

## ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертации 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 изучению характеристик адронных струй в столкновениях протонов и тяжелых ионов в эксперименте CMS на Большом адронном коллайдере (LHC). Исследование свойств струй важно для решения широкого спектра задач современной физики высоких энергий: для изучения сильного взаимодействия, для прецизионных измерений таких важных параметров Стандартной модели, как масса топ-кварка, для анализа распадов бозона Хиггса, для поиска физики за пределами СМ. Знание характеристик струй, исследуемых в диссертации, нужно для проверки КХД, в частности, моделей партонных каскадов, а также для выяснения механизма адронизации. В соударениях тяжелых ионов наблюдаемый эффект гашения струй указывает на существование кварк-глюонной плазмы. Здесь большую роль играют механизмы потерь энергии партонами при прохождении через нее. Для измерения характеристик адронных струй используются электромагнитные и адронные калориметры, а также трековые детекторы. Первичная калибровка адронного калориметра, рассматриваемая в диссертации, является важным шагом на пути определения кинематики адронной струи. Кроме того, такая калибровка позволяет изучить последствия высоких радиационных доз в условиях высокой светимости LHC. Таким образом, актуальность темы исследования не вызывает сомнений.

Научная и практическая значимость полученных в диссертации результатов заключается в новой информации о струях в  $pp$ -соударениях при рекордных энергиях и больших переданных импульсах, новых методах разделения кварковых и глюонных струй в соударениях ионов свинца, а также в измерении радиационных повреждений сцинтилляторов в торцевом

адронном калориметре детектора CMS, что важно как для исследования механизмов радиационных повреждений сцинтиллятора, так и для планирования будущих детекторов.

Достоверность полученных результатов обеспечивается применением многократно проверенных методов современной экспериментальной физики. Проводится сравнение с аналогичными результатами, полученными независимыми методами: другими алгоритмами реконструкции струй, другими методами оценки радиационных повреждений. Помимо этого, полученные результаты согласуются с моделированием методами Монте-Карло. Работа выполнена в рамках эксперимента CMS - одного из лидеров в экспериментальной физике частиц. Она прошла многоуровневые процедуры проверки и рецензирования, принятые в таком большом сотрудничестве.

Что касается научной новизны, то следует отметить, что все основные результаты данной работы были получены впервые. Работа по исследованию формы струй при  $\sqrt{s} = 7$  ТэВ - первая работа CMS по этой теме.

Положения, выносимые на защиту и выводы из проведенного исследования убедительно обоснованы.

Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения.

**Во введении** раскрывается актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи работы, основные положения, выносимые на защиту, показаны научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, а также их достоверность, представлена информация об апробации работы и отмечен личный вклад автора.

**В первой главе** представлено краткое введение в физику адронных струй, рождающихся в столкновениях протонов и тяжелых ионов: механизмы их возникновения, прохождения через кварк-глюонную плазму и перечисляются используемые в работе популярные генераторы физических событий, основанные на их моделировании методами Монте-Карло.

**Во второй главе** диссертации дается описание ускорительного комплекса LHC и подсистем эксперимента CMS, которые используются в

настоящей работе: магнита, трековых детекторов, электромагнитного и адронного калориметров, мюонных детекторов и триггера.

**В третьей главе** диссертации представлено исследование радиационных повреждений сцинтиллятора торцевого адронного калориметра CMS с помощью радиоактивного источника  $^{60}\text{Co}$ , которое автор проделал в составе небольшой группы. Эти повреждения связаны с большими потоками энергии частиц, особенно на малых полярных углах, при большой светимости LHC. На установке CMS обеспечены хорошие условия для этих исследований: стабильная температура, влажность, наличие специально установленных пленочных дозиметров. Кроме того, поскольку все сцинтилляционные пластины калориметра облучаются в течение одного времени, то полученная доза пропорциональна ее мощности. Это позволило провести исследование зависимости радиационного повреждения от этих двух переменных. Помимо изучения динамики радиационного повреждения, данная методика использовалась для начальной калибровки адронного калориметра после модернизации считывающей электроники.

**В четвертой главе** представлены результаты калибровки адронных струй, реконструированных с помощью алгоритма на основе калориметрической и трековой информации, на данных эксперимента CMS при энергии  $\sqrt{s} = 8$  ТэВ. Его спецификой является наложение нескольких сторонних событий в том же взаимодействии пучков коллайдера, что и изучаемое событие, причем их количество пропорционально светимости LHC. Автором был успешно разработан алгоритм для корректировки измеренного 4-импульса струи с учетом попадания внутрь ее конуса частиц, связанных с этими сторонними событиями. Эта корректировка используется в физических исследованиях CMS. С.В. Образцовым также разработан алгоритм для разделения глюонных и кварковых струй. Оба упомянутых алгоритма используют методы машинного обучения.

**В пятой главе** представлены результаты физического анализа формы струй в данных эксперимента CMS в  $pp$ -столкновениях при  $\sqrt{s} = 7$  ТэВ.

Измерены средняя множественность заряженных треков и второй центральный момент профиля струи в зависимости от поперечного импульса и псевдобыстроты струи. Проведено сравнение результатов с предсказаниями генераторов событий PYTHIA6 и Herwig++, которые используют разные модели адронизации. Для получения «истинных» характеристик струй на основе измеренных, т.е. для учета функции отклика детектора, в исследовании применялись такие технически сложные методы, как аналитическая регуляризация по Тихонову и развертка. Они дали сходные результаты.

