gamma, 1n$), ($\gamma, 2n$) и ($\gamma, 3n$) в Сакле и Ливерморе – метода разделения фотонейтронов по множественности, основанного на измерении их энергии.

В экспериментах данного типа детектирование продуктов реакции осуществлялось с использованием детекторов, позволяющих по времени замедления нейтронов, образующихся в исследуемых реакциях, до тепловых определять их энергии. В предположении, что нейтроны из реакции ($\gamma, 1n$) имеют энергии

бóльшие, чем нейтроны из реакции $(\gamma, 2n)$, измеренные энергии разделяли нейтроны по множественности.

Соискатель подчеркнул, что детекторы, определявшие энергии нейтронов в Ливерморе и в Сакле, существенно различались, и обоснованно предположил, что имеющиеся систематические расхождения между результатами экспериментов в Сакле и Ливерморе (недостовверное завышение количества нейтронов из реакции $(\gamma, 1n)$ в Сакле и из реакции $(\gamma, 2n)$ в Ливерморе) в определенной степени связаны с особенностями детектирования нейтронов.

В ГЛАВЕ 2 соискателем проведен анализ известных существенных систематических расхождений между абсолютными величинами экспериментальных сечений реакций $(\gamma, 1n)$ и $(\gamma, 2n)$ и кратко описан предложенный ранее метод приведения их в соответствие друг с другом с помощью взаимной корректировки. Проведенный анализ показал, что парциальные сечения $\sigma(\gamma, in)$, измеренные в обеих лабораториях для 19 ядер от ванадия до урана существенно и разнонаправленно отличаются друг от друга: среднее по разным ядрам отношение данных по интегральным сечениям $\sigma^{\text{инт}}$, рассчитанным по данным полученным в Сакле, к их аналогам, полученным в Ливерморе, составляет 1.08 для реакции $(\gamma, 1n)$ и 0.83 – для $(\gamma, 2n)$.

Для устранения подобных расхождений ранее был предложен метод взаимной корректировки, основанный на сравнении сечения реакции $(\gamma, 2n)$ на ядре ^{181}Ta с активационным сечением реакции $(e, 2n)$. Было установлено, что сечение $\sigma(e, 2n)$ согласуется с данными Ливермора по сечению $\sigma(\gamma, 2n)$ реакции, но не согласуется с соответствующими данными Сакле. Метод корректировки состоял в том, что «плохие» данные Сакле для сечений реакций $(\gamma, 2n)$ соответствующим образом пересчитываются, и завышенная часть сечения реакции $(\gamma, 1n)$ перемещается в сечение реакции $(\gamma, 2n)$.

Диссертант подчеркивает, что такой подход к устранению расхождений данных основывался на сопоставлении фотонейтронных и активационных

экспериментов только на одном ядре и только для $(\gamma, 2n)$ реакции, т.е. не имел системного характера. В результате рекомендации во многих случаях противоречили друг другу. О недостатках описанного метода свидетельствовало и то, что в сечениях реакции $(\gamma, 1n)$, полученных в Ливерморе для некоторых ядер, появлялись физически запрещенные отрицательные значения.

ГЛАВА 3 посвящена изложению нового метода анализа достоверности экспериментальных данных для фотонейтронных реакций, основанного на объективных физических критериях, которые не зависят от способов получения этих данных.

В качестве таких критериев в диссертации вводятся отношения F_i парциальных сечений реакций (γ, in) к сечениям выхода $\sigma(\gamma, xn) = \sum_i i \sigma(\gamma, in)$.

По определению $F_1 \leq 1.00$, $F_2 \leq 0.50$, $F_3 \leq 0.33$, и т.д. Также просто определяется качественная энергетическая зависимость величин F_i . $F_1 = 1.00$ для E_γ , меньших порога $B2n$ реакции $(\gamma, 2n)$, затем уменьшается до нуля; $F_2 = 0$ до $E_\gamma = B2n$, затем возрастает, но не превышает значения 0.50 вплоть до $B3n$, при больших E_γ стремится к нулю. Превышение $F_i^{\text{эксп}}$ соответствующих предельных значений означает, что полученные сечения являются недостоверными.

Выполненный диссертантом с использованием разработанных им вычислительных программ анализ большого массива экспериментальных данных по сечениям реакций (γ, in) , полученным в обеих лабораториях, показал, что эти данные не удовлетворяют физическим критериям достоверности, поскольку содержат существенные систематические погрешности при определении множественности фотонейтронов. Расхождение $F_i^{\text{эксп}}$ с физическими критериями для каждого ядра носит индивидуальный характер, что не позволяет ввести общую корректировку $\sigma(\gamma, in)$ с помощью $F_i^{\text{эксп}}$.

Для получения достоверных значений $\sigma(\gamma, in)$ диссертант использует метод, предложенный Б.С. Ишхановым, В.В. Варламовым и В.Н. Орлиным, в котором достоверные оцененные сечения (γ, in) реакций определяются как $\sigma^{\text{оцен}}(\gamma, in) = F_i^{\text{теор}} \cdot \sigma^{\text{эксп}}(\gamma, xn)$, где ни $F_i^{\text{теор}}$, рассчитанные на основе теоретической модели фотоядерных реакций, ни сечение выхода $\sigma^{\text{эксп}}(\gamma, xn)$, а вместе с ними и $\sigma^{\text{оцен}}(\gamma, in)$ не зависят от способов экспериментального разделения фотонейтронов по множественности.

