

**ОТЗЫВ официального оппонента
на диссертацию на соискание ученой степени
кандидата физик-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 экспериментальным исследованиям струй в эксперименте CMS на Большом Адронном Коллайдере и методам калибровки детектора, используемого для регистрации струй в CMS — адронного калориметра. Результаты исследований, положенные в основу диссертации, получены из данных, набранных экспериментом CMS во время первого периода работы БАК с пучками протонов с энергиями столкновений 7 и 8 ТэВ. Работы по анализу данным были выполнены соискателем в течение 2012-2023 гг.

Актуальность темы

Систематические экспериментальные исследования Стандартной модели требуют измерения кварков и глюонов наряду с лептонами. Прямое наблюдение кварков и глюонов - партонов Стандартной модели невозможно из-за конфайнмента, а косвенное измерение кинематики партонов осуществляется посредством регистрации струй — продуктов адронизации партонов. Поэтому методы реконструкции и измерения параметров струй являются чрезвычайно важной задачей в экспериментальной физике высоких энергий. Помимо измерений Стандартной модели, струи выполняют существенную функцию при исследовании свойств горячей сильновзаимодействующей материи, позволяя определить транспортные свойства КХД-материи посредством измерения потерь энергий партонов при

прохождении через материю. Таким образом, тема диссертации остается актуальной задачей в физике высоких энергий на коллайдерах.

Обоснованность положений и достоверность результатов, выносимых на защиту

В диссертации защищается 4 положения:

1. получена оценка радиационных повреждений торцевого адронного калориметра CMS;
2. получена полная коррекция энергии адронных струй в соударениях протонов при энергии $\sqrt{s} = 8$ ТэВ;
3. исследована форма адронных струй в соударениях протонов при энергии $\sqrt{s} = 7$ ТэВ;
4. разработана методика разделения кварковых и глюонных струй в соударениях тяжелых ионов.

Исследование радиационных повреждений торцевого адронного калориметра описано в главе 3 диссертации. В этой главе описана теория радиационных повреждений органических сцинтилляторов на основе полистирола, техника и методика калибровки калориметра с помощью радиоактивного источника ^{60}Co . Зависимость амплитуды калиброванного сигнала от лазера и источника ^{60}Co в сцинтилляторе от накопленной дозы и от мощности дозы определена по данным, набранным в 2017–2018 гг. Методика радиационных исследований, описанная в диссертации, соответствует стандартным методам аналогичных исследований детекторов на основе пластических сцинтилляторов. Результаты согласуются с аналогичными исследованиями, проведенными для переднего адронного калориметра CMS.

Реконструкция и коррекция адронных струй в pp столкновениях при энергиях 7 и 8 ТэВ и в столкновениях ионов свинца при энергии 5.02 ТэВ на пару нуклонов, набранных в детекторе CMS, описаны в главах 4 и 5

диссертации. В этой работе используются такие параметры струй как множественность заряженных треков, второй центральные моменты частиц, входящих в состав струи, по радиусу струи и по переменным ϕ и η . Эффективности были вычислены с помощью генераторов событий Pythia6 и Herwig+. Для реконструкции струй применялись альтернативные методы. Получены систематические погрешности, связанные с неопределенностями энергетической шкалы и энергетического разрешения струи, неэффективности трекинга, а также с процедурой анфолдинга. Результаты обсуждались в рабочей группе коллаборации CMS и сравнивались с аналогичными результатами, опубликованными ранее.

Проведенные исследования возможности разделения кварковых и глюонных струй в соударениях тяжелых ионов описаны в главе 6. Для разделения струй, инициируемых легкими кварками (u,d,s) от глюонных струй в pp взаимодействиях используется ряд наблюдаемых, характеризующих форму струи, множественность частиц в струе и заряд струи, разработаны соответствующие методики на основе машинного обучения. Применен стандартный метод мечения струи фотоном или Z-бозоном, образующемся в направлении, противоположном направлению струи. Жесткие процессы моделировались генератором событий PYQUEN, а основные события подложки — генератором HYDJET. Разработанный кварк-глюонного дискриминатор основан на методе машинного обучения Gradient Boosted Decision Tree с использованием переменных, характеризующих струи: множественность струи, ширина струю и заряд струи. Метод был отлажен на модели Монте Карло, предложены варианты использования описанной методики на реальных данных CMS со столкновениями ионов свинца.

