

На правах рукописи



ПЕРЕСУНЬКО Дмитрий Юрьевич

**СПЕКТРЫ И КОРРЕЛЯЦИИ ПРЯМЫХ ФОТОНОВ
В СТОЛКНОВЕНИЯХ УЛЬТРАРЕЛЯТИВИСТСКИХ
ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ**

1.3.15. – Физика атомных ядер и элементарных частиц,
физика высоких энергий

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Москва – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном учреждении «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт»), г. Москва

Официальные оппоненты:

Лубсандаржиев Баярто Константинович – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Отдела экспериментальной физики лаборатории гамма-астрономии и реакторных нейтрино Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт ядерных исследований Российской академии наук, г. Москва.

Захаров Бронислав Глебович – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Института теоретической физики им. Л.Д. Ландау Российской академии наук, г. Черноголовка.

Баранов Сергей Павлович – доктор физико-математических наук, высококвалифицированный главный научный сотрудник Физического института имени П.Н. Лебедева Российской академии наук, г. Москва.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет»

Защита состоится 24 декабря 2025 г., начало в 15:00 часов на заседании диссертационного совета 02.1.003.05 в НИЦ «Курчатовский институт» по адресу: Москва, 123182, пл. Академика Курчатова, дом 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЦ «Курчатовский институт» и на сайте <http://nrcki.ru>.

Автореферат разослан " ____ " _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 02.1.003.05
доктор физико-математических наук

Б.р.Ск

А.Л. Барабанов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Исследование свойств сильно-взаимодействующей материи, образующейся в столкновениях тяжелых ионов сверхвысоких энергий, является одной из наиболее быстро развивающихся областей современной физики частиц. Решеточные расчеты КХД и модельные оценки предсказывают, что при превышении плотности энергии величины ~ 1 ГэВ/фм³ адронная материя переходит в новую форму, состоящую из квазисвободных кварков и глюонов, находящихся в состоянии деконфайнмента – кварк-глюонную материю. Необходимая плотность энергии может быть достигнута в столкновениях ядер сверхвысоких энергий, что позволяет экспериментально исследовать наличие и порядок фазового перехода от адронной к кварк-глюонной материи и свойства обеих фаз.

Экспериментальное изучение свойств горячей материи проводится на различных ускорителях уже более 40 лет, начиная с запуска тяжелоионной программы на ускорителе SPS в Европейской организации ядерных исследований (ЦЕРН), затем – на коллайдере RHIC в Брукхейвенской национальной лаборатории и на Большом адронном коллайдере (БАК) в ЦЕРН. В рамках тяжелоионной программы на ускорителе SPS изучались столкновения ядер при энергиях до $\sqrt{s_{NN}} = 17.2$ ГэВ. Ряд экспериментов на этом ускорителе получили результаты, указывающие на создание новой формы материи в таких столкновениях. Исследования были продолжены на коллайдере RHIC, где были достигнуты энергии $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ. Спустя 4 года после запуска этого коллайдера все четыре эксперимента на RHIC – PHENIX, STAR, BRAHMS и PHOBOS – опубликовали статьи, где подтверждалось возникновение новой формы материи в таких столкновениях. Данные, полученные экспериментами ALICE, ATLAS и CMS на БАК, при энергиях $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ и 5.02 ТэВ также подтвердили образование кварк-глюонной материи.

В столкновениях ядер сверхвысоких энергий высокая плотность энергии достигается на короткое время, затем горячая материя расширяется, остывает, переходит в обычную адронную материю и распадается на конечные адроны. Несмотря на то, что конечные адроны рождаются на последней стадии эволюции системы, они позволяют косвенно восстановить характеристики материи в горячей фазе столкновения, например, с помощью оценки величины коллективных потоков, оценки доли распавшихся кваркониев, величины потери энергии жестким партоном, проходящим сквозь горячую материю. Фотонные наблюдаемые позволяют существенно расширить доступную информацию. Длина свободного пробега фотона в горячей материи, образующейся в таких столкновениях, много больше ее характерных размеров. Поэтому родившись, такие *прямые* фотоны будут вылетать без перерассеяния и доносить до детектора информацию о всех стадиях столкновения: прямые фотоны позволяют оценить максимальную температуру, достигнутую в столкновении и проследить развитие коллективных потоков. Бозе-Эйнштейновские корреляции прямых фотонов позволяют оценить пространственно-временные размеры горячей области.

Описание рождения прямых фотонов в ядро-ядерных (АА) столкновениях подразумевает вычисление эволюции горячей материи и пока невозможно из первых принципов. Для этого используются гидродинамические или транспортные модели. Постоянное увеличение количества и качества экспериментальных результатов позволяет постепенно уточнять описание эволюции горячей материи и сужать диапазон возможных моделей и уточнять параметры горячей кварк-глюонной материи.

Измерение выходов и корреляций прямых фотонов – одна из наиболее сложных экспериментальных задач. Это связано с тем, что прямые фотоны составляют всего несколько процентов от общего выхода фотонов. Поэтому в таких измерениях большое внимание уделяется уменьшению систематических погрешностей, в частности, развиваются методы, позволяющие избежать необходимость моделирования отклика детектора на

различные адроны: известно, что стандартные методы Монте-Карло моделирования отклика калориметра на адроны сравнительно плохо описывают данные.

Практическая и теоретическая ценность работы

В диссертации, используя экспериментально измеренные спектры прямых фотонов, получены оценки максимальной температуры горячей материи, достигнутой в АА столкновениях при энергии ускорителя SPS, коллайдеров RHIC и БАК, получена теоретическая неопределенность этих оценок. Получены предсказания для спектров и коллективных потоков прямых фотонов в АА столкновениях при энергии коллайдера NICA, что позволит расширить физическую программу эксперимента MPD, планируемого на этом коллайдере. Теоретически обоснована возможность разделения Бозе-Эйнштейновских корреляций прямых и распадных фотонов, что позволило экспериментам WA98 и ALICE провести измерение корреляционных параметров.

В диссертации представлены результаты измерения спектра и величины коллективного потока прямых фотонов в столкновениях Pb–Pb при энергии БАК. Эти результаты уникальны, поскольку позволяют уточнить параметры теоретических моделей, описывающих эволюцию горячей материи в ядро-ядерном столкновении, и подтверждают наличие “загадки коллективного потока прямых фотонов”, впервые обнаруженной при энергии RHIC.

Детальное описание методов работы с высокосегментированным электромагнитным калориметром, определено, будет полезно физикам-экспериментаторам. Диссертация детально описывает методы отбора данных, калибровки, идентификации фотонов, что может быть полезно для будущих экспериментов, включающих фотонные наблюдаемые, начиная с измерения параметров прямых фотонов и заканчивая регистрацией электромагнитных распадов адронов. Материалы, представленные в диссертации предоставят основу для сравнения качества идентификации фотонов в будущих экспериментах.

