

«УТВЕРЖДАЮ»

Вице-директор Международной
межправительственной организации
Объединенный институт ядерных исследований
член-корреспондент РАН В.Д. Кекелидзе

05 августа 2022 г

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

**на диссертационную работу Дмитриевой Ульяны Александровны
«Изучение ультрапериферических столкновений ядер на коллайдерах»,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности 01.04.16 – Физика атомного ядра и элементарных частиц**

Диссертационная работа Дмитриевой Ульяны Александровны выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН). Тема диссертации относится к области современной физики высоких энергий – исследованиям столкновений релятивистских ядер. В столкновениях таких ядер прежде всего изучается природа сильного взаимодействия. При этом в ультрапериферических столкновениях ядер, в которых плотности ядер не пересекаются, взаимодействие носит исключительно электромагнитный характер. Таким взаимодействиям уделяется гораздо меньше внимания, и данная работа заполняет этот пробел. Известно, что сечение электромагнитного взаимодействия ядер в современных коллайдерных экспериментах велико, и кулоновские поля сталкивающихся ядер с большой вероятностью приводят к их электромагнитной диссоциации. Образование вторичных ядер в ультрапериферических столкновениях ограничивает время жизни пучков, а такие ядра могут оказывать воздействие на компоненты ускорителей. Таким образом, **актуальность** данной работы не вызывает сомнений.

Диссертация Дмитриевой У. А. изложена на 145 страницах, содержит 41 рисунок, 32 таблицы и список цитируемой литературы из 78 наименований.

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы ее цели, представлены выносимые на защиту основные результаты и другие общие сведения о работе.

В первой главе описывается модель RELDIS, используемая для моделирования ультрапериферических столкновений ядер, с помощью которой вычисляются сечения эмиссии определенного числа нейтронов и протонов и сечения выходов соответствующих вторичных ядер для столкновений ядер свинца Pb на LHC и ядер золота Au на NICA. Представлен и обоснован метод оценки выходов вторичных ядер по выходам соответствующего числа нейтронов и протонов.

Во второй главе вычисляются полные сечения адронных и электромагнитных взаимодействий ядер индия ^{115}In и свинца ^{208}Pb при энергиях LHC и проектируемого коллайдера FCC-hh. Электромагнитные взаимодействия представлены электромагнитной диссоциацией ядер и рождением электрон-позитронных пар с захватом электрона ядром. На основе изучения соотношений между указанными сечениями сделан вывод о том, что использование на коллайдерах LHC и FCC-hh пучков ядер промежуточной массы, таких как In, имеет преимущество перед использованием Pb в отношении эффективной нуклон-нуклонной светимости.

В третьей главе представлена разработанная автором диссертации теория ядерной резонансной флуоресценции, индуцированной фотонами Вайцеккера-Вильямса в ультрапериферических столкновениях релятивистских ядер на коллайдерах LHC и FCC-hh. Вычислены дифференциальные распределения фотонов по углам вылета, энергиям и псевдобыстроте, а также полные и парциальные сечения ядерной резонансной флуоресценции. Обсуждается возможность регистрации фотонов от ядерной резонансной флуоресценции в различных передних детекторах, обсуждается возможность мониторинга светимости коллайдеров посредством такой регистрации.

В четвертой главе представлена разработанная автором диссертации вероятностная модель для учета акцептанса и эффективности регистрации нуклонов от электромагнитной диссоциации ядер в передних адронных калориметрах ZDC. Получены компактные аналитические выражения, связывающие количества испущенных и зарегистрированных в ZDC нуклонов отдельно для каждой их множественности в событии. Были вычислены характерные энергетические спектры в передних адронных калориметрах в результате поглощения нейтронов и протонов от электромагнитной диссоциации ядер на LHC и NICA.

