



ФИЗИКА НА LHC

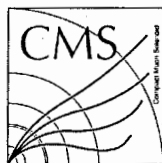
Труды
объединённого семинара
RDMS CMS

Выпуск 3

2013

PHYSICS AT THE LHC

Proceedings of
Joint Seminar of RDMS CMS
Collaboration



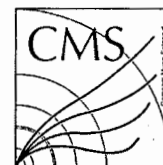
Volume 3
2013

Dubna 2013

C 346(04)
Ф-503

ФИЗИКА НА LHC

Труды
объединенного семинара
сотрудничества RDMS CMS



Выпуск 3
2013

151206

Объединенный институт
ядерных исследований
Дубна 2013
ИЯИ БИБЛИОТЕКА

УДК [539.107 + 539.12] (092)
Ф48

Редакционная коллегия:

И. А. Голутвин (председатель), *А. В. Зарубин*, *Г. А. Козлов*, *И. И. Мигулина*,
С. В. Шматов (ученый секретарь)

Фотографии: *В. Е. Жильцов*

Физика на LHC: Труды объединенного семинара сотрудничества
Ф48 RDMS CMS. — Дубна: ОИЯИ, 2013. — Вып. 3. — 113 с.
ISBN 978-5-9530-0366-7

В очередной сборник трудов семинара «Физика на LHC», организованного сотрудничеством России и стран-участниц ОИЯИ эксперимента «Компактный мюонный соленоид» (RDMS CMS), вошли материалы заседаний семинара, посвященные открытию нового бозона в экспериментах на LHC ATLAS и CMS и обнаружению коллективных эффектов в pp - и $PbPb$ -столкновениях на LHC. Отдельная лекция посвящена обсуждению результатов исследований свойств кварк-глюонной материи в соударениях тяжелых ионов на LHC и поиска правого W -бозона и тяжелого нейтрино в эксперименте CMS.

УДК [539.107 + 539.12] (092)

© RDMS CMS, 2013
© Объединенный институт ядерных исследований, 2013

ISBN 978-5-9530-0366-7

Эксперименты на Большом адронном коллайдере (LHC), созданном объединенными усилиями ученых и специалистов из многих стран мира в Европейской организации ядерных исследований (ЦЕРН) в Женеве (Швейцария), нацелены на исследование глубинных проблем современной физики частиц и устранение существующих «белых пятен» в картине понимания фундаментальных законов Природы. Проект научно-экспериментального комплекса CMS (Компактный Мюонный Соленоид) – многофункционального детектора на LHC, крупнейшей из когда-либо создаваемых физических установок, объединяет несколько тысяч ученых из 37 стран.

Важнейшей и неотъемлемой частью этого проекта является Сотрудничество России, Объединённого института ядерных исследований (ОИЯИ, Дубна) и других стран – участниц ОИЯИ – RDMS CMS или просто RDMS. Сотрудничество RDMS CMS объединяет около 300 ученых и обеспечивает ширококомасштабное и долговременное участие физиков России и стран – участниц ОИЯИ в крупнейшем научном проекте современности.

Для широкого научного обсуждения современных проблем физики взаимодействия частиц при высоких энергиях и связанным с ней вопросам космологии сотрудничеством RDMS CMS был организован Объединенный семинар «Физика на LHC». Программа семинара предусматривает подробное освещение физических исследований, планируемых и проводимых на Большом адронном коллайдере, в частности в эксперименте «Компактный мюонный соленоид». В рамках семинара проводятся обзорные лекции для студентов старших курсов, аспирантов и молодых ученых по перечисленным выше направлениям, включая теоретические, экспериментальные, методические, опытно-конструкторские и прикладные исследования.

Руководитель семинара: проф. И.А. Голутвин

Ученый секретарь семинара: к.ф.м.н. С.В.Шматов

Организация семинара предусматривает интерактивное участие ученых, специалистов, аспирантов и студентов из различных научных и образовательных центров с помощью системы видеоконференций. Также предусмотрена трансляция заседаний семинара через интернет.

