



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
JOINT INSTITUTE FOR NUCLEAR RESEARCH

Дубна, Московская область, Россия 141980 Dubna Moscow Region Russia 141980  
Telefax: (7-495) 632-78-80 Tel.: (7-49621) 65-059 AT: 205493 WOLNA RU E-mail: post@jinr.ru http://www.jinr.ru

15 МАР 2018

№ 100-25/71

на № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

УТВЕРЖДАЮ

Вице-директор Объединенного  
института ядерных исследований,  
доктор физ.-мат. наук

Р. Ледниcki

» \_\_\_\_\_ 2018 г.



ОТЗЫВ

**ведущей организации** — Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ), г. Дубна на диссертационную работу Харлова Юрия Витальевича «Изучение образования нейтральных мезонов в протон-протонных столкновениях в эксперименте ALICE», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.23 – физика высоких энергий

Диссертационная работа является результатом исследований инклюзивного рождения нейтральных легких мезонов,  $p^0$  и  $h$ , в протон-протонных столкновениях на ускорителе БАК (Большой Адронный Коллайдер, Large Hadron Collider, LHC) в эксперименте ALICE. Измерения дифференциальных сечений образования мезонов в области центральных быстрот были проведены при различных энергиях столкновения протонов (900 ГэВ, 7 и 8 ТэВ) в широком диапазоне поперечных импульсов  $p^0$  и  $h$  мезонов. В работе проведено сравнение измеренных сечений рождения мезонов с теоретическими расчетами на основе квантовой хромодинамики (КХД), что позволяет продвинуться в понимании достигнутой в расчетах точности и кинематической области их применимости для описания данных процессов.

Измерение характеристик образования идентифицированных адронов — таких, как сечения инклюзивного образования, относительные выходы адронов различных ароматов, корреляции и т. п., — во взаимодействии протонов или ионов в новом диапазоне энергий столкновений является важной задачей экспериментов на БАК с целью определения или уточнения параметров пертурбативной КХД, что определяет **актуальность** представленных в диссертации результатов. Точность теоретических вычислений ограничена неопределенностями используемых структурных функций сталкивающихся адронов и функций фрагментации партонов конечного состояния. Параметризации функций фрагментации, определяемые на основе существующих экспериментальных данных, не обладают достаточной предсказательностью вне пределов уже изученной области. Вследствие этого, точные измерения спектров легких мезонов и фотонов от их распадов, в частности, актуальны при изучении редких процессов, которые являются основной целью проводимых на БАК экспериментов. Измерение процессов образования прямых фотонов является важной составляющей программы физических исследований как протон-протонных столкновений (с

точки зрения изучения структурных функций), так и взаимодействий ионов свинца (исследование свойств горячей и плотной ядерной материи), а фотоны от распадов нейтральных  $p^0$  и  $h$  мезонов являются одним из значимых источников фона для данных измерений.

Диссертационная работа представляет несомненную **практическую ценность** как с точки зрения развития теории, так и для развития технологий детекторов фотонов. Безусловно, представленные в работе опубликованные результаты будут востребованы при построении моделей взаимодействия элементарных частиц, при уточнении параметризаций структурных функций партонов в протоне и ядре и параметризации функций фрагментации партонов. Конструкция электромагнитного калориметра на основе сцинтиллирующих кристаллов и пластиковых сцинтилляторов, система мониторинга калориметров, триггерная система, описанные в диссертации, найдут применение при проведении последующих экспериментов в области физики высоких энергий. Практическую значимость представляют также и методы реконструкции данных с электромагнитных калориметров, идентификации фотонов и нейтральных мезонов и анализа данных.

Представленные в работе дифференциальные сечения рождения  $p^0$  и  $h$  мезонов измерены в наиболее широком диапазоне поперечных импульсов, когда-либо достигнутом в экспериментах, и превосходят своей точностью теоретические неопределенности вычислений, что уже использовано для уточнения параметризации функций фрагментации, а также для определения моделей, наилучшим образом описывающих спектры нейтральных мезонов, рожденных в протон-протонных столкновениях в широком диапазоне энергий протонов от 900 ГэВ до 8 ТэВ. Таким образом, полученные **новые** экспериментальные данные способствуют обновлению как теоретических вычислений, так и уточнению используемых в физике частиц моделей.

