

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора физико-математических наук

Снигирева Александра Михайловича на диссертацию

Светличного Александра Олеговича на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук на тему: «Свойства спектаторной материи в столкновениях релятивистских ядер» по специальности 1.3.15 – Физика атомного ядра и элементарных частиц, физика высоких энергий.

Диссертационная работа А.О. Светличного была выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН). В данной работе была построена модель, которая описывает формирование ядер-спектаторов в столкновениях релятивистских ядер. Эта модель была сравнена с результатами экспериментов и использована для предсказания будущих исследований. Ранее фрагментация ядер-снарядов была изучена при различных энергиях от сотен МэВ до десятков ГэВ на нуклон, но при более высоких энергиях спектаторы вылетают под малыми углами и трудно отделяются от оси пучка, что создает проблемы при их регистрации. Следовательно, спектаторные фрагменты, образующиеся в столкновениях ядер с энергиями, соответствующими ускорителям NICA, RHIC или LHC, остаются малоизученными. В настоящее время передние калориметры экспериментов на подобных ускорителях используются для регистрации вылетающих нейтронов и частично спектаторных фрагментов, что позволяет определить центральность столкновений и плоскость реакции. Сказанное выше подтверждает, что исследования спектаторной материи в столкновениях ядер при высоких энергиях, представленные в данной диссертацией, имеют большое значение и актуальность.

Диссертант провел исследования, посвященные теоретическому анализу спектаторных нуклонов и ядерных фрагментов, образующихся при столкновениях релятивистских ядер. Для этой цели в настоящей диссертации

была разработана компьютерная модель Abrasion-Ablation Monte Carlo for Colliders (ААМСС). Значимость данной работы заключается в следующих теоретических и практических результатах:

1. Создана модель, которая позволяет событийно моделировать образование спектаторной материя в столкновениях ультррелятивистских ядер. Эта модель имеет открытый исходный код и может быть использована в различных экспериментальных коллаборациях для изучения отклика передних калориметров и эффективности регистрации различных спектаторных фрагментов. Это позволит улучшить экспериментальные методы определения центральности столкновения и плоскости реакции с помощью спектаторных фрагментов.
2. Проведено исследование состава спектаторной материи в столкновениях релятивистских ядер $^{197}\text{Au}-^{197}\text{Au}$ на коллайдере NICA с помощью моделирования столкновений различных центральностей в модели ААМСС. Диссертантом были выявлены основные характеристики состава спектаторной материи, которые наиболее чувствительны к центральности столкновения: выходы различных фрагментов, в частности ядер ^2H и ^4He , количество заряженных фрагментов на спектаторный нуклон и асимметрия количества спектаторных нейтронов. Были предложены способы улучшения методов определения центральности столкновения с помощью передних калориметров.
3. Используя модель ААМСС, было исследовано влияние поверхностного нейтронного слоя в ядрах ^{208}Pb на выходы спектаторных нуклонов в наиболее центральных ($0 - \sim 3.5$ фм) столкновениях $^{208}\text{Pb}-^{208}\text{Pb}$ при энергиях SPS и LHC. Предложен новый метод определения параметров нейтронного слоя, основанный на измерениях сечений образования заданного количества спектаторных нейтронов при фиксированном количестве спектаторных протонов.

Диссертация А.О. Светличного состоит из Введения, четырёх Глав, Заключение, Списка публикаций диссертанта из 13 наименований и Списка литературы из 117 наименований. Диссертация изложена на 118 страницах и содержит 37 рисунков и 7 таблиц.

Во Введении представлена актуальность диссертационной работы, сформулированы ее цели и задачи, приведена научная новизна исследований и показаны научная и практическая значимость полученных результатов. Представлены выносимые на защиту основные результаты, сведения об апробации работы, публикациях по теме диссертации, личном вкладе автора, структуре и объеме диссертационной работы.

