

ОТЗЫВ

**официального оппонента Батюни Бориса Владимировича
на диссертацию Шульги Евгения Александровича
“Спектры заряженных частиц и факторы ядерной модификации в
протон-ядерных ($p+^{208}\text{Pb}$) взаимодействиях при энергии 5,02 ТэВ на
пару нуклонов в эксперименте ATLAS на БАК“, представленную на
соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности 01.04.16-физика ядра и элементарных частиц.**

Многолетние исследования взаимодействий релятивистских ядер с ядрами и протонами (дейтронами) привели к некоторому теоретическому представлению о двух различных характерных ядерных эффектах: возникновении кварк-глюонной плазмы (КГП) в конечном состоянии взаимодействий тяжёлых релятивистских ядер при очень высокой температуре и плотности энергии и проявлении свойств “холодной ядерной материи” при взаимодействии таких ядер с малонуклонными системами. В последнем случае в теоретических моделях рассматривается в первоначальном состоянии взаимодействия, например, механизм насыщения глюонной плотности, приводящий к образованию плотного глюонного состояния – глюонного конденсата. Однако целый ряд результатов экспериментов на ускорителе LHC (в диссертации БАК) в Ядерном центре CERN, полученных при изучении парных корреляций, потоков частиц, выхода странных мезонов и барионов, факторов ядерной модификации, привели к предположению о проявлении присущих КГП коллективных эффектов не только в ядро-ядерных, но и в протон-ядерных и даже в протон-протонных столкновениях. Это предположение широко обсуждается в последние годы, поэтому актуальность темы данной диссертации не вызывает сомнения.

Основная часть диссертации посвящена экспериментальным исследованиям, методы и результаты которых детально рассмотрены диссертантом. Теоретические модели здесь традиционно используются для определения эффективности работы детекторов и при сравнении экспериментальных результатов с теоретическими предсказаниями.

Диссертация включает отдельной секцией характеристику работы, введение, шесть глав и заключение.

В секции «Характеристика работы» обосновывается актуальность темы и достаточно чётко сформулированы необходимые пункты диссертации: цель работы, научная новизна, положения, выносимые на защиту, теоретическая и практическая значимость работы, достоверность полученных результатов и выводов, вклад автора, апробация работы.

Во введении и в первой главе приводится краткий обзор теоретических и экспериментальных результатов исследования в рассматриваемой области физики. Теоретическая часть включает наиболее важные аспекты, дающие современное представление о взаимодействии релятивистских ядер. В том числе рассматривается поведение кварк-глюонной системы в рамках квантовой хромодинамики, обсуждаются процессы взаимодействия в конечном состоянии внутри ядер, эффект ядерного экранирования. Нужно отметить умение автора сжато, но достаточно точно представлять объёмный и сложный по содержанию материал. Экспериментальная часть обзора достаточно полно описывает результаты, полученные в разных ядерных центрах по данной тематике.

Во второй главе даётся краткое описание основных характеристик ускорителя LHC и установки ATLAS. Схематически и довольно удачно представлены этапы ускорения протонов и ядер, обсуждаются вопросы, связанные со светимостью ускорителя. Далее автор рассматривает отдельные детекторы, используемые в данном анализе: внутренний трековый детектор, окружённый тонким сверхпроводящим соленоидом, электромагнитными и адронными калориметрами и мюонным спектрометром, включающим три больших сверхпроводящих тороидальных магнита; сцинтилляционный детектор MBTS (Minimum Bias Trigger Scintillators), который позволяет отбирать события с минимальными критериями. Достаточно подробно обсуждаются назначение детекторов, их структура и геометрические

акцептансы. Здесь же рассмотрены основные принципы регистрации заряженных частиц и их струйных образований. Нужно отметить хорошее понимание автором всех обсуждаемых методических вопросов.

В третьей главе детально рассмотрены условия отбора $p\bar{p}$ и $p+Pb$ событий в эксперименте и даётся определение интервалов центральности $p+Pb$ взаимодействий. Специально обсуждаются вопросы триггирования, позволяющего снизить до минимальных значений вклады фоновых дифракционных и фотоядерных взаимодействий, а также наложений двух и более событий и взаимодействий пучковых частиц с веществом ускорителя. Подробно и с хорошим пониманием автором описана очень важная процедура определения центральности событий и относящихся к ней параметров, таких как среднее значение взаимодействующих нуклонов (N_{part}) и $\langle T_{Pb} \rangle$ для каждого интервала центральности. Для определения центральности использовалась величина полной энергии, выделившейся в переднем калориметре. Специально нужно отметить процедуру расчёта значений (N_{part}) и $\langle T_{Pb} \rangle$, где автор, кроме традиционной модели Глаубера, использовал модель цветовой неустойчивости Глаубера-Грибова, учёт флуктуации сечения в которой приводит к значительным эффектам, показанным автором при интерпретации экспериментальных результатов в главе 6. Кроме того, автором достаточно грамотно были рассмотрены источники систематических погрешностей определения параметров интервалов центральности с использованием Монте-Карло моделирования. При этом описана процедура определения центральности для Монте-Карло генераторов HIJING и PYTHIA с дальнейшей обработкой событий в пакете симуляции детекторов ATLAS на основе GEANT-4 и восстановления информации при помощи того же пакета ATLAS ПО, который используется для анализа экспериментальных данных.

