

УТВЕРЖДАЮ

Директор ФГБУ ГНЦ РФ - ИТЭФ НИЦ
Курчатовский институт

Д.т.н., проф.


Козлов Ю.Ф.


2015 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Государственный Научный Центр Российской Федерации - Институт Теоретической и Экспериментальной Физики» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» на диссертационную работу Азаркина Максима Юрьевича «Множественное рождение частиц в адрон-адронных столкновениях при энергиях Большого Адронного Коллайдера», представленную на соискание степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц.

Диссертация Азаркина Максима Юрьевича посвящена исследованию множественного рождения частиц в адронных столкновениях. Работа выполнена с использованием данных, набранных экспериментом CMS на Большом Адронном Коллайдере. В анализе исследовались как протон-протонные (pp), так и ядро-ядерные (AA) столкновения. В последнее время процессам, приводящим ко множественному рождению частиц в pp-столкновениях, посвящено большое число работ, что прежде всего связано с открытием в них так называемого эффекта хребта, который качественно похож на обнаруженный ранее в AA столкновениях на ускорителе RHIC. Однако, сталкивающиеся системы крайне отличны, как и причины проявления данной корреляционной структуры. Поэтому дополнительные исследования свойств pp столкновений с высокой множественностью чрезвычайно актуальны.

Столкновения ультрарелятивистских ядер приводят к рождению материи, предположительно существовавшей в первые мгновения жизни Вселенной. Исследования таких столкновений, в частности на ускорителе RHIC, продемонстрировали, что они не сводятся

к простой суперпозиции нуклонных взаимодействий, и показали ряд новых явлений: коллективная азимутальная анизотропия частиц, специфические двух- и трехчастичные корреляции, эффект гашения струй, подавление выхода адронов с высокими поперечными импульсами в сравнении с протон-протонными столкновениями. В представленной диссертации приведены измерения коллективной азимутальной анизотропии заряженных частиц в столкновениях ядер свинца при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 2,76$ ТэВ с использованием данных эксперимента CMS, что 14 раз выше в сравнении с ускорителем RHIC. Столь значительное увеличение энергии столкновений делает эти измерения актуальными и ценными для развития теоритических моделей.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и двух приложений. Полный объем диссертации составляет 162 страниц с 63 рисунками и 15 таблицами. Список литературы содержит 173 наименования.

В главе 1 проведен обзор моделей протон-протонных взаимодействий, используемых в наиболее распространённых программах математического моделирования на основе метода Монте-Карло. Особое внимание уделено каким образом и с помощью каких механизмов экспериментальные данные по множественному рождению частиц были учтены в них. Указаны потенциальные недостатки моделей в контексте темы диссертации.

В главе 2 приведена информация об экспериментальной установке CMS: описаны ее подсистемы, даны ключевые их характеристики. Наибольшее внимание уделено подсистемам, используемым в экспериментальных исследованиях, проведенных при участии автора представленной диссертации.

Третья глава посвящена экспериментальным измерениям характеристик множественного рождения частиц в протон-протонных столкновениях при энергии в системе центра масс $\sqrt{s} = 7$ ТэВ. Все величины были измерены как функции множественности (N_{ch}) рожденных в столкновениях протонов заряженных частиц: средний p_T заряженных частиц, как всех в событии, так и принадлежащих струям и фоновому событию в отдельности, средний p_T струй, реконструированных из заряженных частиц, структура струй, множественность струй. Новизна и значимость применённого подхода состоит в том, что многие из эти переменных были измерены впервые и позволяют исследовать роли отдельных механизмов во множественном рождении частиц. В результате проведенных исследований было обнаружено, что данные показывают нарастающие с множественностью расхождения в сравнении с моделями. Так, наблюдаемая множественность струй в интервале от 80 до 140 заряженных частиц значительно ниже (до 2-3 раз при максимальном N_{ch}), чем предсказывается лучшей из моделей.

В четвертой главе обсуждаются возможные механизмы возникновения протяженной по псевдобыстроте азимутальной корреляции заряженных частиц, так называемый эффект хребта, обнаруженной в pp столкновениях с высокой N_{ch} впервые на БАК при энергии $\sqrt{s} = 7$ ТэВ. Аналогичная корреляционная структура наблюдается и в pA и AA столкновениях, причем в последнем случае уже при энергиях ускорителя RHIC, и является проявлением гидродинамического потока среды. Однако, в pp столкновениях объем среды слишком мал для термализации партонов и проявления коллективных степеней свободы. Данная корреляционная структура в pp столкновениях может быть объяснена механизмом разрыва цветных струн. В работе проведено моделирование с помощью генератора событий PYTHIA, где отключены все жесткие процессы и тем самым увеличена роль струнного механизма в рождении частиц, в которой показана возможность рождения данной корреляционной структуры. Дано объяснение почему генератор событий PYTHIA неспособен воспроизвести этот эффект с параметрами и механизмами, наиболее подходящими для описания минимально смещенных событий. Это связано с механизмом цветового пересоединения, который препятствует образованию длинных струн.