**В шестой главе** описывается разработанная автором методика разделения кварковых и глюонных струй в соударениях тяжелых ионов на основе моделирования жесткого процесса с конечным состоянием струя+фотон. В отличие от *pp*-столкновений, во взаимодействиях 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. Поэтому исследование начинается с вычитания этого фона. Затем были выбраны переменные, устойчивые к этой процедуре, характеризующие форму, множественность и заряд струи. С помощью методов машинного обучения в работе продемонстрирована возможность разделения глюонных и кварковых струй. Разработанные методы важны для дальнейшего анализа данных.

**В заключении** подробно перечислены основные научные результаты.

Диссертация является результатом многолетней работы соискателя. Полученные результаты выглядят весьма убедительными и характеризуют его как зрелого физика высокой квалификации, как в области обработки данных, программирования, моделирования различных процессов, так и в области детекторов и методики эксперимента. Большой личный вклад диссертанта в представленные результаты не вызывает сомнения и подтверждается его выступлениями на пяти российских и международных научных конференциях. Текст автореферата полностью соответствует содержанию

диссертации. По теме диссертации опубликовано 4 статьи в реферируемых журналах, включая такие высокорейтинговые издания, как JINST и JHEP.

Диссертация соответствует специальности 1.3.15. Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий, а именно следующим ее направлениям: 4) “Техника и методика эксперимента в области физики атомных ядер и элементарных частиц и физики высоких энергий”, 9) “Структура и распадные свойства адронов, лептонов и других элементарных частиц - эксперимент и теория”, 11) “Ядро-ядерные столкновения, свойства сильно взаимодействующей материи – эксперимент и теория”.

В диссертации подробно излагаются как методические вопросы, связанные с измерением энергии адронных струй, так и физические вопросы, относящиеся к изучению их свойств, что является несомненным достоинством экспериментального исследования. Процедура энергетической калибровки струй в эксперименте CMS на БАК, где на изучаемое событие накладываются десятки сторонних событий, - весьма нетривиальна, но С.В. Образцов смог успешно разобраться во всех ее тонкостях. Следует также отметить, что автор долгое время входит в группу экспертов сотрудничества CMS по торцевому калориметру, о проверке радиационной стойкости и начальной калибровке которого говорится в диссертации.

Замечания по тексту диссертации:

**Введение, стр. 7, первая строка.** Стоит включить и эксперимент LHCb в список экспериментов, где изучают столкновения ионов. У них есть публикации на эту тему. Пример: LHCb Collaboration,  $J/\psi$  photoproduction in Pb-Pb peripheral collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 5$  TeV, Phys. Rev. C105 (2022) L032201.

**Глава 1, стр. 17.** Совсем недавно константа связи  $\alpha_s$  была измерена с рекордной точностью в эксперименте ATLAS, arXiv:2309.12986.  $\alpha_s(m_Z) = 0.1183 \pm 0.0009$ .

**Глава 1, стр. 28-29.** Надо было дать ссылки на основные публикации по Pythia, Herwig, Pyquen, Hydjet.

**Глава 2, стр.32-33.** В перечисленных требованиях к детектору CMS стоило бы добавить высокую радиационную стойкость, особенно для детекторов, перекрывающих малые полярные углы.

**Глава 4, раздел 4.4, стр. 70.** Ни одна из зависимостей, о которых говорится в указанном разделе, не приводится. Стоило бы привести хотя бы итоговую зависимость погрешности знания энергетической шкалы струй от поперечного импульса и псевдобыстроты.

**Глава 4, раздел 4.4, стр. 72.** Стоило бы привести параметры подгонки зависимости энергетического разрешения от энергии (шумовой, стохастический и постоянный члены разрешения, вероятно, сложенные квадратично?)

#### **Общие замечания по оформлению диссертации.**

1. Текст диссертации и ее автореферата написаны довольно небрежно, имеется ряд грамматических ошибок, иногда используются жаргонные термины и англицизмы, есть описки.
2. В диссертации рисунки, взятые из литературных источников, зачастую не содержат ссылки на эти источники. Не всегда переведены на русский язык те английские обозначения, которые встречаются на рисунках.

Указанные в настоящем отзыве замечания не умаляют достоинств диссертационного исследования и не снижают его ценности. Диссертация Образцова С. В. «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 п.п. 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 **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,  
старший научный сотрудник  
лаборатории нейтринной физики Отделения физики высоких энергий  
Курчатовского комплекса теоретической и экспериментальной физики  
НИЦ “Курчатовский институт”

ЦУКЕРМАН Илья Ильич

Контактные данные:

тел.: +7(499)7896653, e-mail: zuckerma@itep.ru  
Специальность, по которой официальным оппонентом  
защищена диссертация:  
01.04.23. – “Физика высоких энергий”

Адрес места работы:

123182, г. Москва, площадь Академика Курчатова, 1

Подпись И.И. Цукермана удостоверяю:

Главный ученый секретарь  
НИЦ “Курчатовский институт”

К.Е. Борисов