Цель работы

Цель работы заключается в теоретическом и экспериментальном исследовании свойств горячей кварк-глюонной материи, образующейся в столкновениях ультрарелятивистских ядер, с помощью прямых фотонов.

Прямые фотоны были предложены Файнбергом в 1976 г. как один из перспективных сигналов образования кварк-глюонной плазмы. После публикации экспериментом WA98 в 2000 г. первых экспериментальных результатов по рождению прямых фотонов в ядро-ядерных столкновениях (столкновения Pb–Pb при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 17.2$ ГэВ) был предпринят ряд теоретических попыток описать полученный спектр и извлечь информацию о свойствах материи на начальной стадии столкновения. Эти попытки показали, что результат существенно зависит от предположений о деталях эволюции горячей материи: различные вычисления приводили к оценкам максимальной начальной температуры, достигнутой в столкновении, отличающимся в несколько раз. Начальные наивные ожидания, что наклон спектра прямых фотонов будет равен максимальной температуре в столкновении не оправдались: значительное радиальное расширение горячей кварк-глюонной материи приводит к тому, что вклады поздних холодных, но быстро расширяющихся элементарных объемов горячей материи оказываются сравнимыми с вкладом максимально горячей области. В результате последующего теоретического анализа стало ясно, что для получения надежных оценок необходимо, чтобы модель эволюции воспроизводила как можно больше доступных адронных наблюдаемых, характеризующих горячий сгусток материи (“файербол”) на конечном этапе столкновения: спектры различных адронов, величины коллективных потоков и их зависимость от центральности столкновения.

Исследование корреляций прямых фотонов позволит получить больше информации об эволюции горячей материи. Так как прямые фотоны излучаются на всех стадиях столкновения, они позволяют исследовать на его ранних стадиях возникно-

вление коллективного потока. При этом величина измеренного коллективного потока прямых фотонов примерно совпадает с величиной потока конечных адронов, но заметно превышает теоретические оценки. Эта загадка до сих пор не решена. Бозе-Эйнштейновские корреляции прямых фотонов позволяют изучать эволюцию пространственно-временных размеров горячей материи. Потенциально, это очень мощный инструмент исследования, но до сих пор находящийся в зачаточном состоянии. Одна из существенных трудностей в этом направлении заключается в том, что прямые фотоны составляют лишь несколько процентов от полного числа фотонов, и возможные корреляции распадных фотонов могут полностью замаскировать корреляции прямых фотонов. Мы выполнили теоретический анализ основных вкладов в корреляции распадных фотонов и показали, что они принципиально отличаются по форме от Бозе-Эйнштейновских корреляций прямых фотонов и могут быть отделены от них.

Эксперимент ALICE на БАК предназначен для всестороннего изучения ядро-ядерных столкновений при сверхвысоких энергиях. Эта установка, в частности, включает в себя прецизионный электромагнитный калориметр PHOS, основной задачей которого является измерение спектров и корреляций прямых фотонов. На примере анализа данных, полученных с помощью этого детектора, мы предложили ряд методов, позволяющих значительно уменьшить неопределенности в экспериментальном измерении прямых фотонов. В диссертации предложен ряд экспериментальных методов и подходов, позволяющих уменьшить неопределенности, связанные с Монте-Карло моделированием отклика детектора на адроны и фотоны.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Оценка максимальной температуры ($T_{\text{in}} \sim 200 - 230$ МэВ), достигнутой в центральных столкновениях Pb-Pb при энергии SPS, $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 17.2$ ГэВ.

2. Оценка максимальной температуры ($T_{\text{in}} \sim 600$ МэВ), достигнутой в центральных столкновениях Au–Au при энергии RHIC, $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 200$ ГэВ.
3. Метод оценки числа эффективных степеней свободы в уравнении состояния горячей материи с помощью корреляции множественности конечных адронов и максимальной температуры файерболла, оцененной с помощью прямых фотонов.
4. Установлено, что максимальный параметр хаотичности в случае Бозе-Эйнштейновских корреляций фотонов равен $1/2$ и не зависит от их импульсов.
5. Показано, что Бозе-Эйнштейновские корреляции прямых фотонов могут быть разделены с остаточными корреляциями распадных фотонов.
6. Обнаружен уникальный для фотонов эффект уменьшения силы корреляции при усреднении многомерной Бозе-Эйнштейновской корреляционной функции до одномерной и установлено соотношение между параметрами этих корреляционных функций.
7. Предсказаны значения параметров Бозе-Эйнштейновской корреляционной функции прямых фотонов в столкновениях Pb–Pb при энергии SPS и Au–Au при энергии RHIC.
8. Спектр прямых фотонов, измеренный в столкновениях Pb–Pb при энергии $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 2.76$ ТэВ.
9. Величина коллективного потока прямых фотонов в столкновениях Pb–Pb при энергии $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 2.76$ ТэВ.

Научная новизна

На основе анализа спектров прямых фотонов получена оценка максимальной температуры, достигнутой в АА столкнове-

ниях при энергиях ускорителя SPS и коллайдера RHIC, и сделаны предсказания для энергий коллайдера БАК и коллайдера NICA.

Впервые было показано, что корреляция между наклоном спектра прямых фотонов и начальной температурой сохраняется после интегрирования по всему времени эволюции горячей материи, и она может быть использована для оценки числа эффективных степеней свободы и обнаружения фазового перехода в горячей материи.

Впервые методом внутренней конверсии измерен спектр прямых фотонов в области мягких поперечных импульсов ($p_T < 3$ ГэВ/с) в столкновениях d–Au при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ.

Впервые измерены спектры прямых фотонов в столкновениях Pb–Pb при энергии БАК, в частности, при $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ ТэВ, и обнаружен избыток термальных прямых фотонов также и при энергиях БАК.

Впервые измерена величина коллективного потока прямых фотонов в столкновениях Pb–Pb при энергиях БАК, в частности, $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ ТэВ, и подтверждено, что, как и при энергии RHIC, эта величина близка к величине коллективного потока распадных фотонов.

Личный вклад автора

Автору принадлежит ведущая роль в разработке модели гидродинамической эволюции горячей материи для вычисления спектра и корреляций прямых термальных фотонов. Автор внес определяющий вклад в совместные работы с D. d’Enterria и F. Arleo и Д. Блау. Статьи, посвященные теоретическому анализу Бозе-Эйнштейновских корреляций прямых фотонов написаны без соавторов.

Автор лично анализировал данные, набранные экспериментом PHENIX в сеансе RHIC 2003 г. по d–Au столкновениям при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ, и получил предварительные оценки выхода прямых фотонов в этих столкновениях.

