

ОТЗЫВ
официального оппонента диссертационной работы
Дмитриевой Ульяны Александровны
«Изучение ультрапериферических столкновений ядер на коллайдерах»,
представленной на соискание ученой степени кандидата физико-
математических наук по специальности 01.04.16 –
физика атомного ядра и элементарных частиц.

Диссертационная работа У.А. Дмитриевой посвящена весьма актуальной современной научной проблеме - исследованиям в электромагнитных взаимодействиях ядер в их ультрапериферических столкновениях (УПС). Полное сечение электромагнитной диссоциации (или электромагнитной фрагментации) в столкновениях ультрарелятивистских ядер на современных коллайдерах многократно превосходит полное адронное сечение, что сказывается на времени жизни пучка в таких ускорителях и с большой вероятностью приводит к образованию определенных вторичных ядер. Регистрация нейтронов, образующихся в процессах УПС, служит триггером электромагнитных взаимодействий и используется для мониторинга светимости коллайдеров в сеансах ядро-ядро. УПС характеризуются прицельными параметрами, превосходящими сумму радиусов ядер, и имеют ту особенность, что в них исключается влияние сильного взаимодействия, что позволяет в чистом виде выделить электромагнитные процессы и открывает возможность напрямую изучить воздействие на ядра Лоренц-сжатых кулоновских полей. Такое воздействие, согласно известному методу Вайцзекера-Вильямса, сводится к обмену эквивалентными фотонами. При поглощении таких фотонов при энергиях, превосходящих пороги эмиссии нуклонов, осуществляются фотоядерные реакции, в которых эти нуклоны испускаются. При этом доминируют процессы возбуждения и распада гигантских дипольных резонансов. При энергии фотонов ниже порогов эмиссии нуклонов происходит возбуждение дискретных уровней в ядре, что приводит к эмиссии вторичных фотонов, аналогичной известному явлению ядерной резонансной флюоресценции (ЯРФ). Следует отметить, что хотя ЯРФ достаточно подробно исследовалась при облучении гамма-квантами различных мишеней, аналогичный процесс в УПС на коллайдерах рассмотрен У.А. Дмитриевой впервые. Таким образом, в рассмотренной работе тесно связаны физика ядра, возбуждения ядер при низких и средних энергиях и физика ядро-ядерных столкновений высоких энергий.

Исследования, проведенные диссертантом и посвященные электромагнитным взаимодействиям ядер в УПС применительно к действующему коллайдеру LHC (Large Hadron Collider) в ЦЕРН, строящемуся коллайдеру NICA (Nuclotron based Ion Collider Facility) в Дубне, и проектируемому коллайдеру FCC (Future Circular Collider) в ЦЕРН, выполненные с помощью модели RELDIS, разработанной в Институте ядерных исследований РАН, имеют большое научное значение, а также практическую и методическую ценность, по меньшей мере, в трех аспектах:

- 1) Вычислены сечения образования различных вторичных ядер, образующихся в результате электромагнитной диссоциации ядер индия, золота и свинца на коллайдерах LHC, NICA, FCC-hh. Сечения сгруппированы по величинам Z/A вторичных ядер, что позволяет оценивать положения траекторий ядер в магнитных

полях ускорителей и определять последствия возможного воздействия таких ядер на элементы экспериментальных установок.

- 2) Обоснован метод определения выходов вторичных ядер посредством точного измерения сечений вылета определённого числа нейтронов и протонов в результате ЭМД. Вычисления диссертанта убедительно показали, что в подавляющем большинстве событий ЭМД с небольшим количеством регистрируемых свободных нуклонов образуется единственное остаточное ядро.
- 3) Получены аналитические выражения, для учета эффективности и акцептанса передних адронных калориметров в отношении детектирования многонуклонных событий, что позволило диссертанту существенно повысить точность измерений. На примере нейтронных и протонных калориметров эксперимента ALICE на LHC показано соответствие поправочных коэффициентов, полученных аналитическим методом, коэффициентам, вычисленным посредством Монте-Карло моделирования эмиссии и транспорта нуклонов от ЭМД в этом эксперименте.

Диссертационная работа У.А. Дмитриевой состоит из Введения, шести Глав, Заключение, Списка публикаций диссертанта по теме диссертации из 11 наименований, Списка цитированной литературы из 78 наименований и раздела «Приложения». Диссертация изложена на 145 страницах и включает в себя 41 рисунок и 32 таблицы.

Во Введении обоснована актуальность диссертационной работы, указаны общая цель и конкретные задачи диссертации, показана новизна, научная (теоретическая) и практическая значимость полученных результатов, перечислены положения, выносимые на защиту, приведены сведения об апробации работы, публикациях и личном вкладе автора.