В пятой главе представлены разработанные автором диссертации Монте-Карло методы определения эффективности регистрации нуклонов от электромагнитной диссоциации передними нейтронными и протонными калориметрами ZDC эксперимента ALICE. Для этих целей модель RELDIS была имплементирована в качестве генератора событий в пакет объектно-ориентированных программ и библиотек AliPhysics эксперимента ALICE. В пакете

AliPhysics было выполнено полное Монте-Карло моделирование электромагнитной диссоциации на установке ALICE, включая транспорт испущенных нейтронов и протонов с последующим моделированием энерговыделения в ZDC. Поправочные коэффициенты на эффективность регистрации нуклонов отдельных множественностей были вычислены тремя независимыми методами, показавшими хорошее согласие между собой. Рекомендуемые для дальнейшего анализа экспериментальных данных поправочные коэффициенты определены как среднее двух Монте-Карло методов с соответствующими систематическими ошибками.

В шестой главе представлены результаты анализа экспериментальных данных, полученных в эксперименте ALICE с помощью передних адронных калориметров ZDC. В анализ включались события, в которых был зарегистрирован хотя бы один нейтрон, что в большинстве случаев соответствует электромагнитной диссоциации. Измеренные сечения эмиссии одного, двух, трех, четырех и пяти нейтронов, сопровождаемые эмиссией протонов, сравниваются с результатами двух независимых моделей RELDIS и pOOn и могут быть в последствии использованы для дальнейшей настройки моделей. Измеренные сечения эмиссии одного, двух, трех, четырех и пяти нейтронов без эмиссии протонов сравниваются с результатами RELDIS, включая вычисленные сечения образования изотопов свинца $^{207,206,205,204,203}\text{Pb}$. Показано, что измеренные сечения эмиссии нуклонов можно рассматривать в качестве оценок сверху для сечений образования соответствующих изотопов свинца.

В заключении диссертации подведены итоги выполненной работы.

Научная новизна рассмотренной диссертации подтверждается следующим. Во-первых, впервые для ультрапериферических столкновений ядер был рассмотрен хорошо известный в физике низких энергий процесс ядерной резонансной флуоресценции. Разработанная теория содержит удобные аналитические выражения для распределений фотонов от ядерной резонансной флуоресценции по энергии, углу и псевдобыстроте и для сечений отдельных возбужденных состояний. Обсуждается, возможность регистрации таких фотонов на LHC. Во-вторых, впервые выполнено моделирование электромагнитной диссоциации ядер индия и свинца на проектируемом коллайдере FCC-hh и проведен сравнительный анализ данных ядер с точки зрения эффективной нуклон-нуклонной светимости.

Практическая значимость работы состоит в том, что разработанная Дмитриевой У. А. аналитическая вероятностная модель позволяет учесть ограниченный аксептанс передних адронных калориметров и оценить поправочные коэффициенты на эффективность регистрации нуклонов от ЭМД для любых калориметров с известными характеристиками энергетического разрешения и аксептанса без полного Монте-Карло моделирования экспериментальной установки. Данный метод был разработан впервые. Кроме того, в работе

на примере столкновений ядер свинца Pb и золота Au было показано, что доминирующим каналом электромагнитной диссоциации ядер является образование единственного ядра-остатка, сопровождаемое эмиссией небольшого числа нуклонов. При этом, в большинстве событий такие ядра могут быть однозначно определены по испущенным нейтронам и протонам, что было показано с помощью модели RELDIS. Таким образом, результаты диссертации имеют большую практическую ценность и могут быть использованы, в том числе, при подготовке физической программы экспериментов на коллайдере NICA.

Личный вклад автора диссертации в описанное исследование является определяющим. Выносимые на защиту результаты получены автором лично, либо при его определяющем участии.

Достоверность полученных в данной работе результатов не вызывает сомнений.

В целом, работа выполнена на высоком научном уровне. **К недостаткам** работы можно отнести следующее:

1) В Главе 1 представлен метод Вайцзеккера – Вильямса, используемый для описания ультрапериферических столкновений ядер, однако информация о границах и условиях его применимости не представлена.

2) Результаты моделирования столкновений ядер золота на NICA получены в предположении, что эксперимент MPD будет обладать схожими с экспериментом ALICE на LHC возможностями регистрации вылетающих вперёд нуклонов. Однако, передние адронные калориметры ZDC (ALICE) и FHCAL (MPD) различаются по их геометрии и акцептансу, что сказывается на возможности разделять нейтроны и протоны в эксперименте MPD.