Автор диссертации был одним из основных разработчиков

системы программного обеспечения по моделированию, реконструкции и анализу данных фотонного спектрометра PHOS и вето-детектора заряженных частиц CPV эксперимента ALICE на Большом адронном коллайдере. Эта работа была проведена в 2000-2007 гг. совместно с коллегами из НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ, Лаборатории Субатех (Нант, Франция) и ЦЕРН (Женева, Швейцария). Автор лично участвовал в калибровке детектора PHOS по данным, набранным фотонным спектрометром PHOS с протонными пучками. Автор участвовал в анализе данных, набранных в первом сеансе БАК 2010-2013 гг. в Pb–Pb столкновениях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ ТэВ, был включен коллаборацией в состав основных авторов, готовящих результаты измерений для публикаций. В список экспериментальных статей, в которых опубликованы результаты диссертации, включены только те работы, в которые автор сделал ключевой вклад.

Апробация диссертации

Результаты, приведенные в диссертации, докладывались на семинарах НИЦ «Курчатовский институт», внутриколлаборационных совещаниях экспериментов ALICE, PHENIX и MPD, а также на международных конференциях: серии Кварковая Материя: 17-я Международная конференция по столкновениям ультрарелятивистских ионов Quark Matter 2004, Окленд, Калифорния, США, 2004 г.; 19-я Международная конференция по столкновениям ультрарелятивистских ионов Quark Matter 2006, Шанхай, Китай; 23-я Международная конференция по столкновениям ультрарелятивистских ионов Quark Matter 2012, Вашингтон, США, 2012 г.; Quark Matter 2015 — 25-я Международная конференция по ультрарелятивистским ядро-ядерным столкновениям, Кобе, 2015 г.; серии Hard Probes: Вторая международная конференция по жестким и электромагнитным пробам в столкновениях ядер высоких энергий Hard Probes 2006, Асиломар, Калифорния, США, 2006 г.; 4-я Международная конференция по жестким и электромагнитным пробам в столкнове-

ниях ядер высоких энергий Hard Probes 2010, Эйлат, Израиль, 2010 г.; 9-я Международная конференция по жёстким и электромагнитным пробам ядерных в столкновениях ядер высоких Hard Probes 2018, Экс-ле-Бен, Франция; 12-я Международная конференция по жестким и электромагнитным пробам ядерных в столкновениях ядер высоких Hard Probes 2022, Нагасаки, Япония; Первом совещании по корреляциям и фемтоскопии WPCF 2005, Кромерж, Чешская Республика, 2005 г., Европейской конференции по физике высоких энергий EPS-HEP 2005, Лиссабон, Португалия 2005 г., Четвертом совещании по физике больших p_T на БАК НРТ 2009, Прага, Чешская Республика, 2009 г., 30-м Международном совещании по физике высоких энергий IHEP 2014, Протвино, 2014 г., XX Международном семинаре по физике высоких энергий Quarks-2018, Валдай, Россия, 2018 г.; LXXII Международной конференции “Ядро-2022: Фундаментальные вопросы и приложения”, Москва, Россия.

Публикации

Вошедшие в диссертацию результаты опубликованы в 16 работах: [1–16]

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, 3 глав, заключения и списка литературы (500 наименований). Объем диссертации составляет 267 страниц. Диссертация включает 211 рисунков и 10 таблиц. Работа выполнена в Курчатовском ядерно-физическом комплексе Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» в соответствии с планом научных работ лабораторий.

Содержание диссертации

Глава 1. Введение. В главе дан краткий обзор экспериментальных результатов, полученных в столкновениях ультрарелятивистских тяжелых ионов, установленных свойств кварк-глюонной материи, обсуждаются преимущества прямых фотонов, ставятся цели диссертации, дается оценка практической ценности и научной новизны полученных результатов, формулируются основные положения, выносимые на защиту.

Глава 2. Теоретический анализ рождения прямых фотонов в pp , pA и AA столкновениях. В этой главе описываются методы теоретического описания рождения прямых фотонов в pp , pA , AA столкновениях и представляются предсказания для спектров прямых фотонов в AA столкновениях при разных энергиях, а также величине коллективных потоков и параметров Бозе-Эйнштейновских корреляций.

В параграфе 2.1 приводится классификация прямых фотонов в соответствии с процессами, приводящими к их рождению, и обсуждается величина относительного вклада каждого процесса в разных диапазонах p_T .

В параграфе 2.2 обсуждаются методы вычисления спектров быстрых прямых фотонов в pp , pA и AA столкновениях в рамках КХД и феноменологические параметризации. Рассматривается влияние модификации структурных функций нуклона в ядре на спектр быстрых прямых фотонов.

В параграфе 2.3 приводятся современные оценки скорости излучения термальных прямых фотонов адронным газом и кварк-глюонной плазмой.

В параграфе 2.4 формулируется гидродинамическая модель эволюции горячей материи, использованная нами для вычисления спектра прямых фотонов в AA столкновениях [1–3]. Модель использует Бьеркеновскую параметризацию продольного расширения и радиально-симметричное расширение в поперечном направлении. Для численного решения уравнений гидродинамики используется предиктор-корректорный Эйлеровский

алгоритм второго порядка точности по пространственному и временному шагу. Гидродинамическая эволюция начинается в момент времени τ_0 , который является модельным параметром и зависит от энергии столкновения. Начальное время выбирается, как правило, близким ко времени прохождения Лоренц-сжатых сталкивающихся ядер друг сквозь друга:

$$\tau_0 = \frac{4 \cdot 1.13 \cdot A^{1/3}}{\gamma} = 4 \cdot 1.13 \cdot A^{1/3} \frac{m}{\sqrt{s}}. \quad (1)$$

Начальные условия в момент τ_0 задаются в соответствии с Глауберовской моделью, причем распределение начальной плотности энтропии $s(r)$ предполагается пропорциональным сумме числа нуклонов-участников (N_{part}) и бинарных нуклон-нуклонных столкновений (N_{coll}):

$$s(r) = C \cdot (0.25 \cdot N_{\text{part}}(r) + 0.75 \cdot N_{\text{coll}}(r)), \quad (2)$$

где C – коэффициент, подбираемый так, чтобы воспроизводить множественность конечных адронов для какого-либо класса центральности. Эта модель позволяет описать зависимость множественности конечных адронов от центральности [6].

Уравнения гидродинамики должны быть дополнены уравнением состояния $p(\varepsilon, n)$. В модели эволюции используются три различные уравнения состояния: (а) газа адронных резонансов без фазового перехода; (b) уравнение состояние с фазовым переходом первого рода; (с) параметризация решеточных вычислений с плавным переходом.

