

ОТЗЫВ официального оппонента
на диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-
математических наук Образцова Степана Владимировича
на тему: «Характеристики адронных струй в релятивистских
соударениях протонов и тяжелых ионов в эксперименте CMS на LHC»
по специальности 1.3.15. Физика атомных ядер и элементарных частиц,
физика высоких энергий.

Диссертация С.В. Образцова посвящена экспериментальному и теоретическому исследованию характеристик адронных струй в релятивистских протон-протонных и ион-ионных соударениях. Диссертационная работа основана на результатах исследований в рамках эксперимента Компактный мюонный соленоид (CMS) на Большом Адронном Коллайдере (LHC), выполненных в Европейской Организации Ядерных Исследований (ЦЕРН, Женева) и Лаборатории Сильных Взаимодействий Отдела экспериментальной физики высоких энергий НИИЯФ МГУ.

Актуальность темы диссертации

Основной задачей экспериментов являлось исследование характеристик адронных струй, что представляется одним из наиболее эффективных методов изучения свойств сильновзаимодействующей материи, в том числе кварк-глюонной плазмы, образующейся при столкновении тяжелых ионов при энергиях Большого Адронного Коллайдера (LHC). Основным методом изучения свойств адронных струй в физике тяжелых ионов является сравнение их характеристик с характеристиками адронных струй, рожденных в pp-соударениях. Поэтому все экспериментальные методы разрабатывались в первую очередь для изучения адронных струй в pp-соударениях. Подобные исследования в pp-столкновениях и в столкновениях тяжелых ионов включены как в действующую, так и в будущую программу крупнейших экспериментов физики высокой энергии (ALICE, CMS, ATLAS, STAR). Как в pp- физике, так и в физике тяжелых ионов вопросы реконструкции и

коррекции энергии струй являются актуальными. Эксперименты на ускорителе LHC дают возможность анализировать формы струй при гораздо более высоких поперечных импульсах струи. Одной из проблем современной экспериментальной физики тяжелых ионов является недостаток физических наблюдаемых, которые могли бы дать принципиально новую информацию о процессах, происходящих в кварк - глюонной плазме. Автор ставит перед собой и решает задачу разработки новой методики, которая может позволить получить новый тип наблюдаемых для изучения свойств сильно взаимодействующей материи в соударениях тяжелых ионов на ускорителе LHC. Автором разработана методика разделения кварковых и глюонных струй в соударениях тяжелых ионов. Автор принимал активное участие в анализе формы струй в соударениях протонов, а также в работе по реконструкции и коррекции энергии струй. Результаты измерения формы адронных струй и реконструкции адронных струй в соударениях протонов многократно обсуждались в рамках группы, специализирующейся на физике струй. Результаты исследования возможности разделения кварковых и глюонных струй в соударениях тяжелых ионов успешно прошли процесс рецензирования, а также многократно обсуждались с экспертами из нескольких экспериментов в ЦЕРНе.

Актуальным также является вопрос характеристик детектора, а именно вопрос быстрого старения материалов детектора в результате радиационных повреждений. Теория данного вопроса недостаточно разработана и не подходит для оценки радиационной стойкости сцинтилляторов. Единственным решением в данном случае является экспериментальная оценка полученных радиационных повреждений. Экспериментальные результаты по данной теме могут быть крайне важными при разработке детекторов в будущем.

Все результаты, вынесенные на защиту, получены автором лично или при его определяющем участии. Автор принимал активное участие в наборе данных эксперимента CMS и данных, используемых для начальной

калибровки и оценки радиационных повреждений сцинтилляторов торцевого адронного калориметра. При его участии была введена в эксплуатацию система перемещения радиоактивного источника, были набраны и проанализированы данные, в результате чего была получена оценка радиационных повреждений. Результаты измерений радиационных повреждений торцевого адронного калориметра с помощью радиоактивного источника ^{60}Co подтверждаются результатами измерений радиационных повреждений адронного калориметра, полученных методом калибровки лазером.

Объем и структура диссертационной работы

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения. Полный объем диссертации составляет 138 страниц текста, включая 53 рисунка и 4 таблицы. Список используемой литературы содержит 85 библиографических ссылок.

Содержание диссертации

В начале **введения** представлено содержание каждой из глав диссертации, упоминаются ключевые публикации автора по теме работ. Во **введении** убедительно показана актуальность выбранной темы, развернуто и подробно представлены задачи диссертационного исследования, показывается научная новизна, теоретическая значимость и практическая ценность результатов исследования, достоверность полученных результатов, представлена информация об апробации работы и отмечен личный вклад автора. Приведен список публикаций, положенных в основу диссертации.

В **первой главе** представлено введение в физику адронных струй как в случае pp-соударений, так и в случае столкновений тяжелых ионов. Приводится определение адронной струи, история её открытия и методы вычисления сечения рождения струй с помощью теоремы факторизации КХД. После этого дается понятие кварк-глюонной плазмы (КГП) и способы её изучения с помощью адронных струй с подробным описанием природы

энергетических потерь партонов в КГП. Описаны основные характеристики Монте-Карло генераторов, используемых в диссертации.