Ранее были получены $\sigma^{\text{оцен}}(\gamma, in)$ для ядер ^{115}In , $^{116,117,118,120,124}\text{Sn}$, ^{129}Xe , ^{133}Cs , ^{138}Ba , ^{139}La , $^{140,142}\text{Ce}$, ^{141}Pr , $^{145,148}\text{Nd}$, ^{153}Eu , ^{159}Tb , ^{160}Gd , ^{181}Ta , ^{186}W , $^{186,188,190,192}\text{Os}$, ^{197}Au , ^{208}Pb , ^{209}Bi . В диссертации получены новые значения $\sigma^{\text{оцен}}(\gamma, in)$ и сечений полных фотонейтронных реакций $(\gamma, sn) = \sum_i \sigma(\gamma, in)$ для 22 ядер: ^{51}V , ^{59}Co , $^{58,60}\text{Ni}$, $^{63,65}\text{Cu}$, ^{75}As , $^{76,78,80,82}\text{Se}$, ^{89}Y , $^{90,91,92,94}\text{Zr}$, ^{103}Rh , ^{127}I , ^{165}Ho , ^{181}Ta , $^{206,207}\text{Pb}$, удовлетворяющие физическим критериям достоверности данных. Из данных по сечениям выхода $\sigma^{\text{эксп}}(\gamma, xn)$ в нескольких случаях (например, для ядер $^{206,207}\text{Pb}$) оценены сечения реакции $(\gamma, 3n)$, которые ранее измерены не были.

ГЛАВА 4, посвящена описанию результатов оценки достоверных сечений парциальных фотонейтронных реакций для различных групп исследованных 22 ядер. Впервые детально проанализированы причины существенных систематических расхождений результатов разных экспериментов между собой и с оцененными данными для трех групп ядер.

Для первой группы средне-тяжелых ядер $^{76,78,80,83}\text{Se}$, ^{89}Y , $^{90,91,92,94}\text{Zr}$, ^{103}Rh , ^{165}Ho основная особенность расхождений экспериментальных данных по сечениям фотонейтронных реакций, полученных в Сакле и Ливерморе, а также между этими и оцененными сечениями, заключается в том, что при небольших (~10%) расхождениях между сечениями выхода $\sigma(\gamma, xn)$ наблюдаются значительные (до 100%) расхождения между $\sigma(\gamma, 1n)$ и $\sigma(\gamma, 2n)$. Диссертант на

конкретных примерах показал, что расхождения экспериментальных и оцененных сечений реакций обусловлены погрешностями процедуры разделения нейтронов между реакциями $(\gamma, 1n)$ и $(\gamma, 2n)$ на основании данных об их энергиях.

Для относительно легких ядер ^{51}V , ^{59}Co , $^{58,60}\text{Ni}$ значительные расхождения между $\sigma(\gamma, 1n)$ и $\sigma(\gamma, 2n)$ связаны с отсутствием учета в экспериментах вклада реакции $(\gamma, 1n1p)$, которая может вносить погрешность в разделение нейтронов по множественности. Нейтрон с множественностью 1 из реакции $(\gamma, 1n1p)$ может иметь энергию, близкую к энергиям нейтронов с множественностью 2 из реакции $(\gamma, 2n)$. Диссертант рассчитал $\sigma(\gamma, 1n1p)$ и показал, что его учет устраняет недостоверное завышение $\sigma(\gamma, 2n)$.

В случаях ядер ^{75}As , ^{127}I , ^{181}Ta , $^{206,207,208}\text{Pb}$ установлены систематические погрешности технического характера, обусловленные потерей в экспериментах, выполненных в Ливерморе, большого количества нейтронов из реакции $(\gamma, 1n)$.

Недостоверность экспериментальных данных Сакле и Ливермора вызывает необходимость сравнения полученных в диссертации оцененных данных с результатами, свободными от недостатков метода разделения нейтронов по множественности. Одним из таких методов является метод наведенной активности. Сравнения оцененных и активационных данных были выполнены для ядер ^{181}Ta , ^{197}Au и ^{209}Bi . Было установлено, что оцененные сечения реакций $(\gamma, 1n)$ и $(\gamma, 2n)$, согласуются с результатами, полученными с помощью активационного метода, но существенно расходятся с результатами, полученными и в Сакле, и Ливерморе.

В диссертации выполнено сравнение с оцененных сечений с данными, полученными в экспериментах на пучках высокоэнергичных фотонов, с использованием детектора нейтронов, в котором эффективность их регистрации слабо зависит от энергии. Проведенное диссертантом сравнение оцененных данных для ядер ^{159}Tb , ^{196}Au и ^{209}Bi с результатами таких

экспериментов, выполненных на установке NewSUBARU в Японии, показало согласие экспериментальных и оцененных сечений, а также коэффициентов F_i .