Информация о семинаре, материалы заседаний, включая видео-запись лекций и электронные версии трудов семинара доступны на интернет-странице семинара <http://rdms.iinj.ru/>

По вопросам участия в семинаре обращаться к ученому секретарю семинара e-mail: Sergei.Shmатов@cern.ch

СОДЕРЖАНИЕ

Экспериментальное обнаружение коллективных эффектов в pp- и PbPb-столкновениях на LHC.....	9
Наблюдение новых двухчастичных корреляций в CMS детекторе (Заявление коллаборации CMS).....	13
<i>В. Л. Коротких</i> “Ридж”-эффект в pp- и PbPb-столкновениях в эксперименте CMS на LHC.....	17
<i>И. П. Лохтин, А. К. Манагадзе, А. М. Сизигрев</i> “Ридж”-эффект и явление выстроенности.....	23
<i>М. Ю. Азаркин, И. М. Дремин, А. В. Леонидов</i> “Струнный хребет” в протон-протонных соударениях на БАК.....	31
<i>И. П. Лохтин</i> Коллективные эффекты в соударениях ионов свинца при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ ТэВ	35
Поиск правого W-бозона и тяжелого нейтрино на БАК (эксперимент CMS).....	39
<i>Н. В. Красников</i> Поиск правого W-бозона и тяжелого нейтрино на БАК (эксперимент CMS).....	43
Открытие нового бозона	51
Презентация результатов по обнаружению нового бозона в экспериментах ATLAS и CMS.....	55
Эксперименты указывают на новую частицу (Пресс-релиз ЦЕРН).....	61
Наблюдение новой частицы с массой 125 ГэВ (Заявление коллаборации CMS).....	63

Поздравление авторов сотрудничества RDMS с наблюдением новой частицы с массой 125 ГэВ.....	71
Последние результаты поиска бозона Хиггса в эксперименте ATLAS (Заявление коллаборации ATLAS).....	77
Исследование свойств кварк-глюонной материи в соударениях тяжелых ионов на LHC.....	85
<i>И.П. Лохтин</i> Исследование свойств кварк-глюонной материи в соударениях тяжелых ионов на LHC.....	89

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ
КОЛЛЕКТИВНЫХ ЭФФЕКТОВ В pp- И PbPb-
СТОЛКНОВЕНИЯХ НА LHC**



Объединённый семинар коллаборации RDMS CMS

Руководитель И. А. Голутвин

Физика на Большом адронном коллайдере

Очередное заседание Семинара состоится 19 января 2011 г. в 15:00 (мск.) в конференц-зале Учебно-научного центра Объединенного института ядерных исследований (ауд.437 здания ЛИТ), Дубна

ПРОГРАММА

«Экспериментальное обнаружение коллективных эффектов в pp- и PbPb-столкновениях на LHC»

Заседание семинара посвящено обсуждению коллективных эффектов в pp- и PbPb-столкновениях, обнаруженных в экспериментах на LHC (ALICE, ATLAS, CMS):

- наблюдение угловых корреляций (ридж-эффект)
- асимметрия выхода струй частиц

Необычность этих эффектов и их возможные новые проявления вызывают повышенный интерес и горячие дискуссии вокруг предлагаемых гипотез об их природе. Во время «круглого стола» ведущие ученые из различных исследовательских центров России (ФИАН, ПИЯФ, ОИЯИ, ИЯИ, ИФВЭ, НИИЯФ МГУ и др.) предложат возможные объяснения наблюдаемых эффектов.

Все желающие приглашаются принять участие в дискуссии.

Принять участие в заседании, задать вопросы и выступить в дискуссии можно в точках двустороннего видеодоступа в ОИЯИ (Дубна), ФИАН (Москва), ИЯИ ("Питомник", Москва), ПИЯФ (Гатчина), ЦЕРН (354-1-A019), ТГУ (Томск), АГУ (Барнаул), КГУ (Кемерово), ОГУ (Омск), НГТУ (Новосибирск), ЯрГУ (Ярославль).

Видеотрансляция семинара осуществляется через систему управления видеоконференцсвязи Томского государственного университета.

