

О Т З Ы В

официального оппонента на диссертацию **Колесникова Вадима Ивановича** «Исследование рождения π^\pm , K^\pm , протонов, антипротонов, легких ядер (d , t , ^3He) 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».

За свою уже почти полувековую историю релятивистская ядерная физика, зародившаяся в ЛВЭ ОИЯИ (Дубна) и Лоуренцевской Лаборатории (Беркли), претерпевает очередной этап бурного развития. Получаемые данные с ускорителя SPS (CERN) и коллайдеров RHIC (BNL) и LHC (CERN) говорят о том, что в центральных соударениях тяжелых ядер наблюдаются закономерности, характерные для фазового перехода в новое состояние кварк-глюонной материи. Одним из самых важных результатов, полученных в этих исследованиях экспериментом NA49 на SPS (CERN), является тот факт, что энергия в системе центра масс нуклонов сталкивающихся ядер свинца, когда появляются признаки фазового перехода, равна приблизительно 7-8 ГэВ. Поэтому в дополнение к исследованиям при высоких энергиях на коллайдерах RHIC (BNL) и LHC (CERN), когда достигаются высокие температуры, но при этом плотность кварк-глюонной материи мала вследствие асимптотической свободы, планируется изучение центральных соударений тяжелых ядер при более низких энергиях, но при большой барионной плотности, на строящихся ускорителях НИКА (Дубна) и FAIR (Дармштадт). Поэтому **актуальность** темы исследования диссертации, выполненной в рамках исследований эксперимента NA49 на SPS (CERN), не вызывает никаких сомнений.

Основной **целью** представленной диссертации являлось экспериментальное исследование на установке NA49 в CERN характеристик образования заряженных пионов, каонов, протонов, антипротонов, а также легких ядер: дейтронов, антидейтронов, тритонов и гелия-3 в столкновениях ядер свинца при энергиях налетающего ядра от 20 ГэВ до 158 ГэВ на нуклон. В зависимости от энергии столкновений и их центральности изучались инвариантные распределения образованных частиц по поперечной массе, распределения плотности частиц по быстроте, множественности частиц и их

отношения. Для достижения поставленных целей были решены следующие основные задачи:

- Создание и запуск в эксплуатацию сцинтилляционного детектора для идентификации частиц по времени пролета в эксперименте NA49;
- Разработка и практическое применение новых методов коррекции времяпролетной информации в событиях с большой множественностью частиц, а также эффективных алгоритмов идентификации адронов и легких (анти)ядер с использованием комбинации информации о времени пролета и об ионизационных потерях в интервале импульсов от 1 до 15 ГэВ/с;
- Разработка алгоритмов для проведения моделирования отклика и эффективности детектора, а также для корректного учета вклада от слабых распадов гиперонов в выходах (анти)протонов и заряженных пионов;
- Экспериментальное и теоретическое изучение инвариантных распределений частиц по поперечной массе, плотностей частиц по быстроте, множественностей частиц и их отношений;
- Изучение энергетической зависимости отношения выходов заряженных каонов к пионам, антипротонов к протонам, антилямбда к антипротонам и трития к гелию-3;
- Экспериментальное исследование зависимости от центральности столкновения выходов адронов и ядер (анти)дейтерия.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, перечня цитируемой литературы, содержащего 204 ссылки. В диссертации содержится 179 рисунков и 19 таблиц. Общий объем диссертации составляет 191 страницу.

Введение содержит краткую характеристику темы исследования и обоснование ее актуальности, формулировку цели и направлений работы, методологию и методику исследований, обсуждение новизны результатов, научной и практической ценности работы, основных положений, выносимых на защиту, апробацию работы, личный вклад автора и структуру диссертации.

В **первой главе** сначала дано краткое описание ускорительного комплекса Super Proton Synchrotron (SPS) в ЦЕРН, а также характеристики пучков ядер, мишеней и типов триггера, используемых в эксперименте. Затем дано описание установки NA49 и представлены основные характеристики его составных частей. Большое внимание уделено описанию играющего центральную роль для представленных исследований времяпролетного детектора TOF на основе сцинтилляционных счетчиков, который был создан в Лаборатории высоких энергий (ОИЯИ) для идентификации заряженных

адронов и легких ядер в диапазоне импульсов от 1 до 15 ГэВ/с. Автор принимал активное участие в разработке, создании и успешном запуске данного 900-канального TOF детектора. Им был разработан набор программ для on-line контроля параметров TOF, что позволило провести в кратчайшие сроки провести наладку и тестирование детектора TOF установки NA49.

