

АННОТАЦИЯ

диссертации на соискание степени доктора философии (Ph.D)
по специальности 6D060500 – «Ядерная физика»

Федосимовой Анастасии Игоревны

на тему «Флуктуации в распределениях вторичных частиц,
образованных во взаимодействиях релятивистских ядер»

Диссертационная работа посвящена исследованию флуктуаций в распределениях вторичных частиц, образованных во взаимодействиях релятивистских ядер широкого спектра энергий. Рассмотрены флуктуации, как на уровне элементарного акта, так и в каскадных процессах. Предложена методика, позволяющая существенно подавить влияние огромных флуктуаций множественности вторичных частиц при развитии каскадного процесса на точность определения энергии первичных космических частиц на основе прямых измерений при первичных энергиях выше 10^{12} эВ. Предложена классификация корреляций в псевдобыстротных распределениях вторичных частиц, связывающая флуктуации ливневых частиц, числа фрагментов налетающего ядра и ядра мишени с флуктуациями начальных параметров взаимодействия. Представлен анализ аномальных флуктуаций в распределениях вторичных частиц, обнаруженных в событиях полного разрушения налетающего ядра.

Актуальность темы

Точное знание энергетических спектров и элементного состава первичных космических лучей позволяет понять особенности формирования космических лучей в астрофизических источниках, а также детали процессов распространения космических лучей в Галактике. Различные космологические модели предсказывают разные спектры элементов и разный элементный состав космических лучей. В связи с этим, разработка методов, позволяющих увеличить точность при измерениях энергии высокоэнергичных космических ядер в широком энергетическом диапазоне, является актуальной задачей.

Для определения параметров первичной космической частицы необходимо решение сложной обратной задачи, так как до уровня наблюдения происходит достаточно большое количество взаимодействий. Наиболее корректный способ решения такой задачи – моделирование каскада. При этом используются характеристики элементарного акта (сечение взаимодействия, неупругость, множественность процесса и др.) из данных, полученных на ускорителях. Сравнение измерений характеристик каскада с результатами Монте-Карло моделирования позволяет реконструировать энергию и оценить массу первичной частицы.

Измерение космических лучей с энергиями $E > 10^{14}$ эВ происходит в основном на наземных станциях с помощью анализа широких атмосферных

ливней. Эти косвенные измерения основываются на сопоставлении результатов измерений характеристик вторичных частиц и результатов моделирования, и таким образом зависят от знания элементарного акта ядроядерного взаимодействия. Для восстановления энергии и массы первичной космической частицы используются различные подходы, которые интерпретируют сигналы в детекторах с точки зрения различных моделей адронных взаимодействий.

Космические лучи при $E < 10^{14}$ эВ изучаются прямыми измерениями за пределами атмосферы Земли на высотных аэростатах и космических аппаратах, а энергии космических частиц измеряются достаточно точно. Современные магнитные спектрометры могут определять первичную энергию с погрешностью менее 10%, однако такие устройства имеют ограничения при энергиях $E > 10^{12}$ эВ, и задача определения первичной энергии на основе прямых измерений космических лучей усложняется.

В области 10^{12} – 10^{14} эВ существует недостаток методов измерения. Экспериментальные данные различных космических и баллонных экспериментов часто противоречат друг другу вследствие огромных ошибок при измерении первичной энергии, поэтому разработка подходов, позволяющих увеличить точность измерений, является критически важной и актуальной задачей для развития физики космических лучей в данной области энергий.

На современном этапе развития космических технологий, единственным надежным устройством для определения первичной энергии в области 10^{12} – 10^{14} эВ является ионизационный калориметр. Принцип работы ионизационного калориметра (ИК) основывается на измерении характеристик каскада вторичных частиц при прохождении плотного вещества калориметра. Чтобы измерить число частиц в каскаде, калориметр прослаивается специальными детекторами. Измеряя число частиц N на каждом уровне наблюдения, строят, так называемую, каскадную кривую – зависимость $\log N$ от толщины пройденного слоя d до уровня наблюдения. Если измерен максимум каскадной кривой, то можно определить энергию первичной частицы. Чем выше первичная энергия, тем больше должна быть толщина калориметра, что усложняет использование ИК на космических аппаратах.