Также предусмотрена видео-трансляция Семинара без использования специального оборудования через Интернет: <http://rdms.iinr.ru/webcast/>

Для участия в семинаре обратиться к ученому секретарю семинара С.В. Шматову
т.ф. +7 496 21 63 445, +7 916 353 62 81, ф.ф. +7 41 762 044 647 e-mail: Sergei.Shmato@cern.ch

НАБЛЮДЕНИЕ НОВЫХ ДВУХЧАСТИЧНЫХ КОРРЕЛЯЦИЙ В CMS ДЕТЕКТОРЕ

Заявление коллаборации CMS

Женева, 21 сентября 2011 г.

Коллаборация CMS сегодня направила в печать работу, озаглавленную «Наблюдение дальнедействующих угловых корреляций в адронных взаимодействиях», описывающую новое явление в протон-протонных столкновениях.

При анализе столкновений «высокой множественности», в CMS детекторе, в которых рождаются сотня и более заряженных частиц, было обнаружено, что некоторые из этих частиц определенным образом «скоррелированы» или ассоциированы вместе, рождаясь в точке столкновения.

Было естественным изучить эти корреляции в протон-протонных столкновениях на LHC с наивысшей множественностью, когда плотность рождающихся частиц приближается к той, которая реализуется в столкновениях при высоких энергиях таких ядер, как медь, где подобные эффекты были уже замечены.

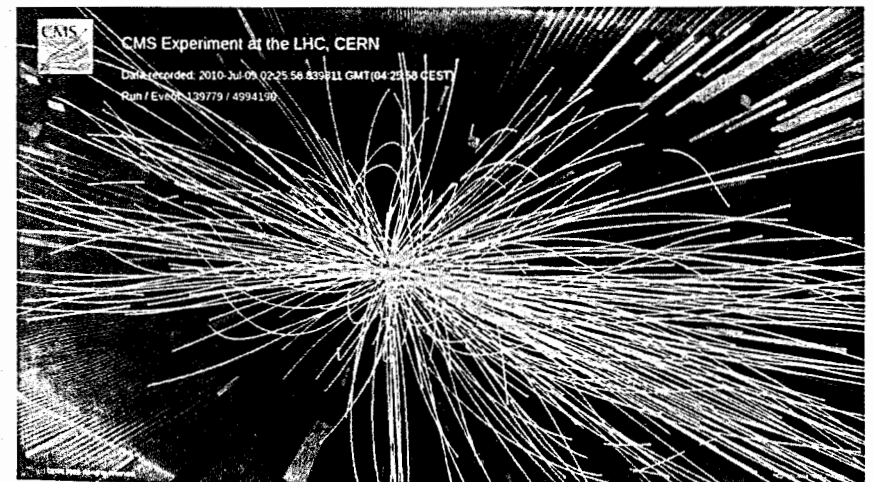


Рис. 1. Как пример, изображение, демонстрирующее протон-протонное столкновение на CMS при энергии 7 ТэВ с образованием более чем 100 частиц.

В представленном в работе анализе были отобраны все пары образующихся в столкновении заряженных частиц и измерены различия в направленности их движения. Эти различия обозначены как $\Delta\eta$ и $\Delta\phi$ ¹.

Для каждой пары была вычислена соответствующая «функция корреляции» (R). Рисунок 2 показывает зависимость R от $\Delta\eta$ и $\Delta\phi$ для среднего типичного столкновения с высокой множественностью.

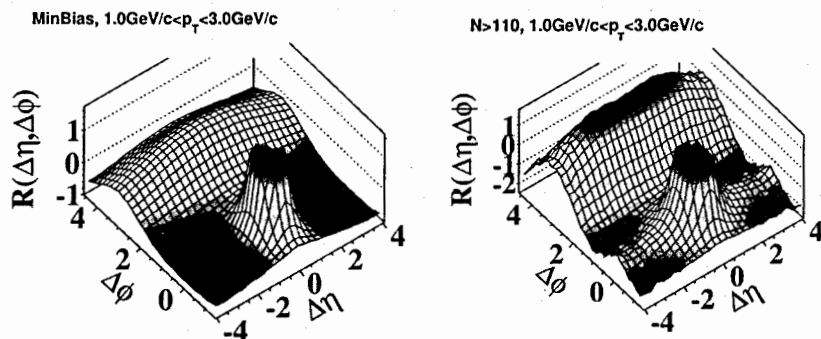


Рис. 2. Вариация R в зависимости от значений $\Delta\eta$ и $\Delta\phi$ для протон-протонных столкновений в CMS. Слева: для средних типичных столкновений. Справа: для столкновений, в которых рождено более 110 заряженных частиц.

