

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора физико-математических наук Ларионова Алексея Борисовича на диссертацию **Светличного Александра Олеговича** на тему: «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.

Диссертационная работа А.О. Светличного посвящена разработке и тестированию новой модели возбуждения и фрагментации спектаторных ядер-остатков в высокоэнергетических ядро-ядерных столкновениях.

Актуальность темы. Исследования свойств ядерной материи в широком диапазоне барионной плотности, температуры, изотопической асимметрии и странности традиционно являются основной задачей физики ядро-ядерных столкновений высоких энергий. Интерес к этой теме связан, в основном, с возможностью проявления фазовых переходов в ядерном веществе. Здесь одной из главных трудностей является определение центральности (т. е. прицельного параметра) ядро-ядерного столкновения, т. к. обычно теоретические предсказания относятся к определенному диапазону центральности. Другой трудностью является определение плоскости реакции, которая необходима для измерения коллективных потоков ядерного вещества. Хорошо известно, что при высоких энергиях для определения центральности и плоскости реакции могут быть использованы так называемые калориметры «нулевого» угла (ZDC), которые детектируют продукты распада спектаторных ядер (в основном нейтроны) под предельно малыми углами к импульсу пучка. Поэтому разработка моделей фрагментации спектаторных ядер-остатков является актуальной проблемой физики ядро-ядерных столкновений. Кроме того, фрагментация спектаторной материи может быть проявлением фазового перехода жидкость-газ в ядерной материи при низкой плотности и высокой изотопической асимметрии.

Научная новизна. Создана новая гибридная модель Abrasion-Ablation Monte Carlo for Colliders (ААМСС), позволяющая генерировать события ядро-ядерных столкновений с последующим распадом спектаторной ядерной материи на ядра-фрагменты и нуклоны. Модель ААМСС объединяет в себе модель Глаубера для определения числа нуклонов-партисипантов и нуклонов-

спектаторов, а также набор известных статистических моделей (модель Вайскопфа-Ивинга, статистическую модель мультифрагментации, модель фермиевского развала) для описания фрагментации ядер-спектаторов.

Новым физическим элементом является введение предравновесной фрагментации с использованием механизма «минимального остовного дерева» (MST) для ядро-ядерных столкновений с малым прицельным параметром. Безусловно новым является детальный анализ влияния возможных сценариев возбуждения ядер-спектаторов, проявлений нейтронной «кожи» на поверхности ядра, кластерной структуры ядра, а также ядерной деформации на фрагментацию спектаторов.

Работа соискателя с соавторами [A4] по предравновесной кластеризации процитирована группами из Германии (GSI) и Китая; [A6] по нейтронной коже - группой из Китая; [A10] по кластеризации в ^{16}O - группами авторов из Индии (2 раза). Это в целом свидетельствует о новизне темы диссертации и об интересе к ней.

Научная и практическая ценность. Разработанная модель ААМСС и компьютерная программа могут быть использованы для определения центральности и плоскости реакции событий ядро-ядерных соударений исходя из множественностей нейтронов и легких ядер-фрагментов от распадов спектаторных остатков. Модель может быть полезна для экспериментов на RHIC, LHC, NICA MPD, FAIR. Предложенные методы анализа проявлений нейтронной кожи, кластерной структуры легких ядер и ядерной деформации в ядро-ядерных столкновениях могут дать дополнительную информацию о ядерной структуре.

Результаты диссертации представляют интерес для групп экспериментаторов и теоретиков в НИИЯФ МГУ, ИЯИ РАН, Курчатовский Институт (Москва), ИТЭФ, МИФИ, МФТИ, ОИЯИ, ПИЯФ и других.

Диссертация состоит из четырех глав. В первой главе дается описание модели ААМСС. Вначале описывается модель Глаубера для описания начальной стадии ядро-ядерного (АА) столкновения. Кратко описываются общие условия применимости глауберовского подхода. Затем автор переходит к описанию конкретной используемой им реализации модели Глаубера: Glauber Monte Carlo (GlauberMC). Названы основные шаги работы модели. Достаточно детально описывается первый шаг: розыгрыш координат нуклонов в ядрах согласно заданным распределениям плотности. Второй шаг, т. е. розыгрыш взаимодействия нуклонов в процессе взаимного прохождения ядер друг сквозь друга, соискатель описывает иллюстративно, не приводя детальную математическую формулировку. Далее в разд. (1.2) описаны два способа определения энергии возбуждения спектаторных префрагментов в зависимости от относительной массы префрагмента: формула Эриксона (1.4) и формула