В Главе 1 описывается применяемая в работе модель RELDIS (Relativistic Electromagnetic DISSociation) описывающая электромагнитную диссоциацию ядер на основе метода Монте-Карло. RELDIS использует метод эквивалентных фотонов Вайцзекера-Вильямса и каскадно-испарительно-делительную модель фотоядерных реакций. Приведены впервые вычисленные с помощью RELDIS сечения образования вторичных ядер в результате УПС $^{208}\text{Pb}-^{208}\text{Pb}$ и $^{197}\text{Au}-^{197}\text{Au}$ на коллайдерах LHC и NICA, соответственно. Показана возможность оценки сечений образования отдельных вторичных ядер на основе измеренных сечений эмиссии соответствующего числа нейтронов и протонов. Даны предсказания для сечений трансмутации ядер ^{208}Pb в ядра Tl, Hg, Au, Pt, Ir, Os, Re, W, Ta, Hf в УПС на LHC, которые сравниваются с сечениями образования, соответственно, 1, 2, 3, ..., 10 протонов.

В Главе 2 по результатам вычислений в модели RELDIS и модели Glauber Monte Carlo проводится сравнение $^{115}\text{In}-^{115}\text{In}$ и $^{208}\text{Pb}-^{208}\text{Pb}$ взаимодействий на LHC и проектируемом коллайдере FCC-hh. Исследованы выходы вторичных ядер, оценены соотношения электромагнитных и адронных событий в точках взаимодействия. Сделан важный вывод о том, что использование пучков ядер промежуточной массы, таких как ^{115}In , имеет преимущество по величине эффективной нуклон-нуклонной светимости на коллайдерах LHC и FCC-hh, так как для ядер промежуточной массы снижена доля ядер, выбывающих из пучка в результате электромагнитных взаимодействий. Результаты, представленные во второй главе, несомненно, окажут влияние на выбор сталкивающихся ядер в будущих экспериментах на коллайдере FCC-hh.

Глава 3 посвящена ЯРФ – эмиссии фотонов ядрами ^{208}Pb в результате возбуждения эквивалентными фотонами дискретных уровней в ядрах ^{208}Pb в их процессах УПС на коллайдерах LHC и FCC-hh. Этот процесс в научной литературе рассмотрен впервые. Диссертантом вычислены дифференциальные распределения по углам вылета, энергиям и псевдобыстроте фотонов от ЯРФ, получены удобные аналитические выражения, вычислены полные сечения ЯРФ. Установлено, что на коллайдерах LHC и FCC-hh максимальная энергия фотонов при их эмиссии вперёд достигает 40 ГэВ и 300 ГэВ, соответственно. Показано, что в эксперименте ALICE на LHC рассмотрение ЯРФ очень важно с точки зрения оценки фоновых процессов при детектировании нейтронов в используемых Zero Degree Calorimeters (ZDC), поскольку фотоны от ЯРФ в принципе могут попадать в передние детекторы установки ALICE.

В Главе 4 представлена разработанная диссертантом аналитическая комбинаторная модель для вычисления энерговыделения в ZDC с учетом их ограниченного акцептанса. Вместе с моделью RELDIS аналитическая модель использована для вычисления характерных спектров поглощённой в ZDC энергии в экспериментах на LHC и NICA, с учетом типичных энергетических разрешений этих калориметров и для определённых значений вероятности регистрации нуклона в ZDC.

В Главе 5 детально представлен альтернативный метод вычисления поправок на эффективность и акцептанс передних нейтронных и протонных калориметров эксперимента ALICE на LHC. Моделирование экспериментальной установки выполнено методом Монте-Карло с помощью программного инструментария, используемого в ALICE и модели RELDIS в качестве генератора событий. Используются два способа определения количества попавших в калориметры нуклонов: путем фитирования пиков в спектрах поглощенной в ZDC энергии и путем подсчета числа нуклонов соответствующей множественности, пересекших фронтальную входную плоскость ZDC. Установлено, что результаты Монте-Карло моделирования двумя способами согласуются с результатами, полученными с помощью аналитической модели, использованной в Главе 4, что подтверждает их достоверность.

В Главе 6 вычисленные с помощью разработанных методов учета эффективности и акцептанса ZDC поправки использованы в измерениях в эксперименте ALICE сечений эмиссии определенного числа нейтронов в ЭМД ядер ^{208}Pb . Измеренные сечения согласуются с результатами моделей RELDIS и n_{O}^{O} . Существенным результатом измерений является получение оценок сечений выхода вторичных ядер ^{207}Pb , ^{206}Pb и ^{205}Pb , которые в сумме заметно превышают половину полного сечения ЭМД ядер ^{208}Pb на LHC. Такие ядра могут воздействовать на компоненты LHC, поэтому оценка этих сечений на основе экспериментальных данных в дополнение к вычисленным сечениям является важным результатом диссертации.