Наиболее заметное различие между этими двумя картинками – неожиданное появление на второй из них протяженного «хребта» при $\Delta\phi = 0$ для всех $\Delta\eta$. Это означает, что некоторые пары частиц при больших $\Delta\eta$, удаляясь друг от друга со скоростью света, остаются соориентированными по направлению своего движения вдоль одного и того же азимутального угла ϕ , как если бы частицы были некоторым определенным образом ассоциированы вместе, рождаясь в точке столкновения.

Вот как это комментирует руководитель коллаборации CMS Гвидо Тонелли: «Хотя мы активно искали подобное явление, само его появление в протон-протонных столкновениях было неожиданным и потому оказалось крайне интересным. Дополнительная статистика прольет больше света на природу этого эффекта. Это наблюдение демонстрирует силу и возможности детектора CMS, также как и физиков, его эксплуатирующих. Мы находимся на пути исследования, дюйм за дюймом, новой территории, ставшей доступной благодаря возможностям LHC».

Это первое наблюдение подобного явления в протон-протонных взаимодействиях и возможны различные интерпретации этого эффекта. Хотя однозначного объяснения этого эффекта еще нет, новая структура имеет сход-

ство с явлениями, наблюдаемыми при столкновениях тяжелых ионов на RHIC (Релятивистский тяжело-ионный коллайдер в США), которые интерпретировались как проявление образования горячей и плотной материи в столкновениях релятивистских тяжелых ионов.

Более детальный анализ с увеличенной статистикой будет предпринят для данного класса процессов с высокой множественностью. Рост интенсивности пучков LHC в ближайшие месяцы обеспечит по крайней мере в сто раз большую статистику, что даст возможность досконально изучить обнаруженный эффект и прояснить стоящий за ним механизм явления.

Краткий научный итог работы может быть найден 10.1007/JHEP09(2010)091 (arXiv:1009.4122), а полный текст в <http://cmsinfo.web.cern.ch/cmsinfo/News/2010/QCD-10-002/QCD-10-002.pdf>.

Образы и анимация некоторых из первых столкновений на CMS могут быть найдены на открытом для публики вэб-сайте CMS: <http://cms.cern.ch>.

CMS – один из двух универсальных детекторов на LHC, созданных для поиска новой физики. Он спроектирован, чтобы обнаружить широкий круг новых частиц и явлений в протон-протонных и ядро-ядерных столкновениях при высоких энергиях на LHC и помочь ответить на такие вопросы: «Из чего сделана наша Вселенная и какие в ней действуют силы?» и «Что такое Материя?».

CMS позволит измерить свойства известных нам частиц с беспрецедентной до сих пор точностью, а также вести поиск совершенно новых непредсказуемых явлений. Подобные исследования не только углубят наше понимание того, как устроена и развивается наша Вселенная, но в итоге могут создать новые технологии, которые изменят наш мир, как часто уже оказывалось в прошлом.

Текущая работа LHC продолжится 18 месяцев. Это должно позволить экспериментам на LHC аккумулировать достаточно данных для исследования новой территории, «терра инкогнито», во всех областях, где ожидается новая физика.

Концептуальный проект эксперимента CMS был рожден в далеком 1992 году. Создание гигантского детектора (15 метров в диаметре, почти 29 метров длиной и 14 000 тонн весом) потребовало 16 лет напряженных усилий одной из крупнейших, когда либо существовавших международных научных коллабораций: более 3100 ученых и инженеров из 169 институтов и исследовательских лабораторий в 39 странах, рассеянных по всему миру.