**Достоверность** полученных результатов несомненна — результаты прошли экспертизу в рамках коллаборации ALICE, докладывались на конференциях и опубликованы ведущими научными изданиями. Достоверность результатов также подтверждается методами измерений и подходами к оценкам систематических погрешностей, которые являются стандартными в анализе данных электромагнитных калориметров.

Диссертационная работа состоит из введения, шести глав и заключения и содержит 195 страниц, 65 рисунков, 20 таблиц и списка 176 цитируемых работ.

**Введение** диссертационной работы исчерпывающе описывает основные проблемы исследования сильных взаимодействий в столкновениях протонов и тяжелых ионов, равно как и основные измеряемые. Акцент делается на необходимость измерения спектров идентифицированных адронов в протонных столкновениях для уточнения теоретических параметров КХД и функций фрагментации партонов в легкие мезоны.

**Первая глава** представляет теоретические аспекты вычислений спектров адронов во взаимодействиях протонов в рамках КХД. Особо отмечается недостаточность предсказательной силы моделей — 'настроив' модели на экспериментальные данные при некоторой энергии столкновения протонов, не удастся удовлетворительно описать данные при более высоких энергиях теми же параметрами модели. Основной причиной является тот факт, что теоретическое описание процессов взаимодействий с образованием частиц с поперечными импульсами более нескольких ГэВ (называемых 'жесткими' процессами) базируется на знании функций распределения партонов и функции фрагментации, которые требуют уточнения при переходе к вычислениям при все больших энергиях сталкивающихся частиц. 'Жесткие' процессы вычисляемы в рамках теории возмущений (пертурбативной) КХД в отличие от процессов, приводящих к рождению частиц с меньшими поперечными импульсами, описание которых возможно лишь в рамках феноменологических моделей, использующих результаты предыдущих измерений спектров. В данной главе приведены основные положения мотивации исследований взаимодействий тяжелых ионов, в которых адронная материя переходит в

состояние деконфайнмента партонов, в которой образующиеся адроны теряют энергию, что непременно приводит к модификации выходов адронов с высокими поперечными импульсами.

Содержание **второй главы** полностью сосредоточено на экспериментальных аспектах и приведено подробное описание:

— наборов данных, используемых для измерений сечений рождения  $p^0$  и  $h$  мезонов. Экспериментальные данные были записаны в разных условиях триггерования событий (минимальные условия на триггер при энергиях взаимодействий 900 ГэВ, 7 и 8 ТэВ, в набор данных при энергии 8 ТэВ обогатены при высоких поперечных импульсах триггером на фотоны высоких энергий в фотонном спектрометре PHOS), что снижает систематические неопределенности проведенного измерения;

— детекторов эксперимента установка ALICE;

— основных для проведенных измерений детекторов: электромагнитного калориметра EMCAL (для изучения процессов подавления рожденных струй) и фотонного спектрометра PHOS (для регистрации фотонов с малыми поперечными импульсами), в создание и эксплуатацию систем триггерования и мониторингования которого автор диссертации внес заметный вклад;

— центральной трековой системы ALICE: внутренней трековой системы (Inner Tracking System, ITS) и время-проекционной камеры (Time Projection Chamber, TPC). Для целей данной работы трековая система была использована для реконструкции конвертировавшихся в электрон-позитронные пары фотонов;

— триггерных детекторов ALICE, как отбирающих события с минимальным взаимодействием пучковых частиц, так и селектировавших события с фотонами больших энергий в детекторе PHOS.

**Третья глава** содержит детальное обсуждение методики изготовления и использования прецизионных электромагнитных калориметров сэмпингового типа для прецизионных измерений фотонов в экспериментах в области физики высоких энергий. В этой главе делаются выводы о применимости калориметров с высоким энергетическим разрешением, изготовленных с применением различных технологий, к измерениям фотонов в экспериментах в физике высоких энергий.

