

Отзыв официального оппонента

на диссертационную работу Колесникова Вадима Ивановича

«Изучение рождения π^\pm , K^\pm , протонов, антипротонов, легких ядер (d , t , ${}^3\text{He}$) и антидейтронов в столкновениях $\text{Pb}+\text{Pb}$ при энергиях от 20 до 158 ГэВ на нуклон»,

представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.16 — физика атомного ядра и элементарных частиц

Одна из ключевых задач современной физики состоит в изучении свойств сильновзаимодействующей материи при экстремальных значениях плотности и температуры. При каких условиях происходит фазовый переход адронной материи в состояние кварк-глюонной плазмы? Можно ли обнаружить сигнал, свидетельствующий о существовании критической точки на фазовой диаграмме КХД? Ответ на эти вопросы имеет принципиальное значение для многих областей науки: ядерной физики, Стандартной Модели в физике частиц, космологии ранней Вселенной и астрофизики. Несмотря на существование значительного количества феноменологических подходов для описания низкоэнергетичной КХД и достаточно хорошо развитые алгоритмы решёточных расчетов, точный вид уравнения состояния ядерной материи, включая характеристики фазовых переходов, в настоящее время не могут быть получены из первых принципов. Поэтому основная информация о структуре и характере эволюции ядерной материи в экстремальных условиях, т.е. с плотностью энергии выше порогового значения перехода в состояние деконфайнмента, доступна только в экспериментах по ядро-ядерным столкновениям. Изучение ядро-ядерных столкновений при высоких энергиях даёт уникальную возможность получить ответы на поставленные вопросы в хорошо контролируемых лабораторных экспериментах. В связи с изложенным несомненно актуальной является диссертация В.И. Колесникова, которая посвящена экспериментальному изучению характеристик заряженных пионов, каонов, протонов, антипротонов, легких ядер и антидейтронов, образованных в столкновениях ядер свинца при энергии налетающего ядра от 20 ГэВ до 158 ГэВ на нуклон в эксперименте на ускорителе SPS (CERN).

Диссертация В. И. Колесникова состоит из введения, четырех глав и заключения.

Во **Введении** дано краткое описание Стандартной модели сильных взаимодействий, фазовой диаграммы КХД материи и современные теоретические представления об эволюции материи в ядро-ядерных столкновениях при высоких энергиях. Представлено современное состояние исследований свойств сильновзаимодействующей ядерной материи в столкновениях ядер и дано обоснование актуальности темы работы. Обоснован также выбор цели, задач и методов исследований для диссертационной работы. Показано, что рождение частиц в событиях с большой множественностью следует скрупулёзно исследовать в зависимости от большого числа переменных, включая энергию столкновения, прицельный параметр реакции, быстроту, поперечный импульс, а также массу частицы. Обширный набор наблюдаемых объясняется разной чувствительностью изучаемых пробников к фазовым переходам. Обоснована важность анализа различных коллективных характеристик для поиска и изучения экспериментальных сигналов различных переходных явлений в процессах сильного взаимодействия. Обращено внимание на трудности получения экспериментальных результатов, так как кинематические характеристики частиц зависят от свойств горячей и плотной ядерной материи весьма нетривиальным образом, вследствие большой множественности образованных частиц, наличия и нуклонных и партонных степеней свободы, а также сложного характера хромодинамики на больших расстояниях.

Первая глава посвящена описанию экспериментальной установки, с помощью которой получены основные результаты диссертации. Приведены параметры ускорительного комплекса SPS в ЦЕРН, представлены основные характеристики экспериментальной установки NA49, и подробно описана времяпролетная система на основе сцинтилляционных счетчиков, в создании которой автор принимал активное участие. В данном разделе приводится также краткое описание разработанных автором программных средств для онлайн контроля времяпролетной системы и результатов их работы.

Во **второй главе** подробно описана разработанная автором процедура анализа экспериментальных данных, которая включает калибровку времяпролетного детектора, реконструкцию данных, определение оптимальных критериев качества отбора событий и треков с последующими коррекциями, идентификацию всех типов частиц, а также оценку систематических погрешностей. Следует отметить детальную проработку методов коррекции времяпролетной информации, реализация которых позволила получить рекордное по тем временам

временное разрешение порядка 75 пикосекунд для системы из 890 сцинтилляционных счетчиков. Предложенный автором оригинальный метод идентификации позволяет эффективно разделять адроны (пионы, каоны, протоны и антипротоны) с импульсами от 1 до 10 ГэВ/с, а также легкие ядра (d , t , ${}^3\text{He}$) до 15 ГэВ/с. Детально проработаны вопросы моделирования экспериментальной установки, а также разработан оригинальный метод коррекции выходов антипротонов и протонов на вклад от распадов гиперонов.