¹ $\Delta\eta$ – угол между треками в горизонтальной плоскости (рис.3, слева)

$\Delta\phi$ – угол между треками в поперечной плоскости (рис.3, справа)

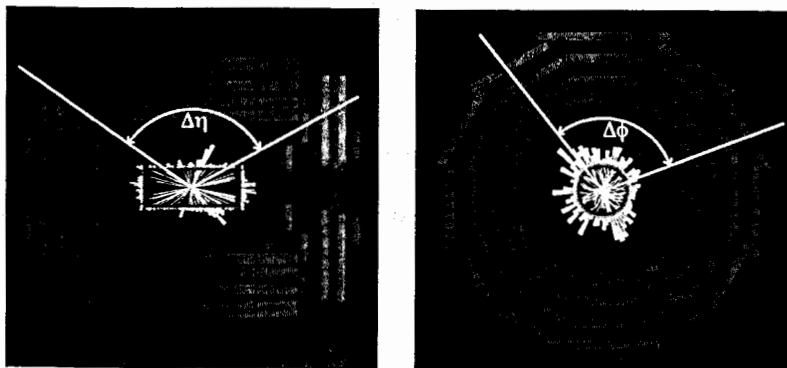


Рис. 3. Система координат установки CMS: (слева) $\Delta\eta$ – угол между треками в горизонтальной плоскости, (справа) $\Delta\phi$ – угол между треками в поперечной плоскости.

“РИДЖ”-ЭФФЕКТ В pp И $PbPb$ СТОЛКНОВЕНИЯХ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ CMS НА LHC

В. Л. Коротких

Научно-исследовательский институт ядерной физики МГУ, Москва

Представлены измерения двухчастичных угловых корреляций в pp - и $PbPb$ -столкновениях в эксперименте CMS на LHC в широком диапазоне псевдобыстроты η и азимутального угла ϕ частицы. При высокой множественности pp -событий с энергией в системе центра масс 7 ТэВ проявляется поразительный эффект “хребта”, получившего название “ридж”-эффекта, для промежуточных значений $p_T = 1-3$ ГэВ/с в кинематической области разностей быстрот $2.0 < |\Delta\eta| < 4.8$ и малых углов $\Delta\phi \approx 0$. Этот эффект наблюдался ранее при 200 ГэВ в экспериментах RHIC и также измерен на CMS при 2.76 ГэВ для $PbPb$ -столкновений. Выполнен Фурье анализ $\Delta\phi$ -распределений до высоких гармоник с $n \leq 5$.

Двухчастичные корреляции являются мощным средством исследования свойств сильновзаимодействующей среды, образуемой при столкновении ультррелятивистских ядер [1–6]. Это исследование дает новую информацию как для коллективных эффектов, так и для жестких процессов КХД. Установка “Компактный мюонный соленоид” (CMS) [7] имеет преимущество перед другими установками на LHC. На уровне регистрации частиц трекером захватывается большая область псевдобыстрот η от -2.4 до $+2.4$. Поэтому возможно исследовать длинно-действующие корреляции по псевдобыстроте до $|\Delta\eta| = 4.8$ [8].

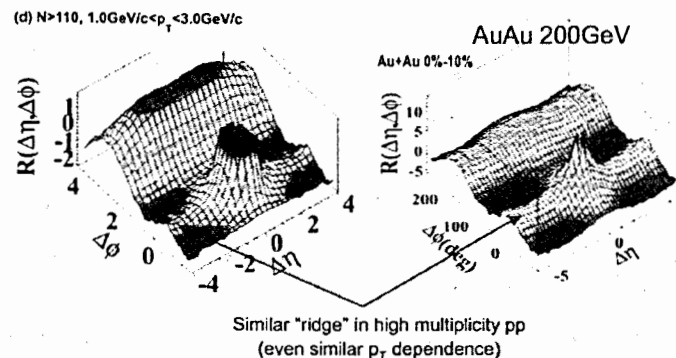


Рис. 1. Сравнение “ридж”-эффекта в (слева) pp -столкновениях при 7 ТэВ в с.ц.м. и (справа) в $PbPb$ -столкновениях при 200 ГэВ/нуклон. $|\Delta\eta| = \eta_1 - \eta_2$, $|\Delta\phi| = \phi_1 - \phi_2$, по оси ординат – нормированный вычитанием фоновый сигнал.

При высокой множественности pp событий с энергией в системе центра масс 7 ТэВ проявляется поразительный эффект “хребта”, получившего название “ридж”-эффекта, для промежуточных значений $p_T = 1-3$ ГэВ/с в кинематической области разностей быстрот $2.0 < |\Delta\eta| < 4.8$ и малых углов $\Delta\phi \approx 0$. Этот эффект наблюдался ранее при 200 ГэВ в экспериментах RHIC и также измерен на CMS при 2.76 ГэВ для $PbPb$ -столкновений (рис.1).