Вторая глава посвящена описанию процедуры анализа экспериментальных данных, которая состоит из: а) калибровки и реконструкции данных; б) определения критериев качества данных и отбора хороших событий и треков; с) идентификации частиц; д) определения поправок на эффективность детектора и содержание вторичных частиц; е) оценки систематических ошибок измерений.

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. Основной целью программы энергетического сканирования NA49 являлось экспериментальное подтверждение возможности наблюдения начала фазового перехода деконфайнмента (“onset of deconfinement”) в центральных столкновениях ядер свинца.

Получены инвариантные m_T -спектры заряженных пионов и каонов в центральных Pb+Pb столкновениях при энергии от 20 до 158 ГэВ на нуклон, где параметр фитирования T (“эффективная температура”) определяет характерный наклон спектров. Энергетическая зависимость этих спектров и отношения каонов к пионам указывает на начало фазового перехода при энергии 30 ГэВ на нуклон (в системе центра масс сталкивающихся нуклонов 7-8 ГэВ). Показано, что в центральных столкновениях параметры наклонов для (анти)протонов не зависят от энергии столкновения, данная характерная зависимость параметров наклонов спектров (plato) подтверждается измерениями для пионов и каонов, указывая на возможное образование смешанной фазы адронного газа и кварк-глюонной материи при энергиях SPS. Кроме этого, впервые изучена зависимость от прицельного параметра формы спектров адронов по поперечной массе m_T в рамках BlastWave анализа. Получено указание на монотонное уменьшение температуры кинетического охлаждения (freeze-out) с увеличением центральности при энергии столкновения 158А ГэВ.

Показано, что отношение антипротонов к протонам при центральной быстрой 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 барионной плотности в центральных столкновениях тяжелых ядер при больших энергиях столкновения.

Четвертая глава содержит основные результаты диссертации по рождению легких ядер (d , t , ${}^3\text{He}$) и антидейтронов в центральных столкновениях ядер свинца.

Представлены инвариантные p_T -спектры для d и ${}^3\text{He}$ в центральных столкновениях Pb+Pb при энергии от 20А до 158А ГэВ. Изучена энергетическая зависимость отношения трития к ${}^3\text{He}$ по поперечному импульсу. Расчеты по статистической модели для множественностей ядер и показали, что полные выходы легких ядер хорошо описываются данной моделью. На основе анализа быстрой распределений для параметров наклона m_T -спектров для ${}^3\text{He}$ и массовой зависимости $\langle m_T \rangle - m$ получены оценки для температуры кинетического охлаждения (freeze-out) и средней скорости радиального расширения в источнике при нескольких энергиях столкновения. Была впервые получена зависимость выходов нуклонных кластеров (протонов и легких ядер) от массового числа A в различных интервалах фазового пространства, а также изучена энергетическая зависимость экспоненциального фактора подавления выходов кластеров с большей массой (*penalty factor* p). Показано, что значение фактора подавления близко к рассчитанному в рамках статистической модели фактору Больцмана. На основе изучения энергетической зависимости отношения $t/{}^3\text{He}$ в центральных Pb+Pb столкновениях обнаружена корреляция отношений n/p и π/π^+ .

Получены новые экспериментальные данные по выходам антидейтронов в столкновениях Pb+Pb при энергии столкновения 158 ГэВ на нуклон. Впервые изучены зависимость рождения антидейтронов от прицельного параметра столкновения для 0-23% центральных Pb+Pb реакций, а также зависимость от поперечного импульса для отношения антидейтронов к дейтронам. Отсутствие явной p_T -зависимости для отношения анти- d/d может означать незначительное влияние процесса аннигиляции в файерболе на характеристики рожденных антидейтронов, что является ожидаемым в случае образования легких анти-ядер в конце процесса эволюции источника частиц (freeze-out). Обнаружено различие в формах распределения по быстрой для

дейтронов и антидейтронов: парабола с минимумом в центральной быстрой для d и гауссово распределение с максимумом в том же месте для анти- d . Подобие распределений для (анти)нуклонов и (анти)нуклонных кластеров указывает на коалесценцию как возможный механизм образования легких (анти)ядер при максимальной энергии SPS. На основе сравнительного анализа выходов антидейтронов и антипротонов импульса в рамках модели коалесценции, получены значения параметров коалесценции для нескольких значений центральности и в зависимости от поперечного импульса. Быстротные плотности частиц (dN/dy) нормированные на число “раненых” (*wounded*) нуклонов N_w не зависят от центральности столкновения для дейтронов в интервале от центральных до периферийных столкновений и для антидейтронов в центральных столкновениях. Данное поведение может быть следствием постоянства плотности (анти)нуклонов в Pb+Pb столкновениях при максимальной энергии SPS.