Гидродинамическая модель также должна быть дополнена сопоставлением полученных распределений плотности энергии, скоростей и т.д. со спектрами конечных частиц (процедура замораживания). В модели применяется последовательное замораживание тех элементарных объемов на поверхности фибрбола, температура в которых опустилась ниже критической T_{therm} . Для таких объемов окончательные дифференциальные адронные спектры получаются посредством подхода Купера-Фрая:

$$E \frac{d^N}{dp^3} = \int_{\sigma} f(\bar{E}(u(x), x), T(u(x), x)) p^{\mu} d\sigma_{\mu}, \quad (3)$$

где σ_μ – элемент гиперповерхности, ограничивающей элементарный объем, в котором происходит замораживание, распределение f – равновесное Бозе-Эйнштейновское или Ферми-Дираковское распределение в системе покоя, а $\bar{E}$ – энергия частицы в системе покоя. В модели предполагается прекращение реакций в адронном газе, меняющих относительные выходы частиц (химическое замораживание), при температуре $T_{\text{chem}} \sim 150$ МэВ. Для температур выше T_{chem} в адронном газе сохраняются токи барионов, странности и электрического заряда, но не числа частиц, в то время как для температур ниже T_{chem} сохраняется число частиц, путем ввода индивидуальных (температурно-зависимых) химических потенциалов для каждого типа частиц. После термодинамического замораживания короткоживущие резонансы распадаются в соответствии с их возможными каналами распадов.

В главе 2.5 представлены результаты, полученные с помощью гидродинамической модели, – спектры прямых фотонов, вычисленные для различных энергий столкновения, доступных или планируемых на ускорителях FAIR, NICA, SPS, RHIC, БАК.

В параграфе 2.5.1 сделаны предсказания для ядро-ядерных столкновений при энергиях строящихся ускорителей NICA и FAIR. Для них пока не существует экспериментальных данных по множественности и спектрам конечных адронов, поэтому для выбора значений параметров модели использовались интерполяции имеющихся данных. В рамках нашей модели мы вычислили спектры конечных адронов, распадных и прямых фотонов. Также для сравнения были вычислены спектры прямых фотонов, используя трехмерную гидродинамическую модель, входящую в пакет UrQMD. Была оценена доля прямых фотонов в АА столкновениях при энергии NICA. Результаты были опубликованы в работе [16].

В параграфе 2.5.2 оценены выходы прямых фотонов в столкновениях Pb–Pb при энергиях SPS: 158 ГэВ/нуклон или $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 17.2$ ГэВ. Для описания эволюции горячей материи ис-

пользована 2+1-мерная Бьеркеновская гидродинамическая модель, описанная выше, с несколькими уравнениями состояния. Для выбора начальных параметров модели использовалась минимизация отличия предсказанных и измеренных спектров π , K, p, Λ , Σ адронов.

Чтобы оценить значение начальной температуры T_{in} , использовался спектр прямых фотонов, измеренный коллаборацией WA98, который сравнивался с суммой вкладов быстрых и термальных прямых фотонов в нашей модели для трех значений начальной температуры. Наилучшее согласие с экспериментальными данными достигается при следующих значениях начальной температуры: $T_{\text{in}} = 230^{+60}_{-30}$ МэВ. Значению $T_{\text{in}} = 230$ МэВ соответствует параметр качества $\chi^2_{\pi}/NDF = 3.7$ для воспроизведения пионного спектра и $\chi^2_{\gamma}/NDF = 0.67$ для фотонного. В случае уравнения состояния с фазовым переходом первого рода оптимальный набор параметров оказывается: $T_{\text{in}} = 200^{+40}_{-20}$ МэВ ($\chi^2_{\pi}/NDF = 3.3$, и $\chi^2_{\gamma}/NDF = 0.8$), что означает короткую фазу чистой КГП и более продолжительную смешанную фазу. Результаты этого анализа, проведенного в коллаборации с Ю.Е. Покровским опубликованы в работах [2, 3].

В параграфе 2.5.3 представлены предсказания нашей модели для столкновений Au–Au при энергии $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 200$ ГэВ (коллайдер RHIC). Аналогично энергиям SPS, начальные условия нашей модели были зафиксированы с помощью спектров конечных адронов: π , K, p, однако в этом случае использовалась Глауберовская модель для описания зависимости от центральности. Благодаря учету вклада жестких процессов в добавок к гидродинамической модели удалось одновременно воспроизвести спектры адронов с различными массами в большом диапазоне поперечных импульсов и их зависимость от центральности.

Так же как и в случае адронов, спектр прямых фотонов в столкновениях Au–Au с прицельным параметром b получается сложением вклада жестких процессов и термальных прямых фотонов. Полученные спектры прямых фотонов в центральных (слева) и периферических (справа) столкновениях Au–Au

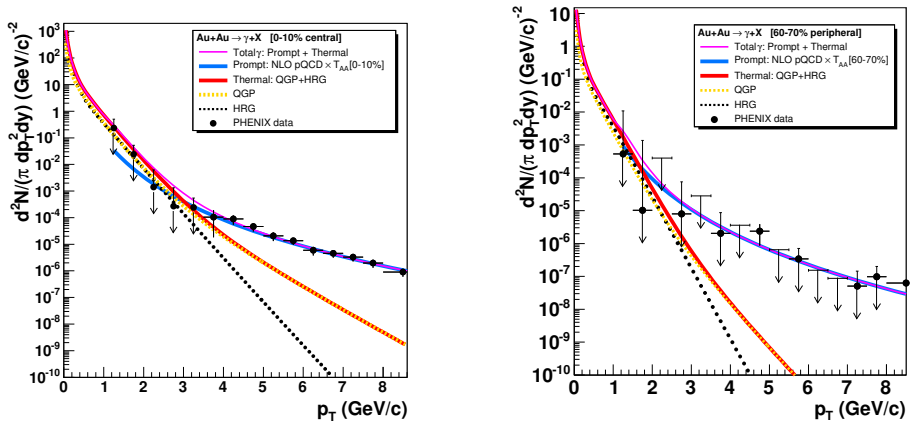


Рис. 1: Спектры прямых фотонов в 0-10% классе центральных (слева) и 60-70% классе периферических (справа) столкновений Au-Au при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ, вычисленные в рамках нашей модели, и спектр, измеренный в эксперименте PHENIX. Отдельно показаны вклады КПП, адронного газа и быстрых прямых фотонов.