Зависимость от $\Delta\phi$ в pp -столкновениях при промежуточных поперечных импульсах $p_T = 1-3$ ГэВ/с сильно отличается от стандартных моделей типа RYTHIA и это отличие возрастает с ростом множественности (см. рис.2 средние колонки).

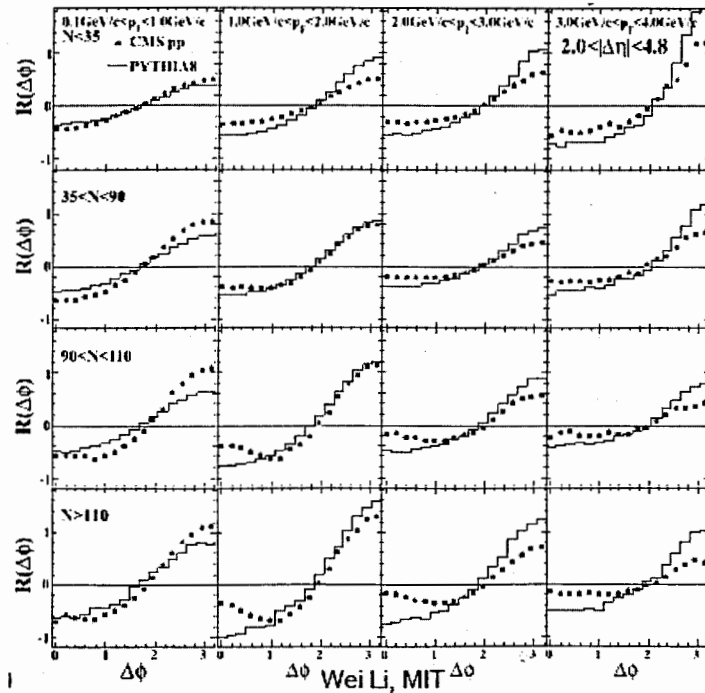


Рис. 2. Двухчастичная корреляция в pp -столкновении в зависимости от $\Delta\phi$ при разных p_T множественности N .

Принято выделять так называемую триггерную частицу, выбирая её по максимальному импульсу с p_T^{trig} и ассоциированную (сопровождающую) с меньшим p_T^{acc} . На рис. 3 показано, что “ридж”-эффект исчезает при больших импульсах триггерной частицы p_T^{trig} .

В $PbPb$ -столкновениях при $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ ГэВ “ридж”-эффект проявляется с еще большей интенсивностью [9]. Кроме того, наблюдается сильная

зависимость от центральности столкновения, усиливающаяся с ростом центральности (рис.4).

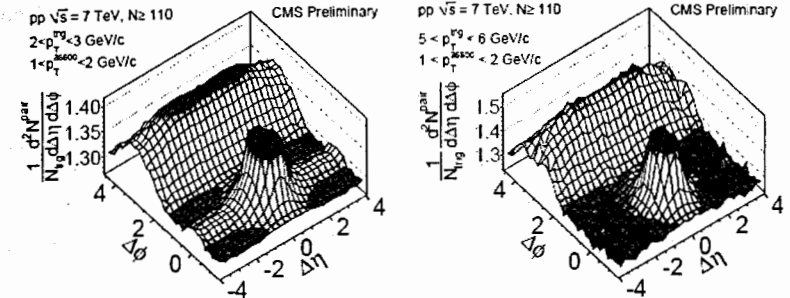


Рис. 3. Изменения при переходе от $p_T^{trig} = 2-3$ ГэВ/с к $p_T^{trig} = 5-6$ ГэВ/с.