В двух последующих главах 4 и 5 описывается методика проведения анализа спектров заряженных частиц с поперечными импульсами (p_T) соответственно меньшими и большими $22 \text{ GeV}/c$. Это наиболее объёмные части диссертации, где подробно рассматриваются все значимые методические вопросы, связанные с отборами треков, поправками на различные потери, определением и учетом эффективности отборов, систематическими погрешностями. Достаточно краткое описание обозначенных проблем включает тем не менее все наиболее важные детали, что указывает на хорошее понимание автором этих необходимых составляющих анализа. Нужно отметить, что, кроме традиционных методов, используются такие как: процедура «перевзвешивания» для точного сравнения экспериментальных данных и результатов Монте-Карло моделирования, метод «итеративной деконволюции» для восстановления истинного распределения (спектра) по искажённому измеренному. Можно выделить также коррекцию спектров на неточности, связанные с использованием массы пионов для всех заряженных частиц из-за отсутствия достаточно надёжной идентификации частиц разных типов в эксперименте ATLAS. Отдельно рассмотрены методические проблемы выделения частиц с большими поперечными импульсами с помощью алгоритма нахождения жёстких струй, что является наиболее эффективным методом в данном эксперименте. Большое внимание автор уделяет источникам систематических погрешностей и определению их значений. Эти вопросы обсуждаются отдельно для взаимодействий протонов с ядрами свинца и с протонами и для частиц с малыми и большими поперечными импульсами. С помощью варьирования детальными параметрами экспериментальных измерений и моделирования автор получил оценки систематических погрешностей для всех рассмотренных источников в диапазоне от 0.01% до 10%, которые во многом определили значимость экспериментальных результатов.

В шестой главе рассмотрены основные результаты диссертации, полученные при исследовании спектров заряженных частиц (секция 6.1) и факторов ядерной модификации (секция 6.2 и 6.3). Анализ начинается сравнением спектров по поперечным импульсам с ограничением $p_T < 20 \text{ GeV}/c$, полученных для $p\text{-}Pb$ и $p\bar{p}$ столкновений. Последние были определены автором для энергии 5.02 TeV методом интерполяции данных, полученных ранее при двух энергиях 2.76 и 7 TeV . Заслуживает внимания вывод автора о видимых расхождениях спектров для разных интервалов центральности $p\text{-}Pb$ взаимодействий, поскольку эти расхождения проявляются при дальнейших исследованиях факторов ядерной модификации. Нужно отметить также, что сравнение данных сделано с использованием

разных моделей: Глаубера и Глаубера – Грибова с разными значениями внутреннего параметра. Далее рассмотрены распределения заряженных частиц по псевдобыстроте (η) и быстроте (y^*) для разных центральностей p-Pb столкновений. Интересно отметить, и автор это делает, что для центральных событий наблюдается значительное усиление выхода частиц в области вылета ядра, и этот эффект пропадает для периферических столкновений. Этот результат указывает на проявление ядерных эффектов для более центральных соударений.

Фактор ядерной модификации, определяемый как отношение спектров в выбранном интервале центральности к наиболее периферическому из рассматриваемых (в данной работе — 60-90%), обычно обозначается как R_{CP} и позволяет для его нахождения использовать результаты одного эксперимента. Значение R_{CP} изучалось в зависимости от p_T и η частицы для разных интервалов центральности и трех моделей, упомянутых выше. Автор отмечает такие интересные ядерные эффекты, как очень заметное пикообразное увеличение величины R_{CP} при средних p_T порядка 3 GeV/c в центральных событиях (известный эффект Кронина) и проявление этого эффекта в области псевдобыстроты, связанной с направлением вылета ядра. Кроме того, автор демонстрирует заметную зависимость максимальной величины R_{CP} от используемых моделей Глаубера и Глаубера-Грибова, что указывает на необходимое дополнительное изучение вопроса выбора модели.