при $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ в сравнении с результатами эксперимента PHENIX показаны на рис. 1. Также отдельно показаны вклады быстрых фотонов и термальных прямых фотонов из КПП и адронного газа. В центральных столкновениях вклад термальных прямых фотонов оказывается больше, чем быстрых прямых фотонов при поперечных импульсах вплоть до $p_T \approx 3$ ГэВ/с. В периферических столкновениях в спектре прямых фотонов доминируют быстрые прямые фотоны. В обоих случаях термальное излучение адронного газа превалирует только при малых p_T . Полный выход прямых фотонов оказывается в хорошем согласии с экспериментальными данными, хотя в случае центральных столкновений при $p_T \lesssim 4$ ГэВ/с наши вычисления стремятся к верхней границе погрешностей измерений. Этот анализ был выполнен в коллаборации с D. d'Enterria и опубликован в статье [6].

В параграфе 2.5.4 представлены предсказания выхода пря-

мых фотонов и адронов в столкновениях Pb–Pb при энергии $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 5.5$ ТэВ (коллайдер БАК). Мы оценили спектры пионов, каонов и (анти)протонов, рожденных в области центральных быстрот. Параметры гидродинамической модели подбираются так, чтобы воспроизвести множественности адронов, полученные экстраполяцией измерений при энергии RHIC:

$$dN/d\eta/(0.5 N_{\text{part}}) \approx 0.75 \ln(\sqrt{s_{\text{NN}}}/1.5).$$

При поперечных импульсах выше $p_{\text{T}} \approx 3$ ГэВ/с учитывался вклад фрагментации (мини)струй. Этот вклад вычислялся в рамках коллинеарно факторизованных сечений во втором порядке пертурбативной КХД. Мы использовали последние на тот момент функции распределения и функции фрагментации (FF), модифицированные так, чтобы учитывать эффект затенения и потери энергии в конечном состоянии.

В конце параграфа показано сравнение предсказаний с результатами измерения спектров адронов и прямых фотонов коллаборацией ALICE. Результаты, представленные в данном параграфе, получены в коллаборации с F.Arleo и D.d’Enterria и опубликованы в статьях [11, 12].

В параграфе 2.5.5 рассматривается возможность оценки начальной максимальной температуры, достигнутой в ядро-ядерном столкновении, по спектру прямых фотонов. Благодаря слабому взаимодействию с горячей материей, фотоны, рожденные в горячей материи, свободно вылетают из горячей области без перерассеяния. Однако учитывая, что конечный спектр прямых фотонов – это сумма вкладов элементарных объемов с различными температурами и коллективными потоками, связь между наклоном суммарного спектра и начальной температурой неочевидна. Мы обнаружили, что хотя упомянутые эффекты и размывают корреляцию между видимой и начальной температурами, они не полностью ее разрушают. Чем более высокие p_{T} мы исследуем, тем ближе оказывается T_{eff} к начальной температуре T_0 . С другой стороны, локальные наклоны спектров фотонов при $p_{\text{T}} \approx 1$ ГэВ/с и ниже имеют почти постоянные

значения $T_{eff} \sim 200$ МэВ (численно близкие к температуре фазового перехода T_{crit}) для всех центральностей, и практически не зависят от начальной температуры системы. Этот анализ был выполнен в коллаборации с D. d’Enterria и опубликован в статье [6].

В параграфе 2.5.6 обсуждается возможность построения уравнения состояния горячей материи непосредственно по экспериментальным данным, рассматривая корреляции наклона спектра прямых фотонов T_{eff} с экспериментальными наблюдаемыми, связанными с плотностью энергии или плотностью энтропии системы. Предполагая изоэнтропическое расширение горячей материи, можно оценить *начальную* плотность энтропии s в момент излучения термальных фотонов по полной *конечной* множественности частиц dN/du , измеренной в столкновении. Изменяя центральность столкновения, можно исследовать форму зависимости $s = s(T)$ в первые мгновения столкновения, извлечь соответствующее уравнение состояния горячей материи и, возможно, обнаружить сигнал фазового перехода. Число эффективных степеней свободы определяется как

$$g(s, T) = \frac{\pi^2}{4\zeta(4)} \frac{s}{T^3} (\hbar c)^3 = \frac{45}{2\pi^2} \frac{s}{T^3} (\hbar c)^3, \quad (4)$$

где $\zeta(n)$ – зета-функция Римана ($\zeta(4) = \pi^4/90$), что совпадает с вырожденностью идеального газа безмассовых частиц. На рис. 2 показано сравнение числа истинных степеней свободы и оцененных по множественности конечных адронов. В случае расчета с фазовым переходом g_{eff} остается постоянной на уровне ожидаемой вырожденности g_{hydro} практически для всех максимальных температур, достижимых в различных классах центральности столкновений Au-Au при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ. Это указывает на то, что при максимальных энергиях RHIC для большинства прицельных параметров T_0 оказывается выше критической температуры T_{crit} и наиболее горячая часть файерболла находится в фазе КГП. Ожидаемый спад в g_{hydro} , связанный с фазовым переходом в адронную фазу, появляется

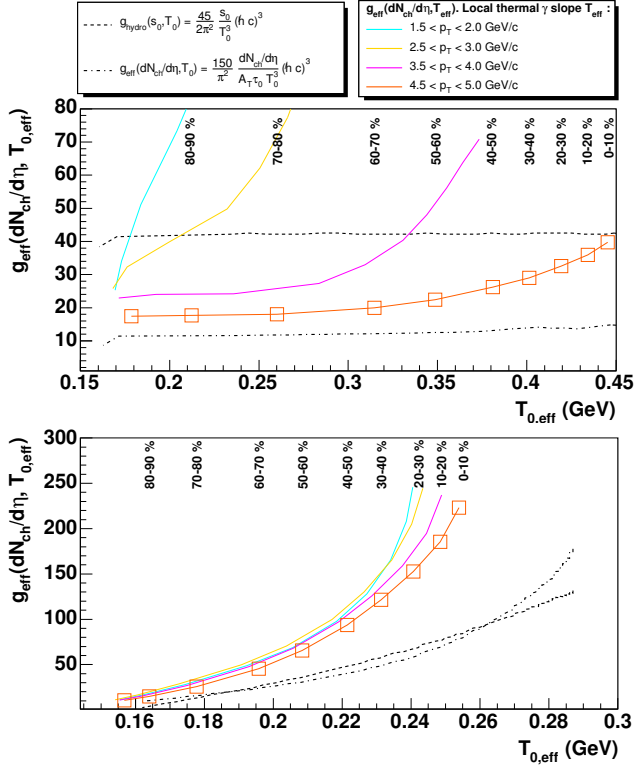


Рис. 2: Число эффективных степеней свободы, оцененное в нашей модели с уравнением состояния с фазовым переходом (сверху) и с чисто адронным уравнением состояния (снизу) в зависимости от начальной температуры (T_0) или эффективного наклона термальных прямых фотонов (T_{eff}) для различных классов центральности столкновений Au-Au при энергии $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 200$ ГэВ. Для иллюстрации, на кривой $4.4 < p_T < 5$ ГэВ/с показано пустыми квадратами примерное положение различных классов центральности столкновений Au-Au.