Основные результаты диссертации выносимые на защиту:

1. Участие в разработке и создании 900-канального времяпролетного детектора TOF на основе сцинтилляционных счетчиков для эксперимента NA49 в ЦЕРН. Запуск TOF и успешная эксплуатация в процессе набора данных с 1995 по 2002 год. Это включает в себя:
 - Участие в сборке, наладке и тестировании TOF;
 - Разработка программ для текущего online контроля параметров TOF.
2. Разработка метода калибровки времяпролетной информации с TOF детектора, проведение калибровок, получение калибровочных констант. Метод включает в себя:
 - метод геометрической калибровки детектора (TOF alignment);
 - методы коррекции времяпролетной информации для всех типов реакций ($p+p$, $p+Pb$, $Pb+Pb$), энергий и прицельных параметров;
 - специализированную программу-клиент для реконструкции времяпролетной информации с TOF детектора.
3. Разработка и реализация оригинального метода идентификации частиц с использованием комбинированной информации о времени пролета с TOF и ионизационных потерь с время-проекционных камер NA49 для эффективного разделения адронов (пионы, каоны, (анти)протоны) с импульсами от 1 до 10 ГэВ/с и легких ядер (d , t , ${}^3\text{He}$) до 15 ГэВ/с.
4. Разработка метода анализа инвариантных спектров и выходов частиц для π , K , p , d , t , ${}^3\text{He}$, который включает в себя подробный анализ эффективностей, коррекций и систематических погрешностей,

моделирование детектора, а также учет вклада от распадов резонансов в выходы частиц.

5. Экспериментальные данные по выходам заряженных пионов и каонов в центральных Pb+Pb соударениях при 5 энергиях столкновения от 20 до 158 ГэВ на нуклон. Измерение инвариантных спектров при центральной быстроте в интервале по поперечной массе до $m_T - m$ до 1 ГэВ.
6. Исследование энергетической зависимости распределений частиц по быстроте dN/dy , параметров наклонов спектров T и средней поперечной массы $\langle m_T \rangle - m$.
7. Подробное изучение зависимости выходов заряженных пионов и каонов от центральности столкновения в Pb+Pb реакциях при энергии столкновения 158 ГэВ на нуклон при центральной быстроте.
8. Результаты исследования зависимости распределений адронов по быстроте dN/dy от прицельного параметра столкновения, а также формы спектров по поперечной массе в рамках BlastWave анализа.
9. Систематические данные по выходам протонов и антипротонов в центральных Pb+Pb соударениях при 5-ти энергиях столкновения (20, 30, 40, 80, и 158 ГэВ на нуклон), а также в MinBias Pb+Pb реакциях при 40А и 158А ГэВ.
10. Результаты исследования энергетической зависимости и зависимости от центральности для распределений (анти)нуклонов на по быстроте dN/dy , для параметров наклонов спектров T , для средней поперечной массы $\langle m_T \rangle - m$, а также для отношения антипротонов к протонам и антипротонов к анти- Λ .
11. Новые экспериментальные данные по рождению легких ядер в центральных Pb+Pb реакциях в диапазоне энергий столкновения от 20 до 158 ГэВ на нуклон. Результаты анализа о зависимости выходов дейтронов и гелия-3 от быстроты, а также данные по полным выходам d и ${}^3\text{He}$ при 5-ти энергиях столкновения.
12. Результаты анализа быстроевых распределений параметров наклона m_T -спектров для ${}^3\text{He}$, а также оценки для температуры кинетического остывания (freeze-out) и средней скорости радиального расширения в источнике частиц на основе анализа параметров наклонов спектров для нуклонных кластеров при нескольких энергиях столкновения.
13. Результаты анализа зависимости выходов нуклонных кластеров (протонов и легких ядер) от массового числа A в различных интервалах фазового пространства, а также энергетическая зависимость экспоненциального фактора подавления выходов кластеров с большей массой.
14. Экспериментальные данные по отношению выходов тритонов к гелию-3 в зависимости от поперечного импульса при нескольких энергиях

столкновения, а также энергетическая зависимость отношения $t/{}^3\text{He}$ в центральных Pb+Pb столкновениях.

15. Новые экспериментальные данные по выходам антидейтронов в столкновениях Pb+Pb при энергии столкновения 158 ГэВ на нуклон. Результаты исследования зависимости выходов антидейтронов от прицельного параметра столкновения для 0-23% центральных Pb+Pb реакций, а также зависимости от поперечного импульса для отношения антидейтронов к дейтронам.
16. Экспериментальные данные по выходам антидейтронов в зависимости от быстроты и оценки формы быстрой распределения для антидейтронов.
17. Результаты сравнительного анализа выходов антидейтронов и антипротонов в зависимости от центральности столкновения и поперечного импульса в рамках модели коалесценции, оценки значения параметра коалесценции для нескольких значений центральности.