Во **второй главе** рассмотрены вопросы проведения эксперимента на установке CMS. Описаны подсистемы детектора: магнитный соленоид, трековая система, электромагнитный и адронный калориметры, мюонные системы, а также дано описание триггеров первого уровня (L1) и триггера высокого уровня (HLT).

В **третьей главе** представлено исследование по начальной калибровке и оценке радиационных повреждений Торцевого Адронного Калориметра с помощью радиоактивного источника ^{60}Co . Описаны механизмы радиационных потерь в сцинтилляторах и устройство системы калибровки радиоактивным источником ^{60}Co . Основным результатом данной главы является измерение радиационных повреждений Торцевого Адронного Калориметра. Показана степенная зависимость повреждений от мощности дозы.

В **четвертой главе** описывается реконструкция адронных струй и коррекция энергии струй в протон-протонных и Pb-Pb соударениях. В работе используются pp-соударения при энергии $\sqrt{s} = 8$ ТэВ (с интегральной светимостью в 19.8 фб⁻¹) и соударения ионов свинца при энергии $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 5.02$ ТэВ (с интегральной светимостью 1.7 нб⁻¹.) Коррекция энергии струи проводится с помощью Монте-Карло эффектов. Первый этап заключается в учете с помощью Монте-Карло эффектов, связанных с порогом регистрации для ячеек калориметров и с вкладом от наложения событий (пайлап). На втором этапе проводится коррекция абсолютной энергетической шкалы с использованием распределений из Монте-Карло. На третьем этапе учитывается оставшаяся разница между откликами детектора на струю в данных и Монте-Карло событиях. На четвертом этапе определяется дополнительная коррекция по p_T для данных с использованием событий $Z + \text{струя}$ или $\gamma + \text{струя}$ методом баланса поперечных импульсов.

Методика получения коррекций для струй в соударениях ионов свинца в целом повторяет аналогичную процедуру в протон-протонных соударениях, однако в таких соударениях нет пайлапа, статистика существенно меньше. С целью исключить влияние эффекта гашения струй на коррекции, используются только периферические соударения с центральностью 50-90%. Дополнительные коррекции вычислялись с помощью двух-струйных событий и событий фотон + струя. После проведения всех этапов коррекции для струй в pp-соударениях, вычислялось энергетическое разрешение струй путем анализа многоструйных событий, используя метод баланса поперечного импульса двух струй.

В **пятой главе** представлено исследование формы адронных струй в соударениях протонов при энергии $\sqrt{s} = 7$ ТэВ, что соответствует интегральной светимости 36пб^{-1} . Для сравнения с данными CMS используются данные Монте-Карло моделирования, произведенные с помощью Монте-Карло генераторов HERWIG++ и PYTHIA 6.409. Выбраны переменные, которые используются для описания формы струй: множественность заряженных треков в струе, второй центральный момент.

Вычислялась эффективность реконструкции треков. Полученные данные как функции p_T струи в двух диапазонах по быстрой струи сравнивались с предсказаниями для кварковых и глюонных струй. Данные находятся в хорошем согласии с гипотезой, что доля кварк-индуцированных струй увеличивается с ростом p_T и быстроты струи.

В **шестой главе** представлено изучение кварковых и глюонных струй в соударениях тяжелых ионов. Для разделения струй, инициируемых легкими кварками (u,d,s) от глюонных струй в протон-протонных взаимодействиях используется ряд наблюдаемых, характеризующих форму струи, множественность частиц в струе, разработаны соответствующие методики на основе машинного обучения. В соударениях тяжелых ионов существуют дополнительные сложности, связанные с фоном от мягкой компоненты, зависимостью переменных от центральности события и от эффектов

прохождения струй через кварк-глюонную плазму. Для разделения кварковых и глюонных струй с использованием методов машинного обучения были подобраны переменные, которые принимают разные значения для кварковых и глюонных струй. Проведено вычитание фоновой компоненты. Помимо переменных, используемых в протон-протонных соударениях, дополнительно были включены ширина и заряд струи. Данные переменные принимают разные значения для кварковых и глюонных струй во всем диапазоне по центральности соударений, что позволяет их использовать в машинном обучении для идентификации кварковых и глюонных струй.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы.

Научная новизна работы

1. Впервые получена полная коррекция энергии адронных струй в соударениях протонов при энергии $\sqrt{s} = 8$ ТэВ для адронных струй, реконструированных алгоритмом Jet-Plus-Track.
2. Впервые исследована форма адронных струй в соударениях протонов при энергии $\sqrt{s} = 7$ ТэВ.
3. Впервые получена оценка радиационных повреждений торцевого адронного калориметра CMS с помощью радиоактивного источника ^{60}Co .
4. Впервые продемонстрирована возможность разделения кварковых и глюонных струй в соударениях тяжелых ионов.

Научная новизна полученных результатов не вызывают сомнений.

Достоверность полученных в диссертации научных результатов

Основные результаты диссертации приведены в 4 публикациях автора, индексируемых в базах данных Scopus, WoS, RSCI. Работы обсуждались на

внутренних совещаниях коллаборации CMS, а также были представлены автором в России как на Ломоносовских чтениях, так на международных совещаниях и конференциях.

