

УТВЕРЖДАЮ  
Первый заместитель директора  
Центра по науке  
Ю.А. ДЬЯКОВА

---

« 21 » декабря 2023 г.

**Отзыв ведущей организации  
Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт"**

на диссертационную работу Светличного Александра Олеговича  
**«Свойства спектаторной материи в столкновениях релятивистских ядер»**,  
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических  
наук по специальности 1.3.15 – Физика атомного ядра и элементарных частиц,  
физика высоких энергий.

**Актуальность темы диссертации.**

Диссертационная работа А.О. Светличного посвящена изучению свойств спектаторной материи, относящейся к невзаимодействующим частям ядер, в их столкновениях при релятивистских энергиях. Изучение столкновений релятивистских ядер занимает центральное место в современной физике атомных ядер и физике высоких энергий. Наибольшее внимание в таких исследованиях обращено на свойства сильно разогретой ядерной материи в области перекрытия сталкивающихся ядер, так как именно там ожидается ее переход в кварк-глюонную плазму. Тем не менее, свойства холодной спектаторной материи вне указанной области также важны для этих исследований, и, как показано в диссертации, позволяют прицельно изучать широкий круг свойств ядер на пучках релятивистских тяжелых ионов.

Основу диссертации составляет разработка программы моделирования релятивистских ядро-ядерных столкновений ААМСС, ориентированной на описание спектаторных фрагментов и базирующейся на самых современных знаниях об этих процессах. Появление такой программы, созданной российским физиком, является крупным событием в данной области исследований. Использование ААМСС автором диссертации позволило в первую очередь предложить усовершенствования методов определения центральности событий в экспериментах на коллайдерах, а также предложить новые методы оценки вклада кластерных состояний в ядрах, определения геометрической формы ядер, поиска различий в распределениях нейтронов и протонов в ядрах. Это и обуславливает **актуальность и значимость** исследований, проведенных диссертантом.

**Структура и содержание диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка публикаций диссертанта из 13 наименований и списка литературы из 117 наименований. Полный объем диссертации составляет 118 страниц, включает в себя 32 рисунка и 7 таблиц.

**Во Введении** дан краткий обзор современного состояния области исследований, определены цели и задачи диссертационной работы. Показана научная новизна работы, обосновывается ее актуальность. Приводятся положения

выносимые на защиту и их научная и практическая значимость. Дается информация об апробации полученных результатов, публикациях, личном вкладе автора, структуре и объеме диссертационной работы.

**Первая глава** диссертации посвящена описанию созданной автором модели формирования спектаторных фрагментов в столкновениях релятивистских ядер, основанной на двухстадийном механизме взаимодействия ядер. Модель получила название Abrasion-Ablation Monte Carlo for Colliders (ААМСС). На первом этапе моделируется разделение нуклонов сталкивающихся ядер на нуклоны-спектаторы и нуклоны-партисипанты с использованием модели Глаубера в реализации Glauber Monte Carlo. Нуклоны-спектаторы, которые по определению не взаимодействуют в процессе столкновения, формируют спектаторные префрагменты. На втором этапе проводится моделирование распада возбужденного спектаторного префрагмента с использованием одного из трех методов для определения его энергии возбуждения. Для учета предравновесного разделения горячего фрагмента используется разработанная в диссертации модель MST-кластеризации. Моделирование вторичных распадов производится с использованием испарительной модели Вайскопфа-Ивинга, статистической модели мультифрагментации и Fermi Break-Up из библиотеки Geant4. Приводится сравнение результатов модели ААМСС с экспериментальными данными о выходах различных спектаторных фрагментов.

**Вторая глава** посвящена изучению ядерной фрагментации в столкновениях ядер различных энергий и центральностей. В ней проводится сравнение среднего максимального заряда спектаторного фрагмента, средней множественности фрагментов промежуточной массы ( $3 < Z < 30$ ), а также средних выходов фрагментов водорода и гелия в столкновениях ядер  $^{208}\text{Pb}$ – $^{208}\text{Pb}$  при энергиях ускорителей SPS и LHC. Также рассматриваются способы изучения ядерной фрагментации на коллайдерах, и исследуется состав спектаторных фрагментов в зависимости от числа нуклон-нуклонных столкновений. В работе также изучаются различные характеристики спектаторной материи, которые могут быть обнаружены в эксперименте MPD проекта NICA. Апостериорные вероятности принадлежности события к определенным классам центральности предлагается вычислять на основе теоремы Байеса, и особое внимание уделяется характеристикам спектаторной материи, специфическим для каждого класса центральности.

