

**Отзыв научного руководителя на диссертационную работу  
Давыдова Александра Ивановича  
«Новые сечения фотонейтронных реакций, оцененные с использованием физических  
критериев достоверности»,  
представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических  
наук  
по специальности 1.3.15 - Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика  
высоких энергий**

Диссертация Давыдова А. И. «Новые данные по сечениям парциальных фотонейтронных реакций» посвящена актуальной научной проблеме получения достоверной информации о сечениях фотонейтронных реакций, свободных от систематических погрешностей разных экспериментов. Основные задачи работы – анализ достоверности экспериментальных сечений парциальных реакций с использованием объективных физических критериев, определение содержащихся в сечениях систематических погрешностей, их учет и получение с использованием экспериментально-теоретического метода оценки новых сечений реакций, удовлетворяющих физическим критериям достоверности.

В процессе выполнения диссертационной работы Давыдовым А.И. установлено, что экспериментальные сечения парциальных фотонейтронных реакций  $(\gamma, 1n)$ ,  $(\gamma, 2n)$ ,  $(\gamma, 3n)$  на ядрах  $^{51}\text{V}$ ,  $^{59}\text{Co}$ ,  $^{58,60}\text{Ni}$ ,  $^{63,65}\text{Cu}$ ,  $^{75}\text{As}$ ,  $^{76,78,80,82}\text{Se}$ ,  $^{89}\text{Y}$ ,  $^{90,91,92,94}\text{Zr}$ ,  $^{103}\text{Rh}$ ,  $^{127}\text{I}$ ,  $^{165}\text{Ho}$ ,  $^{181}\text{Ta}$ ,  $^{206,207}\text{Pb}$ , полученные с помощью метода разделения нейтронов по множественности в двух лабораториях (Ливермор (США) и Сакле (Франция)), существенно (до 100% величины) систематически различаются и, в той или иной степени, не удовлетворяют объективным физическим критериям достоверности. В качестве таких критериев использованы отношения  $F_i$  сечений конкретных парциальных реакций  $\sigma(\gamma, 1n)$ ,  $\sigma(\gamma, 2n)$  и  $\sigma(\gamma, 3n)$  к сечению выхода нейтронов  $\sigma(\gamma, xn) = \sigma(\gamma, 1n) + 2\sigma(\gamma, 2n) + 3\sigma(\gamma, 3n)$ , которые по определению не должны превышать значений 1.00, 0.50 и 0.33 соответственно. Обнаружено, что в разных областях энергий налетающих фотонов в исследованных экспериментальных сечениях парциальных реакций имеется большое количество значений, превышающих упомянутые верхние пределы, а также физически запрещенных отрицательных значений, в связи с чем, обсуждаемые результаты экспериментов не являются достоверными.

Для 22 указанных ядер с помощью экспериментально-теоретического метода оценены новые сечения парциальных и полных фотонейтронных реакций, удовлетворяющие критериям достоверности. Оценка сечений проводилась с помощью соотношений  $\sigma^{\text{оцен}}(\gamma, in) = F_i^{\text{теор}} \times \sigma^{\text{эксп}}(\gamma, xn)$ , где  $\sigma^{\text{эксп}}(\gamma, xn)$  – сечение выхода нейтронов, не зависящее от проблем экспериментального разделения фотонейтронов по множественности, поскольку включает в себя вклады от всех энергетически возможных парциальных реакций, а  $F_i^{\text{теор}}$  – упомянутые выше отношения, рассчитанные в рамках комбинированной модели фотоядерных реакций, которые абсолютно не зависят от проблем экспериментального определения множественности фотонейтронов.

Экспериментально-теоретический метод оценки сечений реакций, удовлетворяющих физическим критериям достоверности, был Давыдовым А.И. дополнен детальным анализом разностей между оцененными и экспериментальными сечениями реакций, позволившим ему установить причины наблюдающихся в экспериментальных данных существенных систематических погрешностей, делающих эти данные недостоверными. Установлено, что расхождения между оцененными и экспериментальными сечениями реакций, а также между сечениями, полученными в разных экспериментах, обусловлены присутствием в экспериментальных данных систематических погрешностей трех разных типов.