ALADIN (1.7). Описана гибридная параметризация, содержащая переход от формулы Эриксона к формуле ALADIN при удалении из ядра $\sim 10\text{-}20\%$ нуклонов, что представляется вполне обоснованным. Раздел (1.3) содержит описание моделей девозбуждения ядер-спектаторов. Вначале в спектаторе выделяются связанные кластеры на основе алгоритма MST с учетом предравновесного расширения. Энергия возбуждения каждого кластера пропорциональна числу нуклонов в нем. Далее к каждому из кластеров, которые предполагаются находящимися в тепловом равновесии, применяется модель статистического распада. В разд. 1.4 приведены результаты численного анализа характеристик спектаторной материи. Показана чувствительность выходов спектаторных нейтронов в центральных столкновениях $^{208}\text{Pb}+^{208}\text{Pb}$ при энергиях SPS и LHC к используемой параметризации энергии возбуждения спектатора. Проведен расчет реакции фрагментации ядер ^{197}Au при энергии 10.7A ГэВ на ядрах фотоэмульсии в сравнении с экспериментом EMU-01/12. Показано, что модель хорошо описывает имеющиеся экспериментальные данные по различным зарядовым характеристикам продуктов фрагментации золота при использовании параметризации ALADIN. Исключение составляет множественность ядер гелия в центральных и полуцентральных столкновениях, которая занижается моделью на 20-30%. Этот факт не удивителен, т. к. тот же вывод делается и в статье коллаборации EMU-01/12 и связывается там с неучетом предравновесной эмиссии α -частиц, включая жесткое выбивание. А.О. Светличным показано, что учет предравновесной MST-кластеризации улучшает согласие с данными ALICE по множественностям спектаторных нейтронов и протонов в центральных и полуцентральных столкновениях $^{208}\text{Pb}+^{208}\text{Pb}$ при энергии $\sqrt{s_{\text{NN}}}=5.02$ ТэВ.

В главе 2 исследуется фрагментация спектаторной материи в широком диапазоне энергий, от энергий NICA до энергий LHC, и прицельных параметров. В разд. 2.1, исходя из сопоставления рассчитанных зарядовых характеристик фрагментации ($\langle Z_{\text{max}} \rangle$, $\langle N_{Z=1} \rangle$, $\langle N_{Z=2} \rangle$ как функций Z_{b3} и $\langle M_{\text{IMF}} \rangle$ как функции Z_{bound}) для столкновений Pb+Pb при энергиях SPS и LHC делается вывод о независимости характеристик спектаторов от энергии столкновения. В разд. 2.2 соискатель рассматривает энергии LHC. Рассчитаны эволюции распределений различных характеристик фрагментации (суммарный связанный во фрагментах заряд, множественность фрагментов промежуточных масс и т.д.) спектаторов при изменении числа NN столкновений. Обсуждается заманчивая возможность соответствующих измерений в перспективе. Далее исследуются выходы нейтронов и протонов и их отношение, что возможно измерить уже в настоящее время с помощью детекторов нулевого угла в эксперименте ALICE. А.О. Светличным обнаружена значительная чувствительность отношений выходов п/р как функций числа NN столкновений к выбору параметризации энергии возбуждения, что дает лучшее понимание неопределенностей в предсказаниях модели. Показано, что параметризация Эриксона дает лучшее

описание отношений выходов n/p , чем параметризация ALADIN при энергиях SPS. В разд. 2.3 автор исследует возможность определения центральности столкновений Au+Au при энергиях NICA ($\sqrt{s_{NN}}=11$ ГэВ) исходя из сигналов распада спектаторов. На основе теоремы Байеса соискателем рассчитаны апостериорные вероятности различных классов центральности как функции множественности дейтронов, α -частиц, числа заряженных фрагментов на нуклон спектатора ($N_{ch.}/A_{pf.}$), а также асимметрии «вперед-назад» между выходами спектаторных нейтронов и нуклонов. Обнаружена сильная корреляция между $N_{ch.}/A_{pf.}$ и классами центральности, что представляется очень полезным дополнением к существующим способам определения центральности.