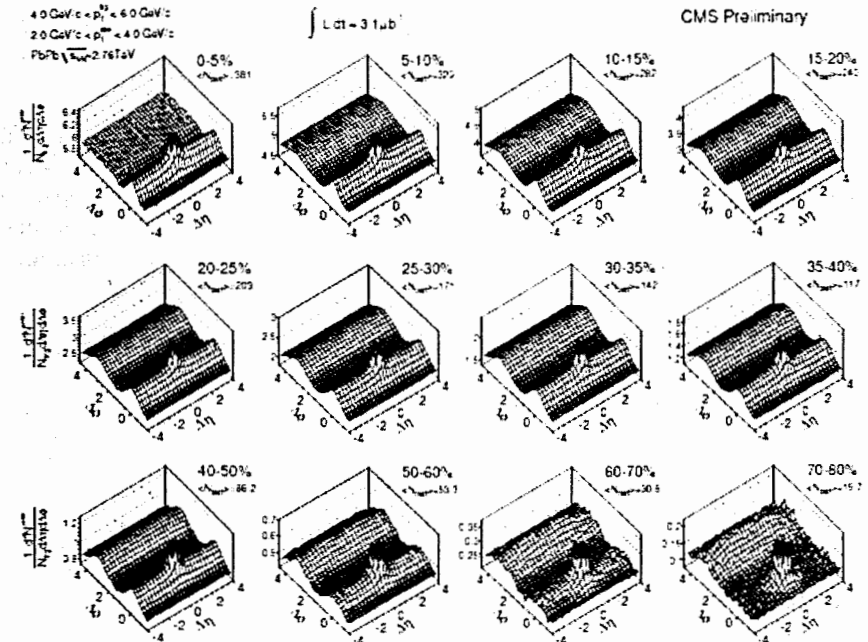


Рис. 4. Распределение выхода пар частиц по $\Delta\eta$ и $\Delta\phi$ для 12 интервалов центральности $PbPb$ -столкновений, указанных процентами. Самые центральные столкновения 0–5%, периферические 70–80%.

В работах [9-12] предложено исследовать “ридж”-эффект с помощью Фурье разложения функции корреляции. Идея состоит в том, что понимание эффекта может быть прояснено за счет вклада высоких гармоник разложения. Из рис.5 видно, что действительно гармоники V_n^f с $n \leq 4$ велики и сильно отличаются от предсказаний стандартной модели РУТНIA.

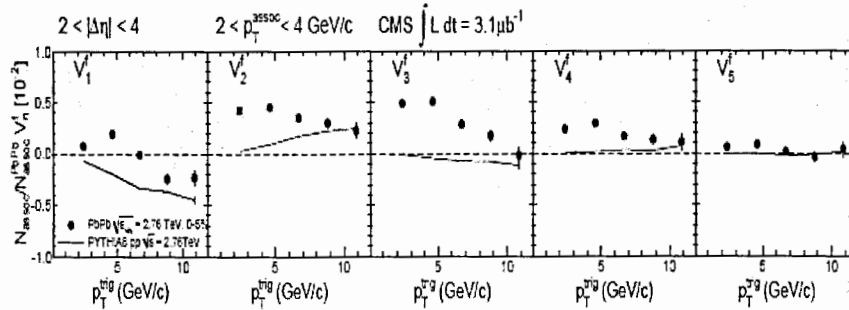


Рис. 5. Фурье коэффициенты функции корреляции в зависимости от p_T^{trig} при $2 < p_T^{acc} < 4$ ГэВ/с для наиболее центральных 0–5% $PbPb$ -столкновений при $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ ГэВ.

Несомненно, новые экспериментальные результаты вызывают сильный интерес теоретиков. Можно сказать, эксперимент по своим результатам идет впереди теории. Пока нет внятного объяснения “ридж”-эффекта ни в pp -, ни в $PbPb$ -столкновениях. Самым интригующим вопросом является повторение “ридж”-эффекта в pp - и $PbPb$ -столкновениях с необходимыми оговорками.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] STAR Collab., Phys. Rev. Lett. **90** (2003) 082302, arXiv:nucl-ex/0210033.
 [2] STAR Collab., Phys. Rev. C **80** (2009) 064912, arXiv:0909.0191.
 [3] PHENIX Collab., Phys. Rev. Lett. **98** (2007) 232302, arXiv:nucl-ex/0611019.
 [4] PHENIX Collab., Phys. Rev. C **78** (2008) 014901, arXiv:0801.4545.
 [5] PHOBOS Collab., Phys. Rev. Lett. **104** (2010) 062301, arXiv:0903.2811.
 [6] PHOBOS Collaboration, Phys. Rev. C **81** (2010) 024904, arXiv:0812.1172.
 [7] CMS Collab., JHEP **09** (2010) 091, arXiv:1009.4122.
 [8] CMS Collab., JINST **0803** (2008) S08004.
 [9] CMS Collab., JHEP **7** (2011) 76, arXiv:1105.2438
 [10] B. Alver and G. Roland, Phys. Rev. C **81** (2010) 054905, arXiv:1003.0194.
 [11] B. H. Alver et al., Phys. Rev. C **82** (2010) 034913, arXiv:1007.5469.