В целом, диссертация написана четким и понятным языком, но не лишена небольшого количества опечаток и грамматических ошибок. Например:

- 1) опечатка на стр. 15: «флюоресценции» вместо «флуоресценции»
- 2) на Рис. 1.7 не указана размерность величины на оси Y
- 3) грамматическая ошибка на стр. 42: «из-за очень высокой энергии пучка и тока» следует заменить на «из-за ... высоких энергии ... и тока»
- 4) на стр. 56: «фотонно-ядерного коллайдера» следует заменить на «фотон-ядерного ...»
- 5) на стр. 95: «статистические» следует читать «статистические»

Рассмотренная диссертация показывает, что её автор в совершенстве владеет современными методами вычислений. Методы исследований подробно описаны, даны обоснования их использования. В списке литературы упоминаются основные результаты

предыдущих исследований различных авторов, что показывает хорошее знание современного состояния исследований в данной области.

Диссертация обладает внутренним единством и содержит новые научные результаты.

Содержание диссертации соответствует специальности 01.04.16 – Физика атомного ядра и элементарных частиц.

Автореферат и опубликованные работы достаточно полно и правильно отражают содержание диссертации.

Диссертационная работа была представлена Дмитриевой У. А. на специализированном семинаре им. А. М. Балдина «Релятивистская ядерная физика и поляризационные явления» Лаборатории физики высоких энергий им. В. И. Векслера и А. М. Балдина (ЛФВЭ) ОИЯИ 20-го июля 2022 года.

Диссертация Дмитриевой Ульяны Александровны **«Изучение ультрапериферических столкновений ядер на коллайдерах»** отвечает требованиям «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 заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 – Физика атомного ядра и элементарных частиц.

Отзыв на диссертацию рассмотрен и одобрен научно-техническим советом ЛФВЭ.

Отзыв подготовил

доктор физико-математических наук,
начальник НЭОФТИ ЛФВЭ ОИЯИ,

А. И. Малахов

Тел.: +7 (496) 216-58-84

e-mail: malakhov@jinr.ru

Международная межправительственная организация Объединенный институт ядерных исследований, 141980, Российская Федерация, Московская обл., г Дубна, ул. Жолио-Кюри, д. 6., тел.: +7 (49621) 6-50-59, e-mail: post@jinr.ru

**Список основных публикаций сотрудников
Международной межправительственной организации
Объединенный институт ядерных исследований
по теме диссертации в рецензируемых научных изданиях
за последние 5 лет:**

1. V. Golovatyuk et al., «Multi-purpose detector to study heavy-ion collisions at the NICA collider», Nucl. Phys. A **982** (2019) 963–966
2. S. Acharya et al., «Coherent J/ψ photoproduction at forward rapidity in ultra-peripheral Pb–Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV» Phys. Lett. B **798** (2019) 134926
3. F. Guber et al., «Measurements of Centrality in Nucleus–Nucleus Collisions at the BM@N Experiment», Phys. Part. Nucl. **52** (2021) 571–577
4. A. M. Sirunyan et al., «Observation of forward neutron multiplicity dependence of dimuon acoplanarity in ultraperipheral Pb–Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV», Phys. Rev. Lett. **127** (2021) 122001
5. S. Acharya et al., «First measurement of coherent ρ^0 photoproduction in ultra-peripheral Xe–Xe collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.44$ TeV» Phys. Lett. B **820** (2021) 136481
6. G. Aad et al., «Two-particle azimuthal correlations in photonuclear ultraperipheral Pb+Pb collisions at 5.02 TeV with ATLAS», Phys. Rev. C **104** (2021) 014903
7. G.D. Milnov, A.G. Litvinenko, A.I. Malakhov, E.V. Sukhov, V.V. Ustinov, «Time Characteristics of the Scintillation Counter of the Luminosity Measurement Detector at NICA», Phys. Part. Nucl. Lett. **19** (2022) 362-367
8. V. Abgaryan et al., «Status and initial physics performance studies of the MPD experiment at NICA», Eur. Phys. J. A **58** (2022) 140