**Третья глава** посвящена исследованию проявления спектаторных фрагментов в ультрацентральных столкновениях релятивистских ядер. Отмечается, что в таких столкновениях спектаторная материя принимает форму тонкого полумесяца, что может привести к её потере связности. Представлены результаты моделирования образования спектаторных нуклонов в ультрацентральных столкновениях ядер  $^{208}\text{Pb}$  с учётом наличия поверхностного нейтронного слоя в этих ядрах. Показывается, что сечения эмиссии определенного числа спектаторных нейтронов, сопровождаемых определенным числом спектаторных протонов, вычисленные с помощью модели ААМСС, чувствительны к параметрам нейтронного слоя. Также предложен метод оценки параметров нейтронного слоя в экспериментах по ядро-ядерным столкновениям путём сравнения вычисленных сечений с измеренными. В этой же главе исследуются ультрацентральные столкновения деформированных ядер  $^{238}\text{U}$ , где

показывается, что распределения нейтронов по множественности и параметр асимметрии множественности нейтронов вперед-назад значительно меняются в зависимости от начальной взаимной ориентации сталкивающихся ядер.

**Четвертая глава** посвящена исследованию влияния альфа-кластеризации нуклонов в ядре  $^{16}\text{O}$  на спектаторные фрагменты, образующиеся при столкновениях релятивистских ядер  $^{16}\text{O}$  с мишенью. Было обнаружено, что выход спектаторных альфа-частиц зависит от наличия альфа-кластеров в  $^{16}\text{O}$ . Путем сравнения с экспериментальными данными по фрагментации  $^{16}\text{O}$  был оценен вклад кластеризованных состояний на уровне 30%. С использованием ААМСС был сделан прогноз состава спектаторной материи в столкновениях  $^{16}\text{O}$ – $^{16}\text{O}$  при энергиях коллайдера LHC с учетом внутренней альфа-кластеризации и короткодействующих нуклон-нуклонных корреляций. Было показано, что в значительной части столкновений не будут образовываться спектаторные нейтроны.

**В Заключение** суммируются основные результаты диссертационной работы и обсуждаются перспективы их практического использования.

**Научная новизна** данной работы заключается в следующем:

- (1) На основе модели Глаубера разработана оригинальная модель образования спектаторной материи в столкновениях ультрарелятивистских ядер, которая имеет открытый исходный код и доступна для использования в различных экспериментальных коллаборациях для исследования отклика передних калориметров и эффективности регистрации различных спектаторных фрагментов. Это позволит улучшить экспериментальные методики определения центральности столкновения и плоскости реакции.
- (2) Посредством моделирования впервые был изучен состав спектаторной материи в столкновениях релятивистских ядер золота на коллайдере NICA в зависимости от центральности столкновения. В диссертации были выявлены основные характеристики спектаторов, которые оказываются наиболее чувствительными к центральности столкновения, такие как выходы спектаторных нейтронов и нуклонов, дейтронов и альфа-частиц, количество заряженных фрагментов на спектаторный нуклон, а также асимметрия вперед-назад количества спектаторных нейтронов. На основе этого была предложена модификация методов определения центральности столкновения.
- (3) Впервые исследовано влияние внутренних альфа-кластерных состояний в ядре  $^{16}\text{O}$  на выходы спектаторных фрагментов. Путем сравнения с экспериментальными данными был оценен вклад альфа-кластерного состояния в ядре  $^{16}\text{O}$ .
- (4) Впервые для столкновений ядер кислорода на LHC с учетом кластеризации были рассчитаны распределения по множественности спектаторных нейтронов и дейтронов, фрагментов с определенным отношением заряда к массе, и была оценена вероятность столкновений вторичных спектаторных фрагментов с ядрами пучка, которая может привести к нежелательным примесям в данных по столкновениям ядер кислорода.

**Основные положения** диссертационной работы состоят в следующем:

1. Разработана модель образования спектаторной материи, образующейся в столкновениях релятивистских ядер, с целью совершенствования методов изучения ядро-ядерных взаимодействий.
2. Предложен ряд дополнительных характеристик фрагментов-спектаторов в столкновениях ядер золота на коллайдере NICA, рассмотрение которых может усовершенствовать метод определения центральности событий.
3. С помощью модели ААМСС на примере ядра  $^{238}\text{U}$  показана возможность выделения событий с различной ориентацией сталкивающихся ядер по наблюдаемым характеристикам спектаторной материи.
4. В расчетах в модели ААМСС показана возможность определения параметров поверхностного нейтронного слоя ядра  $^{208}\text{Pb}$  в ультра-центральных столкновениях в экспериментах на ускорителе SPS и коллайдере LHC.
5. Посредством моделирования столкновений ядер  $^{16}\text{O}$  изучено влияние альфа-кластерной структуры  $^{16}\text{O}$  на состав спектаторной материи.
6. Для столкновений ядер  $^{16}\text{O}$  на LHC с учетом их альфа-кластерной структуры были выполнены расчеты влияния образовавшихся фрагментов с близким отношением заряда к массе на чистоту данных по  $^{16}\text{O}$ - $^{16}\text{O}$  взаимодействиям.