В случаях ядер  $^{76,78,80,83}\text{Se}$ ,  $^{89}\text{Y}$ ,  $^{90,91,92,94}\text{Zr}$ , и  $^{103}\text{Rh}$  аналогично тому, что наблюдалось ранее для большого количества среднетяжелых ядер, основной причиной расхождений между экспериментальными и оцененными сечениями парциальных реакций, как  $(\gamma, 1n)$  и  $(\gamma, 2n)$  является определенный недостаток использованного метода разделения фотонейтронов по множественности, основанного на измерении их энергий. Такой способ определения множественности приводит к неоднозначности идентификации принадлежности зарегистрированного нейтрона к той или иной парциальной реакции. Этот недостаток экспериментального метода обусловлен тем обстоятельством, что нейтроны из реакций  $(\gamma, 1n)$  и  $(\gamma, 2n)$  имеют заметно различающиеся энергии только в том случае, когда конечное ядро реакции  $(\gamma, 1n)$  образуется в основном состоянии. В большинстве случаев это – не так. При образовании конечного ядра реакции  $(\gamma, 1n)$  в возбужденных состояниях вылетающие нейтроны будут иметь меньшие энергии, близкие к энергиям обоих нейтронов из реакции  $(\gamma, 2n)$ , что и приводит к отмеченной выше неоднозначности распределения нейтронов между этими реакциями.

В случаях относительно легких ядер  $^{51}\text{V}$ ,  $^{59}\text{Co}$ ,  $^{63,65}\text{Cu}$  и  $^{58,60}\text{Ni}$  было установлено проявление систематических погрешностей иного типа, обусловленных отсутствием в экспериментах для этих ядер учета вклада двухнуклонной реакции  $(\gamma, 1n1p)$ . Поскольку во всех обсуждаемых экспериментах использовалась прямая регистрация нейтронов, в них реально получалось не сечение реакции  $(\gamma, 1n)$ , а сумма сечений  $\sigma(\gamma, 1n) + \sigma(\gamma, 1n1p)$ . В случаях относительно легких ядер сечение реакции  $(\gamma, 1n1p)$  по энергетическому положению и абсолютной величине оказывается сравнимым с сечением реакции  $(\gamma, 2n)$  и, вследствие этого, реакция  $(\gamma, 1n1p)$  играет весьма важную роль в фоторасщеплении ядра, прежде всего, с точки зрения распределения нейтронов по каналам с различной множественностью. С точки зрения проблемы достоверности распределения нейтронов между реакциями  $(\gamma, 1n)$  и  $(\gamma, 2n)$  особая роль реакции  $(\gamma, 1n1p)$  обусловлена тем, что распределение энергии возбуждения исследуемого ядра между нейтроном и протоном в этой также двухнуклонной реакции происходит приблизительно так же, как между двумя нейтронами в реакции  $(\gamma, 2n)$ . Таким образом, энергия нейтрона из реакции  $(\gamma, 1n1p)$  оказывается близкой не к энергии нейтрона из реакции  $(\gamma, 1n)$ , в которой множественность нейтрона равна 1, а к энергиям обоих нейтронов из реакции  $(\gamma, 2n)$ , в которой множественность нейтрона равна 2. Присутствие в экспериментах заметного количества нейтронов с малыми энергиями, но с множественностью не 2, а 1 вносит дополнительную неопределенность в процесс идентификации множественности нейтрона по его энергии.