Методологической основой исследований, представленных в диссертации, является совокупность специальных методов по экспериментальному и теоретическому исследованию многочастичных адронных состояний, образованных в столкновениях тяжелых ядер. К основным экспериментальным **методам** относятся используемые методики регистрации заряженных частиц в газовых и сцинтилляционных детекторах, а также разработанный автором оригинальный способ идентификации частиц по комбинированным ионизационным потерям и времени пролета, который сыграл решающую роль для получения представленных в диссертации результатов. В анализе экспериментальных данных широко применялись **методы** из смежных областей физики – термодинамики и релятивистской гидродинамики, а также **методы** численного моделирования физических процессов при прохождении частиц через вещество.

Основу данной диссертации составляют результаты завершеного цикла исследований автора, который занял период более двадцати лет. Основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы. Из работ, выполненных в соавторстве, в диссертацию включены результаты, полученные либо лично автором, либо при его определяющем участии в постановке задач, разработке методов их решения, и анализа экспериментальных данных.

Диссертация Колесникова Вадима Ивановича является законченным научным трудом и выполнена на высоком научном уровне. Содержащиеся в ней многие **новые результаты** получены впервые и имеют важную **научную ценность**

для дальнейшего развития релятивистской ядерной физики с целью изучения новых состояний кварк-глюонной материи. **Практическая ценность** полученных результатов состоит в том, что они широко применяются при анализе современных данных, при планировании новых исследований и экспериментальных установок, например, на ускорителях НИКА (ОИЯИ) и FAIR (GSI).

Достоверность полученных в диссертации результатов подтверждена независимыми экспериментальными измерениями, альтернативными методами где это было возможно, компьютерным моделированием и согласием с теоретическими ожиданиями и вычислениями.

Результаты диссертации могут быть использованы во всех зарубежных и российских центрах с пучками релятивистских ядер: ЦЕРН, BNL, GSI, ОИЯИ, ИФВЭ НИЦ КИ, а также в НИЦ КИ, НИЦ КИ - ПИЯФ, НИЦ КИ - ИТЭФ, ФИАН, ИЯИ РАН, ИЯФ СОРАН, НИИЯФ МГУ, СПбГУ, СПбПУ и др.

Результаты, полученные в диссертации с достаточной полнотой опубликованы в ведущих реферируемых научных журналах, хорошо известны в научном обществе, имеют высокую цитируемость, и неоднократно **апробировались** на международных научных конференциях, совещаниях и семинарах. Содержание диссертации соответствует опубликованным работам. Автореферат в целом верно отражает содержание диссертации.

Диссертация написана довольно кратком, но ясном стиле. Небольшими недостатками диссертации можно считать местами фрагментарное изложение, частое употребление научного жаргона, некритичное использование как переведенных так и непереведенных терминов (“penalty factor” вместо “фактор подавления”, “midrapidity” вместо “центральная быстрота”, “термальный” вместо “термодинамический” и т. п.), неудачное обозначение для поперечной массы m_t вместо, например, m_T и слишком краткое обсуждение методологии и методики исследований работы в автореферате. Несмотря на довольно тщательное оформление, все же имеются опечатки: например, “процедура” вместо “процедуры” на стр. 16, часто используется термин “плато” в неправильном английском написании “Plato” на стр. 126, 176, 177 (в автореферате на стр. 38,39), означающем знаменитого древнегреческого философа, вместо “plateau” и т. п.). Но все эти отмеченные выше недостатки ни в какой мере, конечно, не меняют общей высокой положительной оценки диссертации.

Диссертационная работа Колесникова Вадима Ивановича «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», выполнена на высоком научном уровне, соответствует специальности 01.04.16 – «Физика атомного ядра и элементарных частиц» и отвечает всем требованиям положения о порядке присуждения ученых степеней, а ее автор Колесников Вадим Иванович безусловно заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук.



17 октября 2017 г.

Ким Виктор Тимофеевич
доктор физико-математических наук
заместитель руководителя Отделения физики высоких энергий
Петербургский институт ядерной физики имени Б.П. Константинова
Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»

Адрес: НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ
д. 1, Орлова роща, г. Гатчина Ленинградской обл., 188300
Тел. (81371) 46722
e-mail: kim_vt@pmpi.nrcki.ru

Подпись руки

Ким

ЗАВЕРЯЮ:

Нач. отдела кадров

17. 10. 2017

Зиновьева А.Н.