Достоверность результатов, полученных диссертантом, подтверждается тем, что они согласуются с результатами, полученными другими теоретическими методами, а также с экспериментальными данными. Рассчитанные диссертантом в трех независимых методах оценки эффективности адронных калориметров установки ALICE, согласуются с результатами обобщенного вероятностного метода. Экспериментальные данные по выходам нуклонов от электромагнитной диссоциации ядер ^{208}Pb в эксперименте ALICE – измеренных диссертантом сечений эмиссии определенного количества (1–5) нейтронов – согласуются с предсказаниями модели RELDIS. Основные результаты диссертации

хорошо апробированы - представлены в шести журнальных публикациях и трех сборниках трудов конференций.

Диссертация написана ясным языком, хорошо иллюстрирована и содержит необходимые списки публикаций и ссылок. Вместе с тем к ее содержанию и оформлению могут быть сделаны определенные замечания.

Замечания относительно существа выполненных исследований, структуры диссертации и отражения значения ее содержания.

- 1) Большое научное значение полученных диссертантом результатов недостаточно адекватно отражается в тексте, что определенно снижает впечатление о них. Так, в разделе «Степень достоверности и апробация результатов» присутствует информация о конференциях, на которых докладывались результаты диссертации, а информация о степени их достоверности отсутствует, хотя в тексте диссертации подробные сравнения с результатами, полученными другими методами, а также с экспериментальными данными, подтверждающие достоверность результатов, полученных диссертантом, представлены. О достоверности полученных диссертантом результатов несомненно свидетельствует согласие оценок эффективности адронных калориметров установки ALICE, полученных тремя независимыми методами, с результатами, полученными обобщенным вероятностным методом, согласие результатов анализа экспериментальных данных по выходам нуклонов от электромагнитной диссоциации ядер ^{208}Pb в эксперименте ALICE – измеренных диссертантом сечений эмиссии определенного количества (1–5) нейтронов с предсказаниями модели RELDIS.
- 2) Очень подробно написаны в диссертации и автореферате разделы "Положения, выносимые на защиту". Это - основные результаты диссертации. Именно они должны быть выделены в разделах "Заключение". Но это - не так. В разделе «Заключение» диссертации основные результаты представлены, но теряются в длинных описаниях, совсем не обязательных для такого раздела, а в автореферате в разделе «Заключение», по существу, представлено краткое описание того, что делалось.
- 3) При рассмотрении явления ядерной резонансной флюоресценции (ЯРФ) в Главе 3 сделано два предположения, существенно упрощающих вычисления: во-первых, предполагается, что доминирует процесс прямой ЯРФ, в котором возбужденное состояние распадается исключительно за счет эмиссии фотона с прямым переходом в основное состояние, а во-вторых, предполагается изотропное распределение излучаемых вторичных фотонов, независимо от состояния спин-четность возбужденного уровня. Необходимый комментарий возможных последствий подобных упрощений для полученных результатов отсутствует.
- 4) В разделе 1.3 на стр. 24-25 говорится, что «...по нескольким причинам простой метод определения...становится менее точным...», однако причины этого не обсуждаются, а рассматриваются далее в тексте следующего раздела 1.4 (стр. 29-33). Было бы более, чем уместно, в разделе 1.3 сделать отсылку к разделу 1.4.

Замечания относительно оформления диссертации (примеры).

- 1) В разделе «Публикации по теме диссертации» Введения указано, что материалы

диссертации опубликованы в 10 печатных работах, тогда как в разделе «Список публикаций» таковых – 11.

- 2) Подпись к Рис. 1.1 выполнена нетрадиционным способом – вместо конкретного обозначения того, что именно приводится, дается подробное описание процесса ультрапериферических столкновений ядер, которое более уместно было бы привести в тексте.

Замечания относительно стилистических погрешностей (примеры).

- Стр. 21: «...моделирование поглощения..., приводящее к образованию...частиц...», хотя к образованию частиц приводит не моделирование, а поглощение.
- Стр. 25: в названии раздела 1.4. «Оценка образования вторичных ядер...» формулировка представляется некорректной, по-видимому, должно быть «Оценка выходов», так как именно об оценке выходов вторичных ядер идет речь в этом разделе.
- Стр. 31: вместо фразы «Из-за мезонов и легких ядер, ...» целесообразна была бы формулировка типа «Вследствие заметного присутствия в рассматриваемых процессах мезонов и легких ядер...».
- Стр. 39: целесообразно было бы объяснить, какая специфичность имеется в виду во фразе «...рождаются специфические вторичные ядра (например, $^{206,207}\text{Pb}$) ...».