В связи с этим, для решения проблемы огромного веса может использоваться тонкий калориметр. В нем регистрируется только начало каскада вторичных частиц, а для определения энергии первичной космической частицы E используется ее зависимость от размера каскада (числа частиц в каскаде): $N = \alpha E^\beta$, где α , β – некие коэффициенты, зависящие от глубины уровня наблюдения (глубины проникновения) и массы первичной космической частицы. При этом основная проблема тонкого калориметра – огромные флуктуации размера каскада на восходящей ветви каскадной кривой. Например, на глубине проникновения $d=40$ г/см², флуктуации настолько велики, что некоторые ливни с энергией 10^{14} эВ имеют N выше, чем ливни с энергией 10^{15} эВ.

Таким образом, уменьшение размера калориметра приводит к существенному уменьшению точности измерений. Для решения данной проблемы в диссертации предложена инновационная методика для определения энергии в ультратонком ионизационном калориметре, которая позволяет значительно уменьшить размеры установки, не теряя точности определения энергии. Суть методики заключается в переходе от анализа каскадных кривых к использованию корреляционных кривых, которые почти не зависят от флуктуаций в развитии каскадного процесса. В диссертации предложено использовать зависимость размера каскада (числа частиц в каскаде) от скорости увеличения размера каскада.

Энергия первичной космической частицы расходуется на ионизационные потери и рождение вторичных частиц. Причем в начале развития каскада скорость увеличения числа частиц в ливне наиболее высокая. Затем постепенно уменьшается до нуля в максимуме каскадной кривой. Для определения первичной энергии нужно провести измерения числа вторичных частиц N на двух соседних уровнях Z_1 и Z_2 , разделенных между собой слоем поглотителя. На основе полученных измерений строятся корреляционные кривые – зависимость размера каскада $\log N_{(Z_1)}$ от величины $\log N_{(Z_1)} - \log N_{(Z_2)}$, соответствующей скорости развития каскада.

Корреляционные кривые, соответствующие различным первичным энергиям, почти параллельны друг другу и практически не зависят от глубины развития каскада, а это позволяет использовать тонкий калориметр. При этом решается основная проблема тонкого калориметра, связанная с огромными флуктуациями размера каскада на восходящей ветви каскадной кривой.

Необходимо отметить, что результаты измерения первичной энергии высокоэнергичных космических лучей основываются на сопоставлении результатов измерений характеристик вторичных частиц и результатов моделирования, и, таким образом, зависят от знания элементарного акта ядро-ядерного взаимодействия.

Исследование корреляций и флуктуаций в процессах множественного рождения частиц в элементарном акте взаимодействия является критичным для большинства теоретических моделей множественного рождения частиц. Результаты анализа позволяют более детально оценивать предсказания моделей, используемых для описания ядро-ядерных взаимодействий, а также моделей, используемых как генераторы частиц для моделирования каскадных процессов.

Для уменьшения ошибок, возникающих при моделировании необходимо понимание особенностей развития каскадных процессов, а также детальная информация о флуктуациях множественности, псевдобыстротных распределениях продуктов ядро-ядерного взаимодействия, особенностей распределения вторичных частиц в различных типах ядро-ядерных взаимодействий. Кроме этого, исследования флуктуаций в процессах множественного рождения частиц в релятивистских ядро-ядерных

соударениях актуально для анализа свойств ядерной материи при высоких плотностях и температурах.

Согласно современным представлениям во взаимодействиях ядер при высоких энергиях адронное вещество переходит в состояние кварк-глюонной плазмы (КГП), в котором кварки и глюоны находятся в квазисвободном состоянии, то есть наблюдается процесс деконфайнмента. Рождение вторичных частиц из сгустка возбужденной ядерной материи носит коллективный характер, который должен приводить к существенным флуктуациям в распределениях вторичных частиц.