В главе 3 исследовано влияние нейтронного избытка на поверхности ядра в виде «нейтронной кожи» и «нейтронного гало», а также ядерной деформации, на сечения образования определенных количеств нейтронов и протонов в ультрацентральных АА столкновениях. В разд. 3.1 вначале описываются 6 представительных наборов параметров плотности нейтронов и протонов в ядре ^{208}Pb . Эти наборы используются в расчетах для выяснения эффекта толщины нейтронной кожи. Показано, что среднее число спектаторных нейтронов увеличивается с толщиной нейтронной кожи, как и следовало ожидать. Однако для всех наборов расчет завышает измеренные средние числа нейтронов в ультрацентральных ($b = 2$ фм) столкновениях $^{208}\text{Pb} + ^{208}\text{Pb}$ при энергиях SPS на 30%, что автор связывает с флуктуациями прицельного параметра. Интересным является наблюдение А.О. Светличного, что эффект нейтронной кожи на сечения выхода различного числа нейтронов наиболее заметен при условии отсутствия протонов. Это наблюдение мотивирует автора к дальнейшему весьма детальному исследованию влияния толщины нейтронной кожи на сечения, которые дополнены исследованием влияния других параметров на результаты. Наиболее сильный эффект нейтронной кожи получен при малых числах нейтронов $N_n=1-2$ и числах протонов $N_p < 5$. В разд. 3.2 исследуется влияние взаимной ориентации ^{238}U на характеристики спектаторной материи. Это исследование важно для ввиду влияния ориентации на эллиптический поток и на киральный магнитный эффект. Соискателем показано, что одновременное измерение множественности нейтронов и асимметрии их вылета вперед-назад позволяет надежно выделить ориентации сталкивающихся ядер *tip-body* и *side-side*. Более того, А.О. Светличный обнаружил значительную чувствительность средней множественности нейтронов в событиях с ориентацией *tip-body* к параметру квадрупольной деформации ядра, что имеет значение для исследований ядерной структуры.

В главе 4 исследуется влияние внутриядерной α -кластеризации на спектаторные характеристики в столкновениях $^{16}\text{O} + ^{16}\text{O}$. Вначале соискатель делает небольшой, но интересный, обзор публикаций на тему проявления

кластерной структуры ядер в АА столкновениях при высоких энергиях. В разд. 4.1 описаны изменения во входных данных модели ААМСС, необходимые для учета кластерной структуры. В разд. 4.2 рассчитаны зарядовые распределения спектаторных фрагментов и распределения множественностей α -частиц (для событий, где есть α -частицы) в столкновениях $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ при энергии пучка 3.7А ГэВ в сравнении с экспериментальными данными синхрофазотрона ОИЯИ. Систематически исследована зависимость результатов от примеси α -кластеров в начальных ядрах, формы распределения плотности в α -кластере, и максимальной энергии возбуждения префрагмента. Достигнуто удовлетворительное описание данных по зарядовым распределениям и хорошее - по распределениям множественности α -частиц. Более пристального рассмотрения в будущем требует переоценка выходов α -частиц и недооценка выходов изотопов углерода в расчетах. В разд. 4.3 даются предсказания модели ААМСС для распределения множественностей спектаторных нейтронов и дейтронов, и вероятностей образования различных спектаторных ядер-фрагментов для столкновений $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ при энергиях ЛНС ($\sqrt{s_{\text{NN}}}=6.37$ ТэВ). В расчеты, как опция, включен также эффект короткодействующих NN корреляций путем введения минимального расстояния (~ 0.8) фм между центрами нуклонов. Введение короткодействующих NN корреляций довольно сильно подавляет события с большим числом нейтронов, что является интересным новым результатом. Соискатель показал, что фрагментация спектаторов ведет к выходу ядер с отношением заряда к массе, близким к первоначальному в ядре ^{16}O (т. е. ^2H , ^4He и т.д.), которые «загрязняют» пучки ядер ^{16}O на уровне 1-10%. Тем самым А.О. Светличный получил существенную информацию, которая может повлиять на процесс анализа экспериментальных данных на ЛНС.

Обоснованность и достоверность. Главные компоненты модели ААМСС, т. е. модель GlauberMC и статистические модели девозбуждения ядер, хорошо известны, и автор использовал существующие стандартные программные реализации этих моделей, неоднократно выверенные сравнением с экспериментом и находящиеся в открытом доступе. Для описания предравновесной фрагментации автор разработал программную реализацию MST алгоритма, физическая природа которого ясна и прозрачна. Остальные ингредиенты модели ААМСС, такие как вычисление энергии возбуждения и распределений плотности ядер, достаточно подробно описаны в диссертации. Модельные расчеты сопоставлены с многочисленными экспериментальными данными по фрагментации спектаторов в широком диапазоне энергий ($\sqrt{s_{\text{NN}}}$ от нескольких ГэВ — ОИЯИ до нескольких ТэВ - ЛНС). Таким образом, полученные предсказания модели ААМСС обоснованны и достоверны. Основные результаты диссертации опубликованы в журналах списка ВАК и

доложены на международных и всероссийских конференциях. Автореферат соответствует содержанию диссертации.

По содержанию работы имеются следующие замечания и опечатки:

1) Уравнение (1.3) на стр. 21, очевидно, содержит гамма распределение, для плотности которого использовано нестандартное обозначение, но это в тексте никак не комментируется.

2) После формулы (1.4) на стр. 22: размерность параметра g_0 должна быть МэВ^{-1} .