Глава 5 посвящена интерпретации экспериментальных данных по множественному рождению частиц в pp столкновениях, в том числе изложенных в главе 3. В частности, установлена зависимость множественности заряженных частиц от прицельного параметра, показаны границы ее применимости. Так, для события с множественностью заряженных частиц в трое больше средней условия центрального столкновения недостаточно. Впервые показано явление универсальной связи между множественностью мягких адронов и жестких процессов, то есть относительные выходы струй с разными порогами по p_T и другими жестким процессами (например, рождение J/ψ и D мезонов) близки. Это наблюдение свидетельствует, что выход жестких процессов преимущественно определяется начальным состоянием протонов. Данное свойство сохраняется и при высоких значениях множественности (N_{ch} вплоть до $5\langle N_{ch} \rangle$).

В главе 6 представлены исследования азимутальной анизотропии заряженных частиц в столкновениях ядер свинца при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 2,76$ ТэВ. С этой целью был измерен так называемый эллиптический поток, характеризуемый коэффициентом v_2 , при разных центральных столкновениях. Коэффициент v_2 был измерен как функция p_T заряженных частиц, а также как функция псевдобыстроты в каждом классе центральности (12 классов от 0 до 80 %). Полученная зависимость $v_2(p_T)$ демонстрирует практически линейный рост до $p_T \approx 3$ ГэВ/с и спад в интервале 3—10 ГэВ/с, после чего выходит практически на плато. Такая форма зависимости наблюдалась ранее в экспериментах на ускорителе RHIC. В сравнении с AuAu столкновениями при $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ТэВ обнаружен рост $v_2(p_T)$ на 5-15% в

зависимости от p_T . Результаты измерений $v_2(\eta)$ показывают слабый спад с ростом $|\eta|$ во всех классах центральности.

Зависимость интегрального значения v_2 демонстрирует рост с увеличением центральности до 40-50%, затем сменяясь спадом. Такое поведение так же ранее наблюдалось в экспериментах на ускорителе RHIC.

Представленные исследования азимутальной анизотропии заряженных частиц проведены при энергии в 14 раз выше в сравнении с предыдущими аналогичными измерениями, что обеспечивает теоретические и феноменологические модели АА столкновений действительно новыми данными, определяющими вектор их развития.

В заключении еще раз кратко сформулированы основные полученные результаты.

Диссертация Азаркина Максима Юрьевича является итогом большой по объему и высокой по качеству работы, в которой им продемонстрированы хорошие знания эксперимента, а также теоретических и феноменологических моделей, необходимых для интерпретации результатов измерений. Полученные результаты актуальны и обладают высокой научной ценностью. Специального внимания заслуживает подход примененный к анализу данных pp столкновений, в котором характеристики рождения мягких частиц, составляющих так называемое фоновое событие, и жестких, например происходящих из струй, исследуются как функции множественности. Как полученные результаты, так и сам подход обладают большой практической значимостью для развития моделей pp столкновений и обработки экспериментальных данных при более высоких энергиях и в других экспериментах (ATLAS, ALICE).

По диссертации можно отметить следующие замечания:

1. Излишне краткое описание физической программы и триггера эксперимента CMS.
2. Отсутствие пояснений на рис. 1.4 и 1.5.
3. Определение псевдобыстроты автор указывает на стр. 29, в то время как сам символ впервые используется на стр. 9.
4. Неверная единица измерения поперечного импульса стр. 29, таблица 3.1 стр. 35.
5. На рисунках 5.5 и 5.6 подписи по оси ординат слишком громоздки. Целесообразнее было ввести краткое обозначение и определить его в тексте.
6. На стр. 36 следовало бы избежать использования английского слова «тьюн», хотя в сноске и приводится пояснение.
7. При обсуждении механизмов, ответственных за появление эффекта «хребта» в протон-протонных столкновениях с высокой множественностью, роль цветовой

го пересоединения обсуждалась только качественно. Было бы полезно привести результаты математического моделирования.