**Четвертая глава** описывает методы моделирования и реконструкции данных фотонного спектрометра PHOS и приводится сравнение тестовых данных PHOS с результатами моделирования. Обсуждаются методы идентификации фотонов и нейтральных мезонов в различных кинематических областях.

В **пятой главе** приведены основные результаты ALICE (плотность заряженных частиц, корреляций тождественных бозонов в  $pp$  и  $Pb-Pb$  столкновений), полученные с данных первых сеансов БАК в сравнении с результатами других коллайдеров при меньших энергиях с акцентом на важность изучения рождения адронов и зависимости их выходов от энергии столкновения.

**Шестая глава** содержит три подраздела, представляющих результаты диссертационной работы по измерению образования легких нейтральных мезонов:

— дифференциальных сечений инклюзивного образования  $p^0$  и  $h$  мезонов в  $pp$  столкновениях при энергиях 900 ГэВ и 7 ТэВ и их сравнение с вычислениями пертурбативной КХД в высших порядках теории возмущений;

— дифференциальных сечений инклюзивного образования  $p^0$  и  $h$  мезонов в  $pp$  столкновениях при энергии 8 ТэВ. Данные были проанализированы, в частности, новым методом с регистрацией одного фотона в EMCal, а второй был восстановлен ITS, будучи конвертированным. Систематическое сравнение спектров  $p^0$  и  $h$  мезонов в  $pp$  столкновениях при различных энергиях столкновений демонстрирует универсальность отношения  $h/p^0$ , не зависящего от энергии столкновений, а также отклонение от  $m_T$  скейлинга в области малых  $p_T$ .

Показано, что новый набор функций фрагментации DSS14, полученный систематизацией последних результатов измерений на БАК, удовлетворительно описывает дифференциальные сечения образования  $p^0$  мезонов при всех энергиях столкновения;

— односпиновой асимметрии  $h$  мезонов во взаимодействиях поляризованных протонов/антипротонов с импульсом 200 ГэВ с неполяризованной протонной мишенью в эксперименте E704 в ФермиЛабе. Методы реконструкции фотонов были аналогичны применяемы в эксперименте ALICE. Проведены сравнения этих измерений односпиновой асимметрии с более поздними измерениями, проведенными экспериментами на коллайдере RHIC при более высоких энергиях, а также с теоретическими расчетами. На основании этих сравнений делается вывод о сохранении спиновых эффектов с ростом энергии, а также о значимости спин-зависимой фрагментации партонов в односпиновых асимметриях.

**Заключение** диссертационной работы суммирует основные результаты диссертации.

Диссертационная работа была представлена Харловым Ю.В. на общелабораторном семинаре Лаборатории физики высоких энергий им. В.И.Векслера и А.М.Балдина (ЛФВЭ) ОИЯИ 2-го марта 2018 года.

Диссертационная работа соответствует специальности 01.04.23 – физика высоких энергий, а текст автореферата полностью отражает ее содержание.

Диссертация Ю. В. Харлова «Изучение образования нейтральных мезонов в протон-протонных столкновениях в эксперименте ALICE» отвечает всем требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней» ВАК РФ, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ему степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.23 – физика высоких энергий.

Отзыв на диссертацию рассмотрен и одобрен научно-техническим советом ЛФВЭ  
02 марта 2018 г., протокол № 3.

Председатель НТС ЛФВЭ ОИЯИ,  
д.ф.-м.н., профессор



Ю.А. Панебратцев

Ученый секретарь НТС ЛФВЭ ОИЯИ  
к.ф.-м.н.



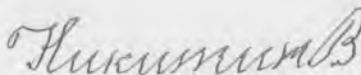
С.П. Мерц

Отзыв составил д.ф.-м.н.,  
ведущий научный сотрудник ЛФВЭ ОИЯИ



В.Н. Поздняков

Руководитель общелабораторного  
семинара ЛФВЭ ОИЯИ



В.А. Никитин