(возможно) только в наиболее периферических столкновениях (с $T_0 \approx T_c$). В этом смысле, прямое свидетельство о наличии фазового перехода будет, возможно, получено в столкновениях при меньшей энергии. Этот анализ был выполнен в коллаборации с D. d'Enterria и опубликован в статье [6].

В параграфе 2.6 представлены предсказания коллективного потока прямых фотонов в столкновениях при энергии коллайдера NICA. Они сделаны с использованием гидродинамического режима модели UrQMD и скоростей излучения фотонов, описанных выше. Рассмотрены потоки и их флуктуации от события к событию. Результаты получены совместно с Д. Блау и опубликованы в статьях [15, 16].

В параграфе 2.7 обсуждаются Бозе-Эйнштейновские корреляции прямых фотонов. Интенсивностная интерферометрия показала себя мощным инструментом исследования пространственно-временных размеров факела. В основном, эти измерения включали в себя адронные корреляции, чувствительные к размерам факела в момент его распада на конечные адроны. Корреляции прямых фотонов содержат принципиально другую информацию: в отличие от адронов, прямые фотоны излучаются на всех стадиях столкновения и отражают размеры горячей зоны столкновения. С другой стороны, фотонная интерферометрия встречается со значительными трудностями по сравнению с адронной, связанными с малым выходом прямых фотонов и большим фоном распадных фотонов. В случае высокой множественности ядро-ядерных столкновений невозможно отделить прямые и распадные фотоны в каждом событии и построить корреляции только прямых фотонов. В этом параграфе было показано, как отделить корреляции прямых фотонов от распадных, рассматривая корреляции *всех* фотонов в событии. Кроме того делаются предсказания для АА столкновений при энергии SPS и RHIC. Результаты опубликованы в работе [4].

В параграфе 2.7.1 выводятся формулы для построения трехмерной двухфотонной корреляционной функции исходя из Вигнеровской плотности вероятности излучения фотона, обсуждается величина параметра хаотичности (силы корреляции) λ и его независимость от импульсов фотонов. Наконец, выводится связь между одномерной и трехмерной корреляционными функциями.

В параграфе 2.7.2 показывается, что в случае ядро-ядер-

ных столкновений с высокой множественностью корреляционная функция содержит вклад корреляций прямых фотонов, в то время как корреляции между распадными фотонами и распадными и прямыми имеют настолько малую ширину, что практически не наблюдаемы. Этот результат позволяет измерять корреляции прямых фотонов в АА столкновениях, что было использовано в работах [5, 10].

В параграфе 2.8.3 рассматривается вклад остаточных корреляций распадных фотонов в двухфотонную корреляционную функцию. Показано, что вклад распадов Бозе-Эйнштейновски скоррелированных пионов имеет специфический вид: при малых относительных импульсов $q_{inv} \lesssim 50$ МэВ/с корреляционная функция остается постоянной, приводя к волно-подобной форме, радикально отличающейся от исходной пионной корреляционной функции.

В параграфе 2.7.4 обсуждаются предсказания параметров двухфотонных корреляций в столкновениях Pb–Pb при энергии SPS, $\sqrt{s_{NN}} = 17.2$ ГэВ. Сравнивая корреляционные радиусы, вычисленные в случае двух различных уравнений состояния, мы обнаружили, что они оказываются весьма схожими. Это противоречит идее, что в случае фазового перехода первого рода система расширяется медленнее и живет дольше, что увеличивает корреляционные радиусы. Благодаря учету вкладов тяжелых резонансов вырожденность адронного газа при температуре фазового перехода $g_{hadr} \approx 25$, что сравнимо с вырожденностью КГП, $g_{QGP} = 42$. В результате смешанная фаза оказывается короткой и ее влияние на полное время эволюции весьма ограниченным. Представлено сравнение с результатами эксперимента WA98.

В параграфе 2.7.5 обсуждаются предсказания параметров двухфотонных корреляций в столкновениях Au–Au при энергии RHIC, $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ.

В параграфе 2.7.6 сравниваются наши предсказания корреляционных радиусов с предсказаниями других моделей.

Глава 3. Экспериментальное измерение спектров и корреляций прямых фотонов.

В параграфе 3.1 измерение спектра прямых фотонов в столкновении Pb–Pb при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ ТэВ, выполненное в рамках эксперимента ALICE и опубликованного в [13].

В параграфе 3.1.1 пишется структура эксперимента ALICE и детально описывается прецизионный фотонный спектрометр PHOS, его структура и характеристики.

В параграфе 3.1.2 описывается метод оценки стабильности работы детектора, разбиения полного периода сбора данных на подпериоды, в которых детектор работал стабильно, но анализ данных в которых должен проводиться отдельно. Предложены методы оценки систематических неопределенностей, связанных с нестабильностью работы детектора.

В параграфе 3.1.3 обсуждается метод построения карты плохих каналов для калориметра. Предложен алгоритм и количественные критерии, позволяющие построить карту плохих каналов. Показано, как оцениваются систематические неопределенности, связанные с процедурой построения карты плохих каналов и ее качеством.

В параграфе 3.1.4 обсуждается одна из наиболее важных неопределенностей в случае электромагнитного калориметра – пространственное выравнивание и связанная с ним абсолютная калибровка энергетической шкалы. Показано, что измерение положения калориметра с помощью фотограмметрии не дает необходимой точности и необходимо уточнение с помощью экстраполяции треков. Предложен новый метод, позволяющий оценить с помощью треков не только тривиальные и неопасные сдвиги поперек радиуса, но и сдвиг вдоль радиуса, который и приводит к ошибке в абсолютной калибровке.

В параграфе 3.1.5 рассматриваются различные методы калибровки электромагнитного калориметра in-situ: по положению пионного пика и по положению электронного пика в отношении E/p . Обсуждаются недостатки и достоинства каждого метода и оценивается систематическая неопределенность

в определении абсолютной энергетической калибровки.

В параграфе 3.1.6 предлагается метод оценки нелинейности калориметра *in situ* с помощью зависимости положения пионного пика от поперечного импульса пиона. На примере данных pp столкновений при энергии $\sqrt{s} = 7$ ТэВ получена оценка нелинейности PHOS и связанная с ней систематическая неопределенность.

В параграфе 3.1.7 предлагается ряд идентификационных критериев для отбора фотонов [9]. Критерии основываются на форме электромагнитного ливня и на нейтральности кластера. В параграфе показано, как получить критерии отбора фотонов, используя исключительно параметризацию экспериментальных данных. Исключение использования Монте-Карло моделирования позволило уменьшить систематические неопределенности.