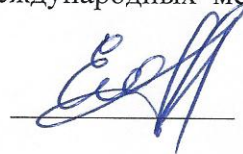
Отмеченные недостатки **не снижают** ценности диссертации. В целом диссертация Азаркина Максима Юрьевича выполнена на высоком научном уровне, представляет собой законченный научный труд, написана ясным языком, хорошо оформлена и проиллюстрирована. Автореферат адекватно передает содержание диссертации. В работе получен ряд новых результатов, имеющих научную и практическую ценность. Сформулированные в диссертации выводы и положения достоверны и обоснованы. Основные результаты опубликованы в ведущих международных реферируемых журналах.

Диссертационная работа «Множественное рождение частиц в адрон-адронных столкновениях при энергиях Большого Адронного Коллайдера» удовлетворяет всем требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Азаркин Максим Юрьевич безусловно заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц.

Отзыв рассмотрен и одобрен на заседании секции №2 Ученого совета ФГБУ ГНЦ РФ ИТЭФ протокол №64 от 11 ноября 2015 года.

Отзыв составил начальник отделения международных мегапроектов ФГБУ ГНЦ РФ - ИТЭФ НИЦ Курчатовский институт,

кандидат физико-математических наук



Егорычев Виктор Юрьевич

Подпись Егорычева Виктора Юрьевича заверяю

Ученый секретарь ФГБУ ГНЦ РФ - ИТЭФ НИЦ Курчатовский институт,

кандидат физико-математических наук



В.В. Васильев

117218 Россия, Москва

ул. Большая Черемушkinsкая, 25

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Государственный Научный Центр Российской Федерации - Институт Теоретической и Экспериментальной Физики» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»,

тел. +7 (499) 123-80-93

Факс +7 (499) 127-08-33

E-mail: director@itep.ru

сайт: <http://www.itep.ru>

Список основных работ сотрудников Федерального Государственного Учреждения «Государственный Научный Центр Российской Федерации - Институт Теоритической и Экспериментальной Физики» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» по теме диссертации:

1. LHCb Collaboration, "Measurement of the inelastic pp cross-section at a centre-of-mass energy of $\sqrt{s} = 7$ TeV", JHEP 1502 (2015) 129
2. LHCb Collaboration, "Observation of charmonium pairs produced exclusively in pp collisions" J. Phys. G **41**(2014) 115002
3. LHCb Collaboration, "Measurement of charged particle multiplicities and densities in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV in the forward region", Eur. Phys. J. C **74** (2014) 2888
4. LHCb Collaboration, "Measurement of B meson production cross-sections in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV", JHEP **1308** (2013) 117
5. LHCb Collaboration, "Observation of J/ψ pair production in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV", Phys. Lett. B **707** (2012) 52
6. ATLAS Collaboration, "Charged-particle multiplicities in pp interactions measured with the ATLAS detector at the LHC", New J. Phys. **13** (2011) 053033.
7. ATLAS Collaboration, "Measurement of event shapes at large momentum transfer with the ATLAS detector in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV", Eur. Phys. J. C **72** (2012) 2211.
8. ATLAS Collaboration, "Study of jet shapes in inclusive jet production in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV using the ATLAS detector", Phys. Rev. D **83** (2011) 052003.
9. ATLAS Collaboration, "Measurement of charged-particle event shape variables in $\sqrt{s} = 7$ TeV proton-proton interactions with the ATLAS detector", Phys. Rev. D **88** (2013) 032004.
10. ATLAS Collaboration, "Measurement of underlying event characteristics using charged particles in pp collisions at $\sqrt{s} = 900$ GeV and 7 TeV with the ATLAS detector", Phys. Rev. D **83** (2011) 112001.
11. ATLAS Collaboration, "Measurement of the pseudorapidity and transverse momentum dependence of the elliptic flow of charged particles in lead-lead collisions at $\sqrt{s_{NN}}$

= 2.76 TeV with the ATLAS detector”, Phys. Lett. B **707** (2012) 330.

12. ALICE Collaboration, “Elliptic Flow of Charged Particles in Pb-Pb Collisions at $\sqrt{s_{NN}}$ = 2.76 T eV ”, Phys. Rev. Lett. 105 (2010) 252302

13. ALICE Collaboration, “Transverse sphericity of primary charged particles in minimum bias proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 0.9, 2.76$ and 7 TeV”, Eur. Phys. J. C **72** (2012) 2124

14. ALICE Collaboration, “Underlying Event measurements in pp collisions at $\sqrt{s} = 0.9$ and 7 TeV with the ALICE experiment at the LHC”, JHEP 7 (2012) 116, arXiv:1112.2082.