Для 4 ядер –  $^{75}\text{As}$ ,  $^{127}\text{I}$ ,  $^{181}\text{Ta}$  и  $^{208}\text{Pb}$  – наблюдаются существенные расхождения экспериментальных сечений реакций выхода нейтронов  $(\gamma, xn)$ , полученных в разных лабораториях, а также их расхождения с оцененными сечениями в области энергий фотонов ниже порога  $B_{2n}$  реакции  $(\gamma, 2n)$ , в которой нейтроны образуются только в реакции  $(\gamma, 1n)$ , проблемы определения множественности нейтронов отсутствуют, и сечения реакций  $(\gamma, xn)$ ,  $(\gamma, sn)$  и  $(\gamma, 1n)$  должны быть идентичными. Для указанных 4 ядер, а также ядер  $^{206,207}\text{Pb}$ , исследованных в диссертационной работе, обнаружена весьма характерная систематика соотношений сечений полных и парциальных реакций. Она свидетельствует о том, что чем больше вклад сечения простой реакции  $\sigma(\gamma, 1n)$  в сечения более сложных реакций, тем больше экспериментальные сечения этих реакций отличаются от оцененных сечений. В случае же отсутствия вклада сечения  $\sigma(\gamma, 1n)$  экспериментальное сечение  $\sigma(\gamma, 2n)$  оказывается весьма близким к оцененному сечению (в случаях ядер  $^{127}\text{I}$ ,  $^{181}\text{Ta}$  и  $^{206,207}\text{Pb}$  практически равным ему). Это означает, что характерные расхождения сечений реакций  $(\gamma, xn)$ ,  $(\gamma, sn)$  и  $(\gamma, 1n)$ , полученных в Ливерморе, с оцененными сечениями обусловлены недостоверным (необоснованным, ошибочным) занижением именно сечения  $\sigma(\gamma, 1n)$ : значительное количество нейтронов из реакции  $(\gamma, 1n)$  в экспериментах, выполненных в Ливерморе, было потеряно, по-видимому, по каким-то техническим причинам.

Полученные новые сечения реакций для исследованных 22 ядер вместе с данными, оцененными ранее, включены в международную электронную базу данных по ядерным реакциям под действием фотонов, нейтронов, заряженных частиц и тяжелых ионов, поддерживаемую Сетью Центров ядерных данных МАГАТЭ.

В процессе выполнения диссертационной работы Давыдовым А.И. для все 22 перечисленных выше ядер выполнены необходимые исследования, результаты которых были доложены на:

– международных конференциях “International conference on Nuclear Data for Science and Technology” ND2016 (Бельгия, Брюгге), ND2019 (Китай Пекин);

– международных конференциях по структуре ядра и ядерной спектроскопии (2015 – Минск; 2016 – Саров; 2017 – Алма-Ата; 2018 – Воронеж; 2019 – Дубна, 2020, 2021 – Санкт-Петербург, 2022 – Москва);

– конференциях «Ломоносовские чтения», 2016, 2019, 2022 гг.;

– конференциях «Ломоносов», 2017; 2018 гг.;

– конференциях «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине», 2019, 2020, 2021 гг.

и опубликованы в 23 статьях, из которых 20 - в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus (Phys. Rev. C, Eur. J. Phys. A, EJP Web of Conf., Amer. J. Phys. Appl., Ядерная физика, Известия РАН. Серия физическая, Вестник МГУ).

Таким образом, диссертационная работа Давыдова А.И. «Новые данные по сечениям парциальных фотонейтронных реакций» посвящена весьма актуальной научной проблеме и является законченным научным трудом, в котором получено большое количество важных научных результатов. Полученные Давыдовым А.И. достоверные сечения фотонейтронных реакций дополнили и актуализировали фонд международной электронной базы данных по ядерным реакциям и могут быть широко использованы как в ядерно-физических исследованиях, так и в разнообразных приложениях. В процессе работы над диссертацией Давыдов А.И. зарекомендовал себя высококвалифицированным исследователем, обладающим навыками, необходимыми, как для экспериментальных и теоретических исследований, так и для независимой оценки их результатов. Его работу отличает тщательность, аккуратность и стремление к разнообразным проверкам получаемых результатов оценки.

Считаю, что представленная к защите диссертация удовлетворяет всем требованиям к кандидатским диссертациям, установленным в МГУ, а ее автор Давыдов А.И. безусловно заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности по специальности 1.3.15 – Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий.

7 февраля 2023 года

Научный руководитель  
главный научный сотрудник ОЭПВАЯ НИИЯФ МГУ  
доктор физико-математических наук  
профессор по специальности 01.04.16

В.В.Варламов

---

Подпись В.В.Варламова удостоверяю  
Ученый секретарь ученого совета НИИЯФ МГУ

Е.А.Сигаева