3) К стр. 23. Вполне разумно, что, когда число сорванных нуклонов становится сравнимым с массой начального ядра, формула Эриксона перестает работать, и надо использовать эмпирическую параметризацию ALADIN. В будущем было бы интересно исследовать, как такой переход возникает в рамках динамических моделей с самосогласованным средним полем типа модели БУУ, где имеется вполне определенное основное состояние ядра, см. работу T. Gaitanos et al., Phys. Rev. C 81, 054316 (2010) [arXiv:1003.4863].

4) К разд. 1.3, стр. 23-30. Описанная последовательность действий, т. е. выделение (квази)термализованных систем и, затем, применение к ним статистических моделей, встречается в литературе довольно часто, например, в гибридных подходах типа «молекулярная динамика + статистический развал» (T.C. Sangster et al., Phys. Rev. C 46, 1404 (1992)). Однако никогда ранее статистический развал не применялся к настолько отклоненным от сферической формы ядерным системам, как спектаторный остаток в центральном АА столкновении (Рис. 1.2). Такие системы, скорее, испытают прямой динамический развал ещё до установления в них теплового равновесия. Поэтому, признавая смелость и изобретательность автора в решении очень сложного вопроса об определении параметров термализованных ядерных систем, в будущем хотелось бы все же лучше понять, насколько близки спектаторные остатки в центральных столкновениях к тепловому равновесию.

5) На Рис. 1.6 на стр. 34 показаны только результаты с параметризацией ALADIN. Непонятно, почему не показаны результаты с параметризацией Эриксона, тем более, что соответствующий рисунок уже опубликован в работе [A5].

6) Стр. 37 внизу опечатка «...и гелия $\langle N_{\{Z=2\}} \rangle$ ».

7) Стр. 42: опечатка в подписи к Рис. 2.2 « $Z_{\{b7\}}$ по фрагментам с $Z \geq 7$ ».

8) В разд. 3.1.2 на стр. 60 в расчете средних множественностей спектаторных нейтронов и протонов используется MST-кластеризация. В следующем разд. 3.1.3 MST не используется. Это несколько размывает физическую картину. Было бы лучше упорядочить результаты в порядке усложнения модели.

9) В разд. 3.1.7 на стр. 72-79 следовало бы также добавить исследование неопределенности к выбору параметризации энергии возбуждения.

10) В добавление к Рис. 3.16 на стр. 85 и следуя логике разд. 2.3 было бы полезно рассчитать распределение по типу событий (т. е. взаимной ориентации ядер) для фиксированных значений N_p и α_p .

11) На стр. 91 написано, что «Принцип запрета Паули учитывается путем исключения конечного объема нуклонов...». Принцип Паули для нуклонов действует в фазовом пространстве координат и импульсов. Сближению нуклонов на малые расстояния препятствует отталкивательный NN потенциал.

Указанные замечания не меняют общей высокой оценки диссертации. В диссертационной работе А.О. Светличного построена и сопоставлена с экспериментом новая эффективная модель периферических ядро-ядерных столкновений, имеющая существенное значение для планирования и интерпретации экспериментов. Это ясно показывает, что автор обладает значительными познаниями и квалификацией в области ядерной физики и компьютерного моделирования. Диссертация удовлетворяет всем требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года №842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а автор работы – **Светличный Александр Олегович**, несомненно заслуживает присвоения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.15 – «Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий».

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук,

01.04.16 – физика атомного ядра и

элементарных частиц, Международная

межправительственная организация

Объединенный институт ядерных

исследований, Лаборатории

теоретической физики им. Н.Н.

Боголюбова, ведущий научный сотрудник

А.Б. Ларионов

21.11.2023

141980 Дубна, Московская обл., Россия

e-mail: larionov@theor.jinr.ru

Тел.: 8 (496) 216-23-68

Подпись Ларионова А.Б. удостоверяю,

учёный секретарь ЛТФ им. Н.Н. Боголюбова ОИЯИ

А.В. Андреев

21.11.2023

141980, г. Дубна Московской обл.

e-mail: andreev@theor.jinr.ru

Тел: 8 (496) 216-50-88

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

1. Larionov, A.B. // Physics, 2022 – №4 – P.294.
2. Larionov, A.B. and L. von Smekal // Phys. Rev. C, 2022 – №105 – P.034914
3. Abramov, V.V., ..., Larionov, A.B. et al. // Phys. Part. Nuclei, 2021 – №52 – P.1044
4. Larionov A.B. et al. // Phys. Rev. C, 2020 – №102 – P.064913
5. Larionov A.B. and Strikman M. // Particles, 2020 – №3 – P.24
6. Larionov A.B. and M. Strikman // Phys. Rev. C, 2020 – №101 – P.014617
7. Lenske H. and Larionov A.B. // EPJ Web of Conferences, 2018 – №181 – P.10