В Главе 1 диссертации автор описывает разработанную им модель образования спектаторной материи в столкновениях релятивистских ядер ААМСС, которая основана на предположении о двухстадийном механизме взаимодействия ядер. На первом этапе используется модель Глаубера в реализации Glauber Monte Carlo для моделирования разделения нуклонов сталкивающихся ядер на нуклоны-спектаторы и партисипанты. Нуклоны-спектаторы, которые по определению не взаимодействуют в процессе столкновения, образуют 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 возбуждённого префрагмента используется модель MST-кластеризации, а для моделирования вторичных распадов - испарительная модель Вайскопфа-Ивинга, модель статистической мультифрагментации и Fermi Break Up из библиотеки Geant4. Результаты модели ААМСС сравниваются с экспериментальными данными.

Глава 2 посвящена изучению ядерной фрагментации в столкновениях ядер различных энергий и центральностей. В работе проводится сравнение среднего максимального заряда спектаторного фрагмента, средней множественности фрагментов промежуточной массы ($3 \leq Z \leq 30$), 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 ядро-ядро и исследуется состав спектаторных фрагментов в зависимости от числа нуклон-нуклонных столкновений. В работе также анализируются различные характеристики спектаторной материи, которые могут быть зарегистрированы в эксперименте MPD на NICA. С использованием теоремы Байеса вычисляются апостериорные вероятности принадлежности события к определенным классам центральности, а также отмечаются характеристики спектаторной материи, специфические для каждого класса центральности.

В Главе 3 исследуется образование спектаторов в релятивистских столкновениях ядер в наиболее центральных столкновениях. Отмечается, что спектаторная материя принимает форму тонкого полумесяца и может терять связность в таких столкновениях. Проводится моделирование спектаторных нуклонов в наиболее центральных столкновениях ядер ^{208}Pb с учетом наличия поверхностного нейтронного слоя в этих ядрах. Полученные результаты показывают, что сечения эмиссии заданного числа спектаторных нейтронов, сопровождаемых определенным числом спектаторных протонов, вычисленные с помощью модели ААМСС, зависят от параметров нейтронного слоя. Предложен метод оценки параметров нейтронного слоя в экспериментах по ядро-ядерным столкновениям путем сравнения вычисленных сечений с измеренными. Также исследуются ультрацентральные столкновения деформированных ядер ^{238}U , где показывается, что распределения нейтронов по множественности и асимметрия вперед-назад множественности спектаторных нейтронов изменяются в зависимости от начальной взаимной ориентации сталкивающихся ядер.

Глава 4 посвящена изучению влияния альфа-кластеризации внутриядерных нуклонов в ^{16}O на спектаторные фрагменты от столкновений релятивистских ядер ^{16}O . Изучается распределение по множественности спектаторных альфа-частиц и показывается, что оно чувствительно к наличию альфа-кластеров в ^{16}O . Путем сравнения с экспериментальными данными по

фрагментации ^{16}O вклад кластеризованных состояний оценен на уровне 30%. Для столкновений $^{16}\text{O}-^{16}\text{O}$ на LHC с учетом кластеризации были рассчитаны распределения по множественности спектаторных нейтронов и дейтронов, фрагментов с определенным отношением заряда к массе, и была оценена доля столкновений вторичных спектаторных фрагментов с ядрами пучка на LHC, которая может привести к нежелательным примесям $^4\text{He}, \dots, ^{14}\text{N}-^{16}\text{O}$ в данных о столкновениях $^{16}\text{O}-^{16}\text{O}$ на уровне 1-10%.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы и обсуждаются перспективы их использования.

Достоверность результатов, полученных диссертантом, подтверждается качественным согласием результатов моделирования с экспериментальными данными и многократным обсуждением результатов диссертационной работы на нескольких международных конференциях и совещаниях коллабораций. Новизна результатов диссертации следует из десяти публикаций статей автора в физических журналах, индексируемых Scopus и Web of Science, где как правило уровень рецензирования довольно высок. Обоснованность полученных результатов обусловлена тем, что при выполнении программы исследований применялись модель Глаубера и статистические модели девозбуждения ядер в существующих программных реализациях из библиотеки Geant4, которая неоднократно проверялась и тестировалась на экспериментальных данных. Также, стоит отметить что остальные части модели достаточно подробно описаны и обоснованы в тексте диссертации. Необходимо отметить, что личный вклад А.О. Светличного в исследованиях, отраженных в диссертации, был определяющим.