В параграфе 3.1.8 обсуждаются методы вычисления эффективности регистрации фотонов в электромагнитном калориметре. Рассматривается несколько методов: метод наложения, минимизирующий необходимое Монте-Карло моделирование, метод полного Монте-Карло моделирования и метод анфолдинга. Показано согласие эффективностей, вычисленных различными методами, в пределах статистической неопределенности. В конце этого параграфа предложен метод оценки эффективности фотонных идентификационных критериев по реальным данным. Показано хорошее согласие идентификационных эффективностей, оцененных по данным и с помощью Монте-Карло моделирования.

В параграфе 3.1.9 описано, как была получена оценка загрязнения фотонного спектра в случае различных идентификационных критериев. В начале получена оценка загрязнения с помощью Монте-Карло моделирования. Однако из-за того, что отклик электромагнитного калориметра на адроны сравнительно плохо моделируется, был предложен метод оценки загрязнения фотонного спектра, основанный полностью на реальных данных. Данный метод дает величину загрязнения фотонного спектра, сравнимую с результатом полного Монте-Карло моде-

лирования, а разница между ними дает оценку систематических неопределенностей, связанных с оценкой загрязнения фотонного спектра.

В параграфе 3.1.10 описывается оценка неопределенностей, связанных с различием в описании материала детектора в Монте-Карло моделировании и реальности, приводящая к различию в вероятности фотонной конверсии. Показан метод оценки точности описания с помощью сравнения выходов нейтральных пионов с включенным и выключенным магнитным полем.

В параграфе 3.1.11 описывается вычисление спектра распадных фотонов на основе спектров нейтральных пионов и заряженных адронов, измеренных в тех же столкновениях. Оцениваются систематические неопределенности.

В параграфе 3.1.12 суммируются все систематические неопределенности в измерении спектров инклюзивных и распадных фотонов.

В параграфе 3.1.13 приводится спектр прямых фотонов, полученный с помощью калориметра PHOS.

В параграфе 3.2 кратко описывается альтернативный метод регистрации фотонов с помощью реконструкции e^+e^- пары в случае конверсии фотона на материале детектора – метод внешней конверсии. Этот метод был использован Гейдельбергской группой эксперимента ALICE для получения спектра прямых фотонов в тех же столкновениях другим методом. Также мы описываем усреднение нашего результата и спектра, полученного методом внешней конверсии для получения конечного результата. Конечный спектр показан на рис. 3. При больших p_T спектр определяется вкладом быстрых фотонов, при малых $p_T < 3$ ГэВ/с имеется вклад термальных прямых фотонов, который удовлетворительно описывается гидродинамическими и транспортными моделями.

В параграфе 3.3 описывается получение спектра прямых фотонов в столкновении d-Au при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ методом внутренней конверсии. Этот анализ был выполнен авто-

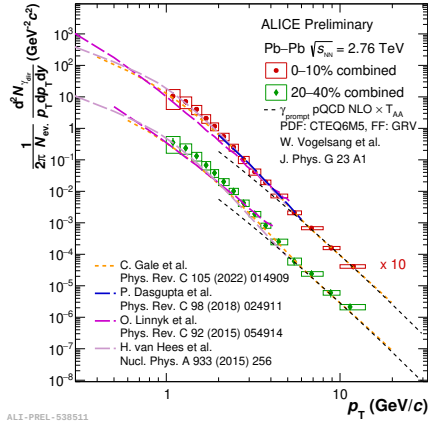


Рис. 3: Спектры прямых фотонов, измеренные в столкновениях Pb-Pb при $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ ТэВ, для двух классов центральности: 0-10% (умноженные на 10) и 20-40% в сравнении с ожидаемым выходом быстрых прямых фотонов и предсказаниями гидродинамических и транспортных моделей.

ром в рамках эксперимента PHENIX и опубликован в работе [7].

В параграфе 3.3.1 описывается экспериментальная установка PHENIX.

В параграфе 3.3.2 описывается отбор электронных треков, оптимизация идентификационных критериев по экспериментальным данным.

В параграфе 3.3.3 обсуждается вычисления спектра инвариантных масс e^+e^- пар и вычисление вклада комбинаторного фона в этом спектре и способы его нормировки.

В параграфе 3.3.4 обсуждается проведение Монте-Карло моделирование и параметризация отклика детектора для воспроизведения реальных данных.

В параграфе 3.3.5 обсуждается параметризация спектра инвариантных масс e^+e^- пар и его разложение на вклады от распадов мезонов и прямых фотонов.

В параграфе 3.3.6 обсуждается оценка систематических неопределенностей и сравнение нашего результата со спектром

прямых фотонов, полученным статистическим методом.

В главе 3.4 описывается измерение величины коллективного потока прямых фотонов в столкновении Pb–Pb при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ ТэВ. Этот анализ был выполнен автором в рамках эксперимента ALICE и опубликован в [14].

В параграфе 3.4.1 описывается первый из примененных методов измерения потока инклюзивных фотонов – метод плоскости реакции. Описываются методы калибровки детекторов, определяющих плоскость реакции.

В параграфе 3.4.2 описывается альтернативный метод измерения величины потока инклюзивных фотонов – метод скалярного произведения. Также описывается процедура калибровки детекторов, определяющих плоскость реакции в этом методе.

В параграфе 3.4.3 сравниваются величины коллективного потока инклюзивных фотонов, полученные двумя методами.

В параграфе 3.4.4 описывается вычисление поправок к величине коллективного потока, связанного с зависимостью эффективности реконструкции и эффективности идентификации фотона от множественности и, следовательно, угла до плоскости события. Также вычисляется влияние конечного энергетического разрешения калориметра.

В параграфе 3.4.5 вычисляется величина коллективного потока распадных фотонов. Для этого используются измеренные спектры адронов и измеренные величины коллективных потоков адронов.

В параграфе 3.4.6 производится оценка величины систематических неопределенностей и их классификация по степени корреляции с поперечным импульсом.

В главе 3.5 описывается вычисление величины коллективного потока прямых фотонов. Для этого используется величина коллективного потока инклюзивных фотонов, вычисленная автором и аналогичная величина, вычисленная с помощью метода внешней конверсии Гейдельбергской группой эксперимента ALICE и проводится вычисление среднего с учетом сте-

пени скоррелированности систематических неопределенностей. Затем вычисляется величина потока прямых фотонов, см. рис. 4. Полученная величина коллективного потока прямых фотонов оказывается близка к величине распадных фотонов и заметно превышает теоретические предсказания.