**Достоверность и обоснованность** полученных результатов подтверждается качественным согласием результатов моделирования с экспериментальными данными и обсуждением результатов диссертационной работы на нескольких международных конференциях и совещаниях коллабораций, а также тем, что результаты были опубликованы в рецензируемых научных изданиях. Выводы и положения диссертации полностью обоснованы. -

Полученные результаты имеют **безусловную теоретическую и практическую значимость**. Так, при разработке программы ААМСС был развит и реализован оригинальный метод MST-кластеризации, заслуживающий широкого применения. Собственно, ААМСС имеется в свободном доступе и несомненно будет использоваться при моделировании ядро-ядерных взаимодействий и не только на коллайдерах. Определение центральности событий ядро-ядерных взаимодействий является важнейшей составляющей в их исследовании. Проработанные автором диссертации усовершенствования методики определения центральности безусловно привлекут внимание экспериментаторов, также как и изложенные в диссертации новые методы исследований свойств сталкивающихся ядер.

**Личный вклад автора.** Все результаты, представленные в диссертации, получены лично автором либо при его непосредственном участии.

**Апробация результатов работы и публикации.** Основные результаты диссертации отражены в 13 научных публикациях, 10 из которых изданы в журналах рекомендованных ВАК, а 3 в материалах конференций. Результаты диссертации неоднократно докладывались на международных и российских конференциях.

**Замечания.** Существенных недостатков представленная диссертация не содержит. Тем не менее, по диссертации имеются замечания и некоторые пожелания:

1. Недостаточно внимания уделено акцентированию преимуществ разработанной авторами программы ААМСС, ориентированной на описание свойств только спектаторной ядерной материи, по сравнению с программами широкого применения типа UrQMD, DCM-SMM и т.п.
2. Изученные в диссертации свойства спектаторной материи важны, в частности, для оптимизации детекторов нулевого угла (ZDC), но для этого требуется также информация об угловых и импульсных распределениях фрагментов-спектаторов. Эта информация не нашла освещения в диссертации.
3. В диссертации слово «ультрацентральные» столкновения используется 43 раза, но ни разу не было определено. В каждом конкретном случае используются разные ограничения либо на прицельный параметр, либо на интервал центральности. Интуитивно, это слово связывается с пределом центральности стремящейся к нулю. Но в диссертации обсуждается серповидная форма распределения спектаторов в «ультрацентральных» столкновениях, которая в этом пределе исчезает вместе с сечением.
4. Традиционно для обозначения столкновений ядра А с ядром В используется сокращение А+В, автор решил отказаться от этого обозначения и везде использовал А-В. Зачем, остается непонятным.

Высказанные замечания не являются принципиальными и ни в какой мере не умаляют высокого уровня работы и полученных результатов.

**Заключение.** Диссертация А.О.Светличного является законченным научным исследованием. Полученные автором результаты имеют существенное значение для физики тяжелых ионов и физики высоких энергий. Материалы диссертации полностью изложены в опубликованных работах автора. **Автореферат полностью и правильно отражает содержание диссертации.**

Диссертация А.О.Светличного на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук удовлетворяет всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор **заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук** по специальности 1.3.15 – Физика атомного ядра и элементарных частиц, физика высоких энергий.

Результаты диссертационной работы были доложены и обсуждены на семинаре «Теоретическая физика и физика экстремального состояния вещества» Курчатовского комплекса теоретической и экспериментальной физики (ККТЭФ) НИЦ «Курчатовский институт» 23 ноября 2023 года.

Отзыв на диссертацию обсужден и одобрен на заседании Научно-технического совета Курчатовского комплекса теоретической и экспериментальной физики

НИЦ «Курчатовский институт».

Присутствовало на заседании 16 чел., из них докторов наук 6 чел., кандидатов наук 7 чел. Результаты голосования: «за» 16 чел., «против» 0 чел., «воздержалось» 0 чел., протокол № 6 от «19» декабря 2023 г.