Поиск КГП осуществляется в широком энергетическом интервале. С одной стороны, ведутся исследования при максимально доступных энергиях взаимодействия. Исследования в ЦЕРНе (Европейской организации по ядерным исследованиям) и в Брукхевенской национальной лаборатории (США) обнаружили коллективный характер в распределениях вторичных частиц. С другой стороны, активно исследуется область энергий вблизи критической точки фазового перехода адронной материи в кварк-глюонную плазму. Согласно теоретическим представлениям, критическая точка должна находиться в интервале энергий от 4 до 11 ГэВ на нуклон. Предполагается, что исследования вблизи точки фазового перехода позволят получить качественно новую информацию о свойствах КГП и о динамике процесса. Кроме того, в данной области предсказывают существование, так называемой, смешанной фазы ядерной материи, которая включает кроме свободных кварков также протоны и нейтроны. Для исследования именно этой проблемы направлены несколько крупных международных экспериментов, в том числе FAIR в Дармштате и NICA в Дубне.

Отделение флуктуаций, связанных с геометрией столкновения, от флуктуаций, связанных с проявлением фазового перехода вблизи критической точки (точки фазового перехода), является принципиальным моментом для получения обоснованных результатов. При этом о начальном состоянии взаимодействия обычно недостаточно экспериментальной информации. В зависимости от степени центральности взаимодействия, распределения вторичных частиц могут существенно различаться в индивидуальных взаимодействиях. В связи с этим наиболее актуальным для поиска динамических флуктуаций, связанных с фазовым переходом ядерной материи к кварк-глюонной плазме, является пособытийный (event-by-event) анализ столкновений ядер при высоких энергиях. Предполагается, что анализ в деталях характеристик каждого отдельного события позволит непосредственно наблюдать эффекты фазового перехода в событиях, в которых были созданы наиболее благоприятные условия для образования кварк-глюонной плазмы. Быстрое развитие пособытийного исследования в последние годы связано с появлением сложных экспериментов с большими приемными детекторами, способными с высокой точностью измерять характеристики вторичных частиц.

Принципиальным отличием исследования, представленного в диссертации, является использование для определения начальных

параметров взаимодействия, кроме стандартных способов, дополнительно фрагментационных характеристик ядра мишени и ядра снаряда. В экспериментах на встречных пучках фрагменты ядра снаряда обычно не регистрируются. Однако изучение их характеристик может дать существенную информацию о геометрии начального состояния.

Исследование в первую очередь было направлено на аномальные флуктуации в распределениях вторичных частиц: события полного разрушения налетающего ядра, события с аномально высокой множественностью вторичных частиц, события со значительными многочастичными корреляциями ливневых частиц и т.п. Такие исследования актуальны как для поиска и анализа свойств кварк-глюонной плазмы, так и для улучшения моделей, описывающих процессы взаимодействия релятивистских ядер.

Цель диссертационной работы

Изучение флуктуаций в распределениях вторичных частиц, образованных во взаимодействиях релятивистских ядер для разработки новых методов анализа сильно флуктуирующих каскадных процессов.

Задачи

1. Разработать способ измерения энергии первичных космических частиц на основе прямых измерений при первичных энергиях выше 10^{12} эВ, позволяющий существенно подавить влияние огромных флуктуаций множественности вторичных частиц при развитии каскадного процесса на точность определения энергии

2. Предложить классификацию корреляций в псевдобыстротных распределениях вторичных частиц, связывающая флуктуации ливневых частиц, числа фрагментов налетающего ядра и ядра мишени с флуктуациями начальных параметров взаимодействия

3. Провести анализ флуктуаций в распределениях вторичных частиц в событиях полного разрушения налетающего ядра

Объекты исследования: вторичные частицы, образовавшиеся во взаимодействиях релятивистских ядер.

Предмет исследования: флуктуации в релятивистских ядро-ядерных соударениях в распределениях вторичных частиц по множественности, псевдобыстроте, а также корреляции в распределениях ливневых частиц и фрагментов ядра снаряда и ядра мишени.

Методы исследования: метод корреляционных кривых, метод Херста, event-by-event анализ.

Основные положения, выносимые на защиту:

1 Использование зависимости количества вторичных частиц от скорости развития каскада в ультратонком калориметре существенно снижает влияние флуктуаций в развитии каскада на точность определения энергии первичных частиц с $E > 1$ ТэВ.