Столь детальный анализ полученных данных позволил диссертанту сделать обоснованное заключение, что оцененные сечения реакций являются достоверными и могут быть рекомендованы для использования в исследованиях и приложениях. В результате новые оцененные данные для 22 ядер ^{51}V , ^{59}Co , $^{58,60}\text{Ni}$, $^{63,65}\text{Cu}$, ^{75}As , $^{76,78,80,82}\text{Se}$, ^{89}Y , $^{90,91,92,94}\text{Zr}$, ^{103}Rh , ^{127}I , ^{165}Ho , ^{181}Ta , $^{206,207}\text{Pb}$, исследованных в диссертации, вместе с полученными ранее аналогичным способом оцененными данными для ядер ^{115}In , $^{116,117,118,120,124}\text{Sn}$, ^{129}Xe , ^{133}Cs , ^{138}Ba , ^{139}La , $^{140,142}\text{Ce}$, ^{141}Pr , $^{145,148}\text{Nd}$, ^{153}Eu , ^{159}Tb , ^{160}Gd , ^{181}Ta , ^{186}W , $^{186,188,190,192}\text{Os}$, ^{197}Au , ^{208}Pb , ^{209}Bi , включены в международную электронную базу данных по ядерным реакциям, поддерживаемую Сетью Центров ядерных данных под эгидой МАГАТЭ.

В ЗАКЛЮЧЕНИИ суммированы результаты, полученные диссертантом.

ПРИЛОЖЕНИЕ содержит краткое описание теоретической модели фотоядерных реакций, в рамках которой получены новые оцененные энергетические зависимости сечений различных фотонейтронных реакций, таблицу оцененных интегральных характеристик парциальных и полных сечений этих реакций и перечень соответствующих разделов международной электронной базы данных по ядерным реакциям. Приведено описание программ расчета числовых значений отношений F_i и оцененных парциальных сечений реакций.

Оценивая диссертацию в целом, можно утверждать, что как научная, так и практическая ее ценность чрезвычайно высока. В диссертации представлен принципиально новый метод оценки энергетических зависимостей сечений различных фотоядерных реакций, не зависящий от способа деления нейтронов по множественности. Надежность, достоверность и обоснованность полученных научных результатов не вызывает сомнений, потому что эти данные установлены с помощью корректной работы с массивами большого

числа данных и метода, базирующегося на объективных физических критериях достоверности, не зависящих от способов получения данных. Надежность оцененных данных подтверждается их согласием с данными, полученными в экспериментах, в которых проблемы разделения конечных нейтронов по множественности не возникают. Большая часть практических вычислений, так же, как и разработка необходимых для них компьютерных программ, выполнена диссертантом самостоятельно. Практическая ценность работы подтверждается включением ее результатов в международную электронную базу данных по ядерным реакциям, поддерживаемую сетью центров ядерных данных под эгидой МАГАТЭ.

Диссертация написана четким и ясным языком, расположение материала компактно и продумано. Основные результаты, полученные в диссертации, апробированы в докладах на Международных и Всероссийских конференциях и опубликованы в большом количестве статей в ведущих научных журналах. Эти работы, как и автореферат, полно и правильно отражают содержание диссертации.

Диссертация соответствует специальности **1.3.15 Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий**, а именно ее направлению 2: «Ядерные реакции с различными налетающими частицами. Прямые реакции, предравновесные процессы, реакции многонуклонных передач, реакции с образованием составного ядра. Слияние ядер».

В диссертациях такого уровня сложно находить замечания. Тем не менее, стоит сделать замечание, связанное с терминологией диссертанта. Все экспериментальные сечения, анализируемые в работе, представляют собой функции возбуждения конечного ядра, т.е. зависят от энергии γ -кванта. Эта зависимость, хотя и приводится на всех рисунках, явно не подчеркивается в тексте. Ее качественное обсуждение приводится только для коэффициентов F_i . Вместе с тем, указанное замечание не умаляет значимости диссертационного исследования.

Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальности **1.3.15 Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий** (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1–2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова, диссертация оформлена согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Таким образом, соискатель **Давыдов Александр Иванович** заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности **1.3.15 Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий**.

Официальный оппонент:

профессор, доктор физико-математических наук,
главный научный сотрудник отдела ядерных реакций
Научно-исследовательского института ядерной физики
имени Д.В. Скобельцына Федерального государственного
бюджетного образовательного учреждения высшего образования
«Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»
Зеленская Наталья Семеновна

20 сентября 2023 г.

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация:
01.04.16 – «Физика атомного ядра и элементарных частиц»

Контактные данные: Тел.: 8495 9392410, e-mail: wg2@anna19.sinp.msu.ru
Адрес места работы: 119991, ГСП-1, г. Москва, Ленинские горы 1, НИИЯФ МГУ
тел.: 8(495)9393686; e-mail: info@sinp.msu.ru

Подпись Н.С. Зеленской удостоверяю
Ученый секретарь ученого совета НИИЯФ МГУ

Е.А.Сигаева