Новизна работы

Хотя физика струй в столкновениях протонов и тяжелых ионов, как и измерение радиационных повреждений калориметров изучаются на протяжении нескольких десятилетий, методы реконструкции и измерения параметров струй, методы калибровки калориметров развиваются. Результаты, полученные в эксперименте CMS и представленные в диссертации, безусловно, являются новыми как в силу того, что энергии и интегральные светимости столкновений достигнуты впервые на Большом Адронном Коллайдере, так и благодаря новым методам исследований. Соискателем были получены следующие новые результаты:

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

Замечания

У меня как оппонента к диссертации есть ряд замечаний.

1. Актуальность работы, хотя она и очевидна, соискателем раскрыта в некоторой степени поверхностно. Кажется разумным дать небольшой обзор исследования струй, какие вопросы были достаточно проработаны предыдущими экспериментами, какие являются уникальными для БАК. Также важно было отметить, что детальное

- понимание параметров струй является необходимым условием для измерения физических явлений в pp и AA столкновениях со струями в конечном состоянии. Считаю также необходимым дать во Введении определение струй и перечислить параметры, характеризующие струи.
2. Фраза по Введении диссертации сформулирована нечетко: «Одной из проблем современной экспериментальной физики тяжелых ионов является недостаток физических наблюдаемых, которые могли бы дать принципиально новую информацию о процессах, происходящих в плотной материи». Какой именно недостаток физических наблюдаемых имеется в виду — их недостаточная точность, или принципиальная невозможность понять процессы в кварк-глюонной материи на основе имеющихся наблюдаемых?
 3. Раздел 1.1. «Стандартная Модель» описан слишком схематично. Если о фермионах и калибровочных бозонах приведено по одной правильной фразе, бозон Хиггса назван не иначе как важным элементом электрослабого взаимодействия.
 4. В разделе 1.4 соискатель говорит о фазовом переходе между адронной материей и кварк-глюонной материей в состоянии деконфайнмента. Однако, при малых значениях бариохимического потенциала фазового перехода нет — есть плавный переход из адронного состояния в среду кварков и глюонов в состоянии деконфайнмента, называемый crossover.
 5. В раздел 1.6: необходимо было дать ссылки на генераторы событий. Генераторы PYQUEN и NIDJET++ были созданы в НИИЯФ МГУ, где работает соискатель.
 6. В разделе 3.4 «Измерение радиационных повреждений» зависимость μ подгоняется 2-параметрической функцией (3.2) с одним фиксированным параметром R_0 , выбор которого определяется требованием минимальной корреляции между параметрами α и β .

Однако, ни в диссертации, ни в статье [1], не описан алгоритм минимизации корреляций между α и β .

7. В разделе 4.1 «Описание алгоритма Jet-Plus-Track» сказано, что треки ассоциируются со струей, если расстояние между треком и струей в пространстве (η, ϕ) меньше размера струи. Однако, треки с малым p_T , рожденные в направлении со струей, слишком сильно отклонятся магнитным полем в плоскости ϕ , и не будут считаться ассоциированными со струей. В то же время, мягкие треки, рожденные вне конуса струи, могут быть повернуты в магнитном поле так, чтобы дать вклад в калориметрическую струю. Получается, что алгоритм Jet-Plus-Track неэффективен для мягких треков, но в диссертации не указаны возможные искажения и систематические погрешности, вызванные мягкими треками.

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация С.В.Образцова «Характеристики адронных струй в релятивистских соударениях протонов и тяжелых ионов в эксперименте CMS на LHC» 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. Диссертация 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 Образцов Степан Владимирович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.15 — «Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий».

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник Отделения экспериментальной физики
Федерального государственного бюджетного учреждения «Институт физики
высоких энергий имени А.А. Логунова Национального исследовательского
центра «Курчатовский институт»

Харлов Юрий Витальевич



16.02.2024 г.

Контактные данные:

тел.: +7(4967)713329, e-mail: Yuri.Kharlov@ihep.ru
Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена диссертация: 01.04.23 - «Физика высоких энергий»

Адрес места работы:

142281, (Московская область, г. Протвино, пл. Науки д. 1,
Федеральное государственное бюджетное учреждение «Институт физики
высоких энергий имени А.А. Логунова Национального исследовательского
центра «Курчатовский институт», Отделение экспериментальной физики
Тел.: +7-(4967) 71-37-60; e-mail: fgbu@ihep.ru

Подпись сотрудника Федерального государственного бюджетного
учреждения «Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»
Харлова Юрия Витальевича удостоверяю:

Ученый секретарь



Н.Н.Прокопенко