В **третьей главе** представлены основные результаты диссертации по рождению заряженных пионов, каонов, протонов и антипротонов в Pb+Pb столкновениях при энергиях от 20А до 158А ГэВ. Получена энергетическая зависимость выходов заряженных пионов и каонов в центральных реакциях ядер свинца при пяти энергиях столкновения, а также исследована зависимость от центральности столкновения при энергии 40 и 158 ГэВ на нуклон. Обнаружена явная немонотонность в энергетической зависимости отношения K^+/π^+ частиц ("Horn") и ограниченное плато в величине параметра наклонов спектров по поперечной массе ("Step") при центральной быстроте, что может указывать на проявление фазового перехода из состояния адронного газа в систему с кварк-глюонными степенями свободы при энергиях SPS ("onset of deconfinement"). В этой же главе представлены результаты по инвариантным спектрам и быстротным распределениям для протонов и антипротонов в центральных Pb+Pb столкновениях, а также по энергетической зависимости отношения антипротонов к протонам и анти-Лямбда к антипротонам. На основе полученных распределений проведен сравнительный анализ рождения протонов и антипротонов в зависимости от энергии и центральности столкновения.

Четвертая глава содержит основные результаты по рождению легких ядер (d , t , ${}^3\text{He}$) и антидейтронов в центральных столкновениях ядер свинца. В частности, подробно изучена энергетическая зависимость отношения трития к ${}^3\text{He}$ в распределениях по поперечному импульсу, получены быстротные распределения для ядер дейтронов и гелия-3, после чего проведен анализ эволюции их формы в зависимости от энергии столкновения и атомного массового числа A . Получены полные выходы для d и ${}^3\text{He}$, изучена их энергетическая зависимость, зависимость от массового числа для нуклонных кластеров, а также проведено сравнение с моделями. В данной главе также представлены результаты исследования зависимости выхода дейтронов и антидейтронов от прицельного параметра в Pb+Pb столкновениях при энергии 158 ГэВ на нуклон. Получены и проанализированы распределения по поперечному импульсу и плотности частиц на единицу быстроты

в нескольких интервалах по центральности, проведен сравнительный анализ выходов дейтронов и антидейтронов, протонов и антипротонов в рамках модели коалесценции.

В **Заключении** сформулированы основные результаты работы.

Новизна проведенных исследований определяется тем, что в диссертации:

Впервые получены экспериментальные данные по выходам заряженных пионов и каонов в центральных Pb+Pb соударениях при 5 энергиях столкновения от 20 до 158 ГэВ на нуклон. В энергетической зависимости отношения K^+/π^+ частиц обнаружен явный максимум при энергии пучка 30 ГэВ на нуклон, что является возможным сигналом фазового перехода в ядерной материи (*onset of deconfinement*). Следует отметить, что это наблюдение нерегулярности в поведении отношения K^+/π^+ в зависимости от энергии ядро-ядерных столкновения подтверждено впоследствии в других экспериментах

Впервые подробно исследована зависимость выходов заряженных пионов и каонов от центральности столкновения в Pb+Pb реакциях при энергии столкновения 158 ГэВ на нуклон. Изучена зависимость от прицельного параметра интегрированных по p_t выходов частиц, а также формы спектров по поперечной массе mt . Характер изменения параметров спектров по поперечной массе соответствует возрастанию ионизационных потерь (*stopping power*) в центральных столкновениях. Анализ спектров адронов в рамках BlastWave модели указывает на монотонное уменьшение температуры кинетического фризаута с увеличением центральности при энергии столкновения 158А ГэВ.

Впервые получены систематические данные по выходам протонов и антипротонов в центральных Pb+Pb соударениях при 5 энергиях столкновения (20, 30, 40, 80 и 158 ГэВ на нуклон), а также в MinBias Pb+Pb реакциях при 40А и 158А ГэВ. Обнаружено, что отношение антипротонов к протонам при центральной быстрой быстро растет с увеличением энергии столкновения, увеличиваясь почти на 2 порядка при 158 ГэВ на нуклон по сравнению со значением анти- p/p при 20А ГэВ, что указывает на быстрое уменьшение нет-барионной плотности в центральных столкновениях тяжелых ядер при больших энергиях столкновения.

Получен большой объем новых экспериментальных данных по рождению легких ядер в центральных Pb+Pb реакциях в диапазоне энергий столкновения от 20 до 158 ГэВ на нуклон. Впервые получена и проанализирована зависимость

выходов дейтронов и гелия-3 от быстроты, а также полные выходы d и ${}^3\text{He}$ при 5 энергиях столкновения. Проведены расчеты по статистической модели для множественностей ядер и показано, что полные выходы легких ядер хорошо описываются данной моделью.

Впервые получены оценки для температуры кинетического фризаута и средней скорости радиального расширения в источнике частиц на основе анализа параметров наклонов спектров для нуклонных кластеров при нескольких энергиях столкновения.

Впервые получена зависимость выходов нуклонных кластеров (протонов и легких ядер) от массового числа A в различных интервалах фазового пространства. Энергетическая зависимость экспоненциального фактора подавления выходов кластеров с большей массой оказалась близка к ожидаемой в статистической модели.