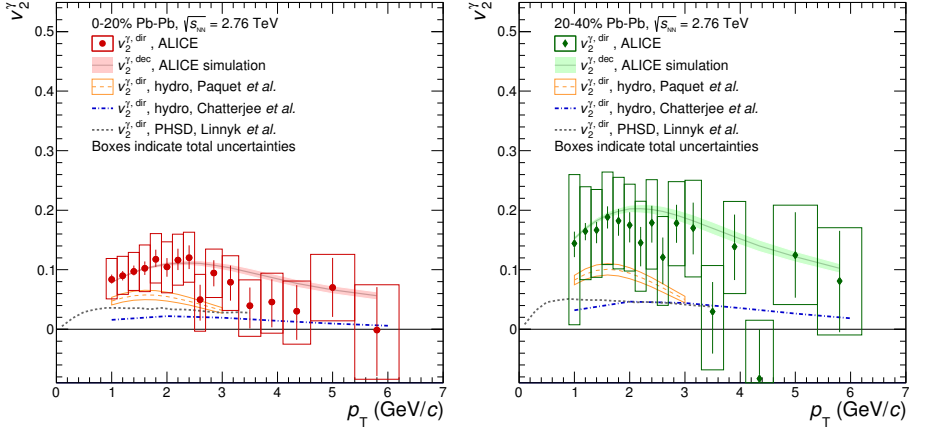


Рис. 4: Эллиптический поток прямых фотонов в сравнении с модельными расчётами в классах центральности 0–20% (слева) и 20–40% (справа).

В главе 4 приводятся сравнения экспериментальных данных и предсказаний различных моделей.

В параграфе 4.1 обсуждаются результаты эксперимента WA98, измерившего спектр прямых фотонов в столкновениях Pb–Pb при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 17.2$ ГэВ, и предсказания различных моделей. Показано, что измеренный спектр невозможно описать без учета вклада термальных прямых фотонов. Рассматриваются различные гидродинамические и транспортные модели, сравниваются детали описания эволюции и качество описания данных.

В параграфе 4.2 обсуждаются первые результаты эксперимента PHENIX, измерившего спектр и величину коллективного потока прямых фотонов в столкновениях Au–Au при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ. Обсуждаются результаты различных моделей, и

попытки разрешить загадку неожиданно большого потока прямых фотонов в этих столкновениях.

В параграфе 4.3 обсуждаются результаты эксперимента ALICE, измерившего спектр и величину коллективного потока прямых фотонов в столкновениях Pb–Pb при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ и 5.02 ТэВ. Обсуждается согласие с теоретическими предсказаниями для этой энергии.

В параграфе 4.4 рассматривается зависимость полного (p_T -интегрированного) выхода прямых фотонов от множественности заряженных частиц. Все доступные экспериментальные результаты суммированы на одном рисунке, показывает зависимость типа $dN_{\gamma, \text{dir}}/dy \propto (dN_{\text{ch}}/d\eta)^\alpha$ с показателем $\alpha \sim 1.2$, что соответствует термальному излучению горячей материи.

В заключении суммируются результаты и повторяются положения, выносимые на защиту.

Результаты, вошедшие в диссертацию, опубликованы в работах

- [1] Peresunko D. Yu., Pokrovsky Yu. E., Mukhanova T. V. Quasidirect photons and the diagnostics of quark - gluon plasma // Phys. Atom. Nucl. — 1995. — Vol. 58. — P. 1450–1452. — [Yad. Fiz. 58, 1534 (1995)].
- [2] Peressouanko D. Yu., Pokrovsky Yu. E. Direct hadron production in ultrarelativistic heavy ion collisions // Nucl. Phys. — 1997. — Vol. A624. — P. 738–754. — hep-ph/9704386.
- [3] Peressouanko D. Yu., Pokrovsky Yu. E. Photon emission in Pb + Pb collisions at SpS and LHC // Nucl. Phys. — 2000. — Vol. A669. — P. 196–218. — hep-ph/9906325.
- [4] Peressouanko D. Hanbury Brown-Twiss interferometry of direct photons in heavy ion collisions // Phys. Rev. — 2003. — Vol. C67. — P. 014905.

- [5] Aggarwal M. M., ..., Peresunko D. et al. Interferometry of direct photons in central Pb-208+Pb-208 collisions at 158-A-GeV // Phys. Rev. Lett. — 2004. — Vol. 93. — P. 022301. — nucl-ex/0310022.
- [6] d’Enterria D. G., Peressounko D. Probing the QCD equation of state with thermal photons in nucleus-nucleus collisions at RHIC // Eur.Phys.J. — 2006. — Vol. C46. — P. 451–464. — nucl-th/0503054.
- [7] Peressounko D. Direct photon production in p^+p and d^+ Au collisions measured with the PHENIX experiment // Nucl. Phys. — 2007. — Vol. A783. — P. 577–582. — hep-ex/0609037.
- [8] Peressounko D. Direct photons at low $p(T)$ measured in PHENIX // J. Phys. — 2007. — Vol. G34. — P. S869–872. — nucl-ex/0702025.
- [9] Conesa G., Peresunko D., Ippolitov M. et al. Direct photon detection in Pb Pb collisions in the ALICE experiment at LHC // Nucl. Phys. — 2007. — Vol. A782. — P. 356–361.
- [10] Peressounko D. Bose-Einstein correlations of direct photons in Au + Au collisions at $s(NN)^{1/2} = 200$ -GeV // Int. J. Mod. Phys. — 2007. — Vol. E16. — P. 2235–2240. — 0704.0852.
- [11] Arleo F., d’Enterria D. G., Peressounko D. Direct photon spectra in Pb - Pb at $s(NN)^{1/2} = 5.5$ -TeV: hydrodynamics + pQCD predictions // J. Phys. G. — 2008. — Vol. 35, no. 5. — P. 054001.146. — 0707.2357.
- [12] Arleo F., d’Enterria D. G., Peressounko D. Identified hadron spectra in Pb-Pb at $s(NN)^{1/2} = 5.5$ -TeV: Hydrodynamics + pQCD predictions // J. Phys. G. — 2008. — Vol. 35, no. 5. — P. 054001.11. — 0707.2356.
- [13] Adam J., ..., Peresunko D. et al. Direct photon production in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV // Phys. Lett. — 2016. — Vol. B754. — P. 235–248. — 1509.07324.
- [14] Acharya S., ..., Peresunko D. et al. Direct photon elliptic flow in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV // Phys. Lett. B. — 2019. — Vol. 789. — P. 308–322. — 1805.04403.

- [15] Blau D., Peresunko D. Direct Photon Production in Heavy-Ion Collisions at NICA Energies // Phys. Part. Nucl. — 2021. — Vol. 52, no. 4. — P. 681–685.
- [16] Blau Dmitry, Peresunko Dmitri. Direct Photon Production in Heavy-Ion Collisions: Theory and Experiment // Particles. — 2023. — Vol. 6, no. 1. — P. 173–187.