Достоверность основных выводов диссертации обеспечена высоким уровнем и статистической обеспеченностью экспериментальных данных, полученных на установке CMS, использованием стандартного программного обеспечения CMS, проведением полного моделирования методом Монте-Карло и использованием различных генераторов событий.

Практическая значимость работы

Следует особо отметить научно-практическую значимость данной работы. Практическая значимость данной работы связана с вкладом в экспериментальные методы, применимые для исследований адронных струй в p - p соударениях и соударениях тяжелых ионов. Изучение зависимости повреждения сцинтиллятора от дозы и мощности дозы излучения представляет интерес для теории радиационных повреждений. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании будущих детекторов. Важное значение имеет разработка струйного алгоритма Jet-Plus-Track, как альтернативного варианта для дополнительной проверки основного алгоритма, используемого в коллаборации CMS. Разработанные методы могут быть использованы для идентификации кварковых и глюонных струй в соударениях тяжелых ионов в эксперименте CMS.

Теоретическая значимость работы заключается в получении новой информации о струях в pp -соударениях, которая позволяет уточнить модели, описывающие струи.

Замечания по диссертационной работе

1. Как и в любом другом большом тексте, в диссертации можно найти неточности в пунктуации, опечатки в тексте, ссылки на рисунки в

тексте. На стр. 23 «Эволюция светового конуса этого процесса показана на 1.4» вместо «Эволюция светового конуса этого процесса показана на Рис.1.4». Аналогичные ошибки есть на стр. 71 «см. 4.3» и «см. 4.4» вместо «см. Рис.4.3» и «см. Рис. 4.4». На стр. 100 в подписи к Рис. 5.11 «Также показаны предсказания на основе PYTHIA6 с настройкой D6T (пунктирная линия) и настройкой Z2 (сплошная линия) и Herwig++ (пунктирная линия).» вместо «D6T (точечная линия)».

2. Не всегда выверенные подписи к рисункам. На стр. 98 «Рис. 5.9: Средняя множественность заряженных частиц N_{ch} как функция p_T струи для струй для диапазона по быстрой $0 < |y| < 1$ (вверху) и $|y| < 2$ (внизу). Также показаны предсказания на основе PYTHIA6 с настройкой D6T (пунктирная линия)» вместо «Рис. 5.9: Средняя множественность заряженных частиц N_{ch} как функция p_T струи для струй для диапазона по быстрой $0 < |y| < 1$ (слева) и $1 < |y| < 2$ (справа). Также показаны предсказания на основе PYTHIA6 с настройкой D6T (точечная линия)»
3. Следует отметить ряд неточностей при описании результатов. На стр.53 «Также амплитуда сигналов относительно одинакова (амплитуда сигнала пропорциональна размеру тайла). Это не понятно, скорее наоборот пропорционально размеру. Или это относится к толщине тайлов? На стр. 55 отмечено, что амплитуда сигналов зависит от времени жизни источника. От времени жизни источника должна зависеть частота или заряд. На стр.56 отмечено, значения $\langle \mu \rangle$ несколько ниже, но в целом схожи с результатами лазерной калибровки. Но в работе не описана лазерная система калибровки и нет никаких ссылок на публикацию.

На стр.78 написано, что «Для струй используются Монте-Карло события Z-бозон + струя. Сравнения Монте-Карло событий с данными осуществляется на Монте-Карло событиях с процессом Дрелл-Янн

отдельно для лидирующей и сублидирующей струи. Наблюдаемая разница лежит в диапазоне 5-10%». Где показана эта разница?

4. Использование жаргонных терминов.

5. Несколько устаревший список цитируемой литературы,

Эти замечания нисколько не уменьшают общую, безусловно положительную высокую оценку диссертации, в которой прежде всего представлены полученные автором экспериментальные результаты международного научного уровня.

Заключение

Диссертация представляет собой завершённую научно-исследовательскую работу. Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации.

Диссертация С.В. Образцова отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальности 1.3.15 " Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий" (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова, а также оформлена согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Таким образом, соискатель Сергей Владимирович Образцов безусловно заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.15 " Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий".

Официальный оппонент:

кандидат физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник отдела экспериментальной физики,
ФГБУН Институт ядерных исследований РАН,
КАРАВИЧЕВА Татьяна Львовна

16 февраля 2024 г.

Контактные данные:

тел.: 7(903 798 71 56), e-mail: tatiana@inr.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена диссертация:

01.04.16 - физика атомного ядра и элементарных частиц

Адрес места работы:

117312, г. Москва В-312, проспект 60-летия Октября, д. 7а,
Федеральное государственное Бюджетное Учреждение науки
Институт ядерных исследований Российской академии наук
(ИЯИ РАН),

Тел.: 8(499)135-77-60, 8(495)850-42-01, e-mail: inr@inr.ru

Подпись сотрудника ИЯИ РАН

Т.Л. Каравичевой удостоверяю.

Заведующая отделом кадров



Е.А. Горшкова

16 февраля 2024 г.