Впервые получено отношение выходов тритонов к гелию-3 в зависимости от поперечного импульса при нескольких энергиях столкновения – очень важные данные для изучения процесса динамической эволюции изоспинового состава продуктов реакции.

Впервые получены новые экспериментальные данные по выходам антидейтронов в столкновениях $\text{Pb}+\text{Pb}$ при энергии столкновения 158 ГэВ на нуклон. Обнаружено, что форма распределений по поперечному импульсу для антидейтронов и дейтронов оказалась одинаковой при всех центральных столкновениях, свидетельствуя об образовании легких анти-ядер в конце процесса эволюции источника частиц (freezeout).

Впервые получены данные по выходам антидейтронов в зависимости от быстроты. Обнаружено, что распределения по скорости для дейтронов и антидейтронов имеют различную форму. Характер наблюдаемых распределений указывает на коалесценцию, как возможный механизм образования легких антиядер и ядер при максимальной энергии SPS.

Разработан оригинальный метод идентификации частиц с использованием комбинированной информации о времени пролета с TOF детекторов и ионизационных потерях от времяпроекционных камер NA49. Метод позволил эффективно разделять в эксперименте адроны (пионы, каоны, протоны и антипротоны) с импульсами от 1 до 10 ГэВ/с и легкие ядра (d , t , ${}^3\text{He}$) до 15 ГэВ/с.

Достоверность полученных результатов

Достоверность результатов работы подтверждается применением современных методов проведения экспериментальных исследований и взаимной согласованностью результатов. Высокая степень достоверности представленных в диссертации результатов подтверждается также более поздними независимыми исследованиями в других экспериментах.

Представленные в диссертации результаты докладывались на научных семинарах в ОИЯИ, на семинарах в международных научных центрах (CERN, GSI и др.) и 12 международных конференциях. Все 15 научных работ, результаты которых включены в диссертацию, опубликованы в ведущих российских и зарубежных рецензируемых журналах.

В качестве **замечаний** по диссертации можно отметить следующее.

Результаты идентификации частиц в эксперименте зависят не только от TOF детекторов, созданных автором диссертации, поэтому было бы полезно представить основные характеристики всех TOF детекторов, используемых в NA-49;

Некоторые сокращения и научный жаргон встречаются в тексте до их объяснения в тексте (к примеру, BlastWave и MinBias на стр. 23);

Стр. 91 – подпись под рис.3 и в тексте диссертации написано «идентифицированные частицы», видимо, вместо «восстановленные» частицы, а в тексте статьи -- «неидентифицированные частицы»;

В диссертации стоило бы обсудить влияние систематических погрешностей идентификации каонов и пионов разного знака на полученные результаты;

Стр. 80—коэффициент потерь – 99% (?);

В тексте диссертации содержатся опечатки, количество которых вполне извинительно для работы столь большого объема;

В автореферате на стр. 31-32 и 33-34 повторены 16 строчек текста (половина страницы), на стр.35 пропала часть основного результата работы;

Данные замечания не влияют на общую высокую оценку работы В.И.Колесникова и не ставят под сомнение основные результаты и выводы диссертации.

Значимость полученных в диссертации результатов

Результаты проведенных автором диссертации исследований представляют несомненную научную ценность и высокую научную значимость. Диссертационная работа В.И. Колесникова выполнена на высоком научном уровне, является цельной научной работой и содержит большое количество полученной впервые ценной экспериментальной информации, имеющей фундаментально важное значение для развития теории сильных взаимодействий, проверки моделей ядро-ядерных столкновений и планировании новых экспериментов по столкновениям ядер, к примеру, проектов НИКА в ОИЯИ и FAIR в GSI (Дармштадт).

Основные результаты диссертации своевременно и полно опубликованы в ведущих научных журналах и неоднократно докладывались на российских и международных научных конференциях. Оформление рукописи соответствует принятым правилам и стандартам. Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Диссертация В.И. Колесникова «Изучение рождения π^\pm , K^\pm , протонов, антипротонов, легких ядер (d, t, ^3He), и антинейтронов в столкновениях Pb+Pb при энергиях от 20 до 158 ГэВ на нуклон» отвечает всем требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней» ВАК РФ, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор, Колесников Вадим Иванович, за результаты изучения свойств адронов и сильновзаимодействующей материи в широкой области энергий, которые могут быть квалифицированы как крупное научное достижение, несомненно заслуживает присуждения ему степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.16 — физика атомного ядра и элементарных частиц.

Результаты диссертации обсуждались и были одобрены на научном семинаре ИТЭФ 1 ноября 2017 года.

Официальный оппонент

доктор физико-математических наук, начальник лаборатории радиационных процессов, старший научный сотрудник,



Долголенко Анатолий Григорьевич

Подпись Долголенко А.Г. заверяю
ученый секретарь НИЦ "Курчатовский институт" - ИТЭФ

к.ф.-м.н.



В.В. Васильев