2 Полученная на основе данных эксперимента EMU01 коллаборации зависимость показателя Херста от ширины псевдобыстротного интервала в распределениях вторичных частиц в соударениях ядер ^{197}Au с энергией 10.7

АГэВ с ядрами фотоэмульсии разделяет все события на четыре типа взаимодействия в зависимости от начальных условий: взрывное, струйное, смешанное и испарительное.

3 Полное разрушение налетающего ядра серы ^{32}S с энергией 200 АГэВ во взаимодействиях с ядрами фотоэмульсии в эксперименте EMU01 коллаборации характеризуется сверхвысокой множественностью ливневых частиц и аномально узким средним псевдобыстротным распределением со сдвигом в сторону меньших значений по сравнению с остальными событиями.

Научная новизна

1 Разработан универсальный способ определения энергии первичного космического излучения для широкого интервала энергий выше 10^{12} эВ на основе ультратонкого калориметра.

2 Предложена классификация флуктуаций плотности в псевдобыстротных распределения вторичных частиц во взаимодействиях ядер золота с ядрами фотоэмульсии на основе метода Херста.

3 Обнаружено аномально высокое количество событий полного разрушения налетающего ядра с высокой множественностью ливневых частиц и узким средним псевдобыстротным распределением, сдвинутым в сторону более низких значений средней псевдобыстроты.

Теоретическая и практическая значимость исследования

1 Применение корреляционных кривых для определения энергии космических частиц позволяет существенно уменьшить геометрические размеры калориметра и увеличить точность измерения энергии первичной частицы.

2 Предложенная классификация корреляций в псевдобыстротных распределениях вторичных частиц позволяет связать флуктуации множественности ливневых частиц и числа фрагментов налетающего ядра и ядра мишени с флуктуациями начальных параметров взаимодействия (степени центральности взаимодействия и степени асимметрии взаимодействующих ядер).

3 Анализ флуктуаций в событиях полного разрушения налетающего ядра во взаимодействиях $S+Em$ при 200 АГэВ позволил найти отличительные особенности этих аномальных событий.

Достоверность и обоснованность полученных результатов

Полученные в ходе исследования результаты и выводы отражают содержание всех разделов и подтверждаются публикациями основных научных результатов в рецензируемых международных и отечественных научных изданиях. Достоверность научных выводов работы подтверждается согласованностью с результатами независимых исследований и выводами, полученными другими авторами.

Источниками исследования являются оригинальные научные работы, перечисленные в списке использованной литературы.

Личный вклад автора

В процессе выполнения данных исследований автор выполнила основную часть численных расчетов, внесла существенный вклад в разработку методов анализа, а также принимала активное участие в постановке задачи и представлении результатов на конференциях.

Публикации

По материалам диссертации опубликованы 22 научные работы (12 статей, 1 патент, 9 тезисов), в том числе 4 статьи в журналах, индексируемых Scopus и Web of Science, и 5 – в изданиях, рекомендуемых КОКСОН РК.

Апробация диссертационной работы

Результаты, содержащиеся в диссертации, обсуждались на международных конференциях: «Ядерная и радиационная физика», «Фараби элемеі», «21st International Symposium on Heavy Ion Fusion», «The 3rd international conference on particle physics and astrophysics», «19th International Symposium on Very High Energy Cosmic Ray Interactions», а также обсуждались в Москве на заседаниях кафедры экспериментальной ядерной физики Национального исследовательского ядерного университета Московского инженерно-физического института.

Связь темы диссертации с планами научных работ.

Проводимые в рамках диссертационной работы исследования выполнялись по Программе целевого финансирования номер BR05236730 «Исследование фундаментальных проблем физики плазмы и плазмоподобных сред», по проекту Грантового финансирования 4824ГФ4 «Поиск экспериментальных проявлений процессов деконфайнмента во взаимодействиях асимметрических ядер», по проекту Грантового финансирования 1276ГФ2 «Развитие научных основ технологии измерения высоко ионизирующего излучения на основе тонкого калориметра», по проекту Грантового финансирования 1563ГФ «Исследования фрагментационных и множественных процессов во взаимодействиях ядер».

Объем и структура диссертации.

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка использованных источников. Объем диссертации составляет 105 страниц, в том числе 5 таблиц и 59 рисунков.