В секции 6.3 исследуется фактор ядерной модификации (R_{pPb}), определяемый как отношение спектров, полученных в p-Pb и pp соударениях при одинаковых энергиях на пару нуклонов. Такой анализ позволяет наиболее четко проследить ядерные эффекты, которые отсутствуют в pp столкновениях. Величина R_{pPb} также изучается в зависимости от p_T и быстроты частицы для разных интервалов центральности и для трех моделей, указанных выше. Автор отмечает очевидную схожесть всех особенностей, наблюдаемых для величин R_{pPb} и R_{CP} . Показано также, что влияние выбора моделей становится слабым при отборе данных в наиболее широких интервалах центральности и быстроты. Кроме того, автор демонстрирует рост значения фактора R_{pPb} для центральных соударений в области малых p_T (до 10 GeV/c) и согласованность поведения этого фактора в интервалах малых и больших значений p_T . Далее сравниваются зависимости R_{pPb} от p_T частицы, полученные в экспериментах ATLAS, ALICE и CMS. Автор делает вывод о совпадении результатов этих трёх экспериментов в пределах систематических ошибок и с учётом несколько различных рассматриваемых областей быстроты (псевдобыстроты). Нужно отметить важность этого вывода, поскольку результаты получены с использованием разных детекторов и различных методик.

В конце секции 6.3 автор специально подчёркивает, что результаты исследования величин R_{pPb} и R_{CP} свидетельствуют об отсутствии в p+Pb соударениях подавления рождения заряженных частиц такого же как в Pb+Pb столкновениях. Из этого результата, наблюдаемого и в других экспериментах, следует важный вывод об отсутствии возникновения «горячей» кварк-глюонной плазмы в конечном состоянии взаимодействий протонов с тяжёлыми релятивистскими ядрами.

В заключении кратко сформулированы основные результаты диссертации.

Нужно отметить, что диссертация не лишена некоторых недостатков, перечисленных ниже.

При описании электромагнитного и адронного калориметров желательнее было бы привести величины их энергетических разрешений.

На странице 109 подчеркнута, что на рисунке 6.4 можно выделить три области по p_T с заметно отличными поведением распределений для p+Pb и pp взаимодействий. Однако при использованном визуальном методе сравнения такое отличие реально наблюдается лишь в области $p_T < 1$ GeV/c.

На странице 115 вывод о расширении области исследования протонов по быстройте в данной работе, хотя и заслуживает внимания, но является лишь косвенным из-за отсутствия идентификации типов частиц, что не чётко обозначено автором.

На странице 120 на основании рисунка 6.17 сделан вывод, что результаты измерений факторов ядерной модификации для больших p_T не представляют зависимости, схожей с результатами коллаборации CMS, и подтверждают результаты коллаборации ALICE. Но на приведённом ранее рисунке 6.14 видно, что в области максимальных p_T для ALICE (порядка

50 GeV/c) сделать таких однозначных утверждений нельзя из-за больших систематических ошибок во всех трёх экспериментах.

На рисунках 6.5 и 6.6 в подписях приводится информация « $u_{lab} = 0.465$ », « $1 \mu b^{-1}$ », « $L_{int}^{pp} = 25 pb^{-1}$ », « $L_{int}^{pPb} = 25 pb^{-1}$ », пояснения которой нет в подписях к рисункам и в текстовых комментариях к этим рисункам, и не вполне понятно, зачем она здесь приведена.

Размерность для импульсов на всех рисунках (кроме рисунка 6.12) указана как [GeV] вместо правильной [GeV/c]. Хотя на странице 5 в сноске есть пояснение о системе единиц, где $h = c = 1$, размерность тем не менее должна указываться правильно.

Попадаются не слишком удачные определения, такие как «мягкая множественность».

Аббревиатура для ускорителя ЛHC приводится в русском написании (БАК), хотя для всех остальных зарубежных ускорителей и экспериментов написание английское.

Попадаются описки и ошибки в тексте, допущенные по невнимательности. Но следует отметить, что таких ошибок немного, и в целом диссертация написана грамотно и оставляет хорошее впечатление.

Диссертация Шульги Евгения Александровича содержит целый ряд важных научных результатов, полученных в эксперименте ATLAS при исследовании взаимодействий протонов с ядрами свинца при энергии ускорителя ЛHC. Полученные результаты могут быть использованы как в эксперименте CMS, так и в других экспериментах по релятивистской ядерной физике. Сделанные выше замечания не влияют на основные выводы диссертации. Содержание диссертации удовлетворяет всем требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, и автор, Шульга Евгений Александрович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук. Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Официальный оппонент Батюня Борис Владимирович,
доктор физико-математических наук, старший научный
сотрудник, начальник сектора Лаборатории физики высоких
энергий Объединённого института ядерных исследований.

12.02.2018

/Батюня/

Адрес: г. Дубна, Московская область, 141980, ул. Желепова, д.1, кв. 2.
email-address: Boris.Batyunya@cern.ch

Подпись Батюни Бориса Владимировича удостоверяю,
ученый секретарь Лаборатории физики высоких
энергий Объединённого института ядерных
исследований Пешехонов Дмитрий Владимирович

12.02.2018



/Пешехонов/