Отзыв подготовил д.ф.-м.н.,  
начальник лаборатории  
адронной физики ККТЭФ

В.В.Куликов

И.о. руководителя ККТЭФ,  
Председатель НТС ККТЭФ

В.Ю. Егорычев

Ученый секретарь ККТЭФ,  
учёный секретарь НТС ККТЭФ

В.В. Васильев

Подписи В.В. Куликова, В.Ю. Егорычева и В.В. Васильева подтверждаю

Главный ученый секретарь  
НИЦ «Курчатовский институт»

К.Е. Борисов

НИЦ «Курчатовский институт»  
123182, Россия, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1  
Телефон: +7 (499) 196-95-39  
e-mail: [nrcki@nrcki.ru](mailto:nrcki@nrcki.ru)

## Сведения о ведущей организации

по защите диссертации Светличного Александра Олеговича «Свойства спектаторной материи в столкновениях релятивистских ядер» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.15. — Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий

Полное наименование организации в соответствии с уставом	Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»
Ведомственная принадлежность	Правительство Российской Федерации
Сокращенное наименование организации в соответствии с уставом	НИЦ «Курчатовский институт»
Подразделение	Курчатовский комплекс теоретической и экспериментальной физики (ККТЭФ)
Почтовый индекс, адрес организации	123182, Москва, пл. Академика Курчатова, 1
Веб-сайт	<a href="http://www.nrcki.ru">http://www.nrcki.ru</a>
Телефон	+7 (499) 196-95-39; факс 7 (499) 196-17-04
Адрес электронной почты	<a href="mailto:nrcki@nrcki.ru">nrcki@nrcki.ru</a>

Список основных публикаций работников ведущей организации по тематике, близкой или смежной тематике защищаемой диссертации, в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. S. Afanasiev..., P. Alekseev et al. Production of  $\pi^+$  and  $K^+$  mesons in argon-nucleus interactions at 3.2 A GeV, JHEP 07 (2023) 174.
2. B. Aboona..., I. Alekseev et al. Beam energy dependence of the linear and mode-coupled flow harmonics in Au+Au collisions. Phys.Lett.B 839 (2023) 137755
3. M.Chernomova, K.Mikhaylov et al. Particle Multiplicity Fluctuations and Spatiotemporal Properties of Particle-Emitting Source of Strongly Interacting Matter for NICA and RHIC Energies. Symmetry 14 (2022) 7, 1316.
4. M.Abdallah..., I.Alekseev et al. Probing the Gluonic Structure of the Deuteron with  $J/\psi$  Photoproduction in d+Au Ultraperipheral Collisions. Phys.Rev.Lett. 128 (2022) 12, 122303.
5. V.Abgaryan..., S.Bulychev et al. Status and initial physics performance studies of the MPD experiment at NICA. Eur.Phys.J.A 58 (2022) 7, 140.
6. L. Malinina..., K.Mikhaylov et al. Study of Strongly Interacting Matter Properties at the Energies of the NICA Collider Using the Methods of Femtoscopy. Phys.Part.Nucl. 52 (2021) 4, 624-630.

7. B.M.Abramov et al. Cumulative  $\pi$ -Mesons in  $^{12}\text{C}+^9\text{Be}$ -Interactions at 3.2 GeV/Nucleon. *Phys.At.Nucl.* 84 (2021) 4, 467-474.
8. V.I.Zakharov et al. Polarization of Elementary Particles in Heavy-Ion Collisions as a Manifestation of Quantum Field Theory Anomalies. *Phys.Part.Nucl.* 52 (2021) 4, 522-528
9. B.M. Abramov et al. Nuclear Fragments in  $^{12}\text{C} + ^9\text{Be}$  Interactions at an Energy of 2 GeV per Nucleon. *Phys.Atom.Nucl.* 82 (2020) 6, 623-629.
10. J.Adam..., I. Alekseev et al. Beam-energy dependence of the directed flow of deuterons in Au+Au collisions. *Phys.Rev.C* 102 (2020) 4, 044906.
11. B.M. Abramov et al. Ion production in the  $^{12}\text{C} + ^9\text{Be}$  interactions at GeV energies. *J.Phys.Conf.Ser.* 1390 (2019) 1, 012004.
12. A.Stavinskiy. Dense cold matter. *EPJ Web Conf.* 204 (2019) 01023.
13. N.Zhigareva et al.  $\Sigma$  hyperons in nuclear collisions at energy of few GeV/c. *EPJ Web Conf.* 204 (2019) 03016.
14. J.Adam..., I.Alekseev et al. Collision-energy dependence of second-order off-diagonal and diagonal cumulants of net-charge, net-proton, and net-kaon multiplicity distributions in Au + Au collisions. *Phys.Rev.C* 100 (2019) 1, 014902.

И.О. руководителя ККТЭФ

В.Ю. Егорычев

Подпись В.Ю. Егорычева подтверждаю

Главный учёный секретарь  
НИЦ «Курчатовский институт»

К.Е. Борисов