[12] B. Schenke, S. Jeon, and C. Gale, Phys. Rev. Lett. **106** (2011) 042301, arXiv:1009.3244.

[13] D. Teaney and L. Yan, arXiv:1010.1876.

“РИДЖ”-ЭФФЕКТ И ЯВЛЕНИЕ ВЫСТРОЕННОСТИ

И. П. Лохтин, А. К. Манагадзе, А. М. Снигирев

Научно-исследовательский институт ядерной физики МГУ, Москва

Предполагается, что наблюдаемый коллаборацией CMS в столкновении протонов на LHC “ридж”-эффект и наблюдаемое коллаборацией “Памир” в эмульсионных экспериментах с космическими лучами явление выстроенности пятен на пленке есть проявление одного и того же, непонятого пока, механизма возникновения компланарной структуры событий. На основании этой гипотезы и анализа экспериментальных данных предсказывается большой компланарный эффект на LHC в области передних быстрот¹.

ВВЕДЕНИЕ

Главная цель данной работы – показать, что на LHC должна наблюдаться аномально большая анизотропия потока энергии в области передних значений быстрот при условии, что коллаборации CMS и “Памир” наблюдают одно и то же явление, но в разных кинематических условиях. “Ридж”-эффект, т.е., азимутальная скоррелированность адронов с $p_t \sim 1-3$ ГэВ, разделенных большими быстротными интервалами (до $|\Delta\eta| < 4$), был обнаружен CMS коллаборацией в pp -соударениях при $\sqrt{s} = 7$ ТэВ в событиях с высокой множественностью вторичных частиц. Так как коллаборация CMS представила свои данные относительно недавно [1], а их интерпретации посвящено уже большое количество работ в текущей литературе (больше 100 цитирований за последний год согласно INSPIRE), то мы начнем с краткого напоминания сути эксперимента “Памир”, результаты которого недостаточно широко известны, главным образом, из-за давности наблюдения.

ЭКСПЕРИМЕНТ “ПАМИР”

Эксперимент “Памир” использовал для регистрации частиц космических лучей высоких энергий рентгеноэмульсионные камеры большой площади, расположенные в горах Памира на высоте около 4400 м. В этом эксперименте наблюдаемые события (семейства адронов и γ -квантов с выстроенностью) инициируются чаще всего протонами с энергией $\geq 10^4$ ТэВ, взаимодействующими в атмосфере на высоте от нескольких сот метров до нескольких километров над камерой [2, 3]. Интересующие нас продукты столкновения наблюдаются на радиальном расстоянии до нескольких сантиметров в эмульсии с расстоянием между пятнами (разрешением) больше или порядка 1 мм. Эффект выстроенности начинает проявляться в семействах при суммарной энергии наблюдаемой гамма-компоненты $E_\gamma > 0.5$ ПэВ (что приблизительно соответствует энергии взаимодействия $\sqrt{s} \geq 4$ ТеВ).

¹ Авторы посвящают данную работу памяти учителя и соавтора Л. И. Сарычевой, при участии которой был получен ряд результатов, представленных здесь, и которая была по существу инициатором этих исследований.

Для сравнения результатов эксперимента с фиксированной мишенью (эксперимент "Памир") с результатами исследований столкновений на встречных пучках (CMS эксперимент) необходим детальный анализ кинематических соотношений в разных лоренцевых системах отсчета. При анализе удобно параметризовать 4-импульс каждой рассматриваемой частицы i , рожденной в первичном столкновении, через ее поперечный (относительно оси столкновения z) импульс p_{Ti} , азимутальный угол ϕ_i и быстроту η_i в с.ц.м.:

$$p_i^\mu = [\sqrt{p_{Ti}^2 + m_i^2} \operatorