

ОТЗЫВ

официального оппонента,

доктора физико-математических наук, профессора **Бердникова Ярослава Александровича** на диссертацию **Воронюка Вадима Владимировича** «Анализ коллективных эффектов, возникающих при столкновениях тяжелых ионов, в модели PHSD и возможность их исследования на проектируемой установке MPD/NICA», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности: 01.04.16 — физика атомного ядра и элементарных частиц.

Цель диссертационной работы

Диссертация **Воронюка В.В.** посвящена изучению электромагнитных полей возникающих при столкновениях тяжелых ионов и их влиянию на коллективные наблюдаемые в связи с возможным локальным нарушением четности в сильных взаимодействиях («Киральный магнитный эффект»). Исследуется возможность наблюдения этих коллективных наблюдаемых на проектируемой установке MPD комплекса NICA (ОИЯИ, Дубна).

Актуальность проблемы, решаемой в диссертации

Одним из важных открытий сделанных в экспериментах на Релятивистском Коллайдере Тяжелых Ионов (RHIC) в Брукхэйвенской Национальной Лаборатории (США) является наблюдение рождения нового состояния материи, названного кварк-глюонной плазмой, которая, как показали дальнейшие исследования, ведет себя практически как идеальная жидкость. Расширение этой «жидкой капли» приводит к наблюдаемым коллективным потокам рожденных частиц. С изучением коллективных потоков связывают возможность исследования динамики кварк-адронного фазового перехода и поиска критической точки. Полномасштабный поиск сигнала наличия кварк-глюонной плазмы ведется в экспериментах STAR и PHENIX на RHIC и в эксперименте ALICE на Большом Адроне Коллайдере (LHC). На поиск критической точки на фазовой диаграмме нацелены будущие проекты FAIR (GSI, Дармштадт) и NICA (ОИЯИ, Дубна). Теоретически, нетривиальная топологическая структура вакуума квантовой хромодинамики может, в присутствии сильного магнитного поля, проявляться в нарушении четности при столкновении тяжелых ионов, и подтверждается расчетами квантовой хромодинамики на решетке. Несмотря на сравнительно давнюю историю эффекта, до сих пор нет единой интерпретации экспериментальных результатов. В связи с вышесказанным, актуальность темы диссертации не вызывает сомнений.

Содержание работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и приложения. Полный объем диссертации 142 страницы текста с 70 рисунками и 3 таблицами. Список литературы содержит 181 наименование.

Введение содержит цель работы и обоснование актуальности темы проводимых исследований.

В первой главе дано описание основных компонент используемой компьютерной транспортной модели.

Вторая глава посвящена изучению электромагнитных полей возникающих в столкновении тяжелых ионов и влиянию этих полей на движение частиц в транспортной модели PHSD. Рассмотрена пространственно-временная конфигурация полей. Исследована зависимость от параметров столкновения и начального распределения спектров протонов. Выполнен анализ влияния электромагнитного поля на движение частиц. Показана компенсация взаимного действия электрической и магнитной компонент. Аналогично показано сокращение действия векторной части партонного потенциала.

В третьей главе представлены модельные расчеты для коллективных потоков и азимутальных угловых корреляций. Продемонстрировано влияние скалярной части партонных потенциалов на потоки. Детально рассмотрен адронный и партонный фон для кирального магнитного эффекта. Показано отсутствие значимого влияния электромагнитного поля на наблюдаемые.

В четвертой главе представлено общее описание многоцелевого детектора MPD планируемого в ОИЯИ (г. Дубна) ускорительного комплекса NICA. Даны основные характеристики используемых для моделирования детекторов.

Пятая глава посвящена моделированию детектора MPD. Показана возможность исследования коллективных потоков и азимутальных угловых зарядовых корреляций на установке.

В Приложении содержится интерфейс программного модуля реализованного в коде транспортной модели, а также схему интегрирования уравнений движения в поле.

В Заключении сформулированы основные результаты и положения, выносимые на защиту.

Научная новизна

1. **Впервые** в код транспортной модели включен расчет самосогласованного электромагнитного поля, возникающего в столкновениях тяжелых ионов.
2. **Впервые** получена оценка интенсивности электромагнитного поля с учетом обратной реакции поля на движение частиц в зависимости от характеристик столкновения.

3. **Впервые** получена оценка влияния этого поля на динамику столкновения, наблюдаемые коллективные потоки и азимутальные угловые корреляции.

Основные результаты, выносимые на защиту

1. Существенно модифицирована компьютерная транспортная модель HSD/PHSD для учета самосогласованного электромагнитного поля, возникающего в столкновениях тяжелых ионов.
2. Дана оценка интенсивности электромагнитного поля, возникающего в столкновениях тяжелых ионов, с учетом геометрии сталкивающихся ядер, условия запаздывания поля и движения частиц в этом поле в зависимости от параметров столкновения. Показано, что наибольшая интенсивность ($\sim 10^{18}$ Гс) достигается в центре области перекрытия сталкивающихся ядер в течении времени их перекрытия и существенно определяется протонами-спектаторами. При этом максимум локальной плотности энергии коррелирует с максимумами магнитного поля и возможен Киральный магнитный эффект.
3. Обнаружено, что азимутальные угловые корреляции при умеренных энергиях могут быть разумно описаны чисто адронной моделью, а при более высоких энергиях необходим учет партонных степеней свободы. При этом очень важен анализ других адронных наблюдаемых.
4. Показано, что действие электромагнитного поля в момент полного перекрытия сравнимо с действием партонного скалярного потенциала. Обнаружено, что это поле не приводит к видимым эффектам в наблюдаемых, что связано с сокращением действия электрической и магнитной компонент силы действующей на заряженные частицы.
5. На основе Монте-Карло анализа, показана возможность изучения потоков и азимутальных угловых корреляций на установке MPD.

Научно-практическая значимость результатов работы

Полученные результаты расширяют наши знания о динамике столкновения тяжелых ионов. Рассмотренные в работе фоновые эффекты связанные с экстремально сильными полями и наличием партонной фазы для моделей нарушения четности в сильных взаимодействиях ранее никем не изучались и могут быть использованы в качестве фона и ограничений для этих моделей.

Изменения внесенные в транспортную модель PHSD являются официальными и доступны для пользователей в разных научных центрах ОИЯИ (РФ), GSI (Германия), BNL (США).

На основе моделирования детектора MPD планируемого комплекса NICA (Дубна, ОИЯИ), показана возможность изучения коллективных эффектов на установке. Выполненный анализ необходим для осуществления проекта и дальнейшего развития экспериментальной программы в ОИЯИ (РФ).

Достоверность результатов, полученных автором диссертации, не вызывает сомнений и обеспечивается использованием теоретических методов квантовой теории поля при конечной температуре, сравнением модельных расчетов с экспериментальными данными в широкой области энергий, а также их апробацией на различных международных совещаниях и конференциях.

В качестве замечаний следует отметить следующее:

1. В работе электромагнитное поле рассматривается как классическое, но не уточняется можно ли так считать при таком интенсивном поле.
2. В главе 5 при моделировании детектора и анализе наблюдаемых не указано как определяется центральность событий.
3. В ссылке 78 отсутствует название журнала.

В целом диссертационная работа представляет собой законченное научное исследование, содержащее новые результаты, которые важны для анализа коллективных эффектов, возникающих при столкновениях тяжелых ионов. Диссертация написана ясным языком. Ее результаты являются новыми и достоверными, исследования по теме диссертации опубликованы в 8 печатных работах в ведущих рецензируемых научных журналах, прошли апробацию на семинарах ОИЯИ, НИИЯФ МГУ, ИЯИ (Трицк), Франкфуртского университета (секция «Transport theory»), а также докладывались на международных конференциях: «International Conference on Strangeness in Quark Matter» (SQM 2011), «28th Max Born Symposium and NIC for FAIR Workshop: Three Days on Quarkyonic Island», «International Workshop on Hot and Cold Baryonic Matter» (HCBM 2010).

Автореферат правильно и полностью отражает содержание диссертации.

Диссертация Воронюка Вадима Владимировича «Анализ коллективных эффектов, возникающих при столкновениях тяжелых ионов, в модели RHSD и возможность их исследования на проектируемой установке MPD/NICA» является законченной научно-квалификационной работой и соответствует специальности 01.04.16 – «Физика атомного ядра и элементарных частиц».

Диссертация полностью отвечает требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842. Автор диссертации Воронюк Вадим Владимирович заслу-