Диссертация хорошо структурирована и написана понятным языком, содержит необходимые ссылки на работы других авторов. Вместе с тем к содержанию работы можно сделать следующие замечания:

1. Модель ААМСС фокусируется на описании образования спектаторной материи и не позволяет производить полноценное моделирование работы детектора. Однако модель Глаубера успешно применяется для

вычисления начальных условий для моделирования образования частиц в зоне партисипантов, поэтому модель ААМСС может быть дополнена моделью образования частиц в зоне партисипантов.

2. Не проведено сравнений с угловыми распределениями или другими распределениями по продольным и поперечным импульсам спектаторных фрагментов, с распределениями по (псевдо)быстроте. Такие сравнения позволили бы оценить адекватность модели для её будущего применения в оценках аксептанса и эффективности передних калориметров.
3. В Главе 2 предлагается исследовать состав спектаторных фрагментов в зависимости от количества нуклон-нуклонных столкновений, однако известно, что модель Глаубера учитывает только первичные столкновения нуклонов, принадлежащих разным ядрам и полностью игнорирует столкновения нуклонов отдачи в тех же ядрах, в которых эти нуклоны содержались до столкновения. Ввиду этого исключительно полезным было бы сравнение результатов ААМСС не только с экспериментом, но и с транспортными моделями, в частности, с моделью UrQMD, для оценки влияния на результаты моделирования указанных упрощений, принятых в модели Глаубера.

В основном эти замечания и недостатки относятся к пожеланиям по дальнейшему развитию модели ААМСС и не меняют общей высокой оценки диссертации, которая выполнена на актуальную тему и является обстоятельным и детальным исследованием, законченным научным трудом.

Диссертация «Свойства спектаторной материи в столкновениях ультрарелятивистских ядер» отвечает всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утверждённого постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор Светличный Александр Олегович, безусловно заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности

1.3.15 – Физика атомного ядра и элементарных частиц, физика высоких энергий.

Официальный оппонент, доктор физико-математических наук, 01.04.16 — физика ядра и элементарных частиц, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В.Скобельцына, отдел экспериментальной физики высоких энергий, лаборатория сильных взаимодействий, ведущий научный сотрудник

_____ А. М. Снигирев

12.12.2023

119991, Ленинские горы 1, г. Москва, НИИЯФ МГУ, e-mail:

snigirev@lav01.sinp.msu.ru

Тел.: 8 495 939 12 57

Подпись Снигирева Александра Михайловича удостоверяю. Ученый секретарь НИИЯФ МГУ, кандидат физико-математических наук

_____ Е.А. Сигаева

12.12.2023

119991, Ленинские горы 1, г. Москва, НИИЯФ МГУ, e-mail:

belka@srd.sinp.msu.ru, Тел.: +7 495 939 58 68; +7 916 115 58 11

Список основных публикаций оппонента по теме диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. A.S. Chernyshov, ..., A.M. Snigirev et al // Chinese Phys. C, 2023 – №47 – P.084107
2. L.V. Bravina, ..., A.M. Snigirev et al // Phys. Scr., 2022 – №97 – P. 064007
3. G. Kh. Eyyubova, ..., A.M. Snigirev et al // J. Phys. G: Nucl. Part. Phys., 2021 – №48 – P.095101
4. J. Štorek, ..., A. Snigirev et al. // Proceedings of Science, 2021 – № EPS-HEP2021 – P.398
5. L.V. Bravina, ..., A. M. Snigirev et al. // Phys. Rev. C, 2021 – №103 – P.034905
6. S. Petrushanko, ..., A. Snigirev et al // Proceedings of Science, 2019 – № ICHEP2018 – P.340
7. D. d'Enterria, A.M. Snigirev. // European Physical Journal C, 2018 – №78 – P. 359