Замечания относительно грамматических погрешностей и опечаток.

- Стр. 24: «...испущенных нейтронов. определения».
- Стр. 57-58: «...учитывается фактическая энергию пучка...».
- Стр. 69: «...Эксперименте ALICE...оснащен...».
- Стр. 96: «Рекомендуемые...»

Указанные замечания ни в коей мере не снижают общей оценки работы, выполненной на высоком научном уровне. В диссертации получены важные физические и методические результаты, имеющие большое научное и практическое значение для проведения экспериментов на коллайдерах, оценок условий работы ускорителей. Автореферат полно и правильно отражает содержание диссертации. Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу и удовлетворяет всем критериям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор, **Дмитриева Ульяна Александровна**, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 "физика атомного ядра и элементарных частиц".

Главный научный сотрудник

Отдела электромагнитных процессов и взаимодействий атомных ядер
Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д.В. Скобельцына
Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова
доктор физико-математических наук
профессор по специальности 01.04.16

Владимир Васильевич Варламов
27.07.2022

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына
119991 Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 2, НИИЯФ МГУ

e-mail: vvvarlamov@gmail.com Тел.: +7 (495) 939 3483.

Подпись В.В. Варламова удостоверяю:
Ученый секретарь НИИЯФ МГУ

Екатерина Александровна Сигаева
27.07.2022

Список основных публикаций В.В.Варламова с соавторами по теме рецензируемой диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. Варламов В.В. Экспериментальные и оцененные данные по фоторасщеплению ядра ^{197}Au .// Ядерная физика. 2022 – Т. 85. №4. – С. 2-13.
2. Варламов В.В. Фоторасщепление ядер $^{206,207,208}\text{Pb}$: экспериментальные и оцененные сечения фотонейтронных реакций.// Известия РАН. 2022. Серия физическая. - Т. 86. №4. – С. 563–570.
3. Варламов В.В. Физические критерии достоверности и особенности данных по фоторасщеплению ядер ^{75}As , ^{127}I , ^{181}Ta и ^{208}Pb .// Ядерная физика. 2021 – Т. 84. №5. –С. 370-381.
4. Varlamov V.V. Photonuclear Data Library 2019.// Nuclear Data Sheets. 2020. – V. 163. – P. 109–162.
5. Varlamov V.V. Photodisintegration of ^{127}I : Systematic Uncertainties of Experiments and Data Evaluated Using Physical Criteria.// American Journal of Physics and Applications. 2020. – V. 8. N5. – P. 64-72.
6. V.V.Varlamov. Reference database for photon strength functions.// Eur. Phys. J. A. 2019. – V. 55. – P. 172 (52 pages).
7. V.V.Varlamov. Reliability of photonuclear data: various experiments and evaluations.// Physics of Particles and Nuclei. 2019. – V. 50. N5. – P. 637-643.
8. .V.V.Varlamov. The reliability of photoneutron cross sections for $^{90,91,92,94}\text{Zr}$.// 2018. Eur. Phys. J. A. – V. 54. – P. 74 (10 pages).
9. V.V.Varlamov. Reliability of $(\gamma,1n)$, $(\gamma,2n)$, and $(\gamma,3n)$ cross-section data on ^{159}Tb .// 2017. Phys. Rev. C. – V. 95. N5. – P. 054607 (5 pages).
10. V.V.Varlamov. Photoneutron cross-section measurements in the $^{209}\text{Bi}(\gamma,xn)$ reaction with a new method of direct neutron-multiplicity sorting.// 2017. Phys. Rev. C. – V. 96. N4. – P. 044604 (12 pages).
11. V.V.Varlamov. Experimental and evaluated photoneutron cross sections for ^{197}Au .// Phys Rev. C. 2017. – V. 96. N4. – P. 044606 (7 pages).
12. V.V. Varlamov. A unified understanding of (γ,n) and (n,γ) reactions and direct neutron-multiplicity sorting.// EPJ Web of Conferences. 2017. – V. 146. – P. 05002 (6 pages).
13. V.V.Varlamov. Photoneutron reactions in the range of Giant Dipole Resonance.// Physics of Particles and Nuclei. 2017. – V. 48. N1. – P. 76–83.
14. В.В.Варламов. Современный статус фотоядерных данных.// Ядерная физика. 2017. – Т. 80. N5. – С. 554-564.
15. V.V.Varlamov. Future prospects of nuclear reactions induced by gamma-ray beams at ELI-NP.// Physics of Particles and Nuclei. 2017. – V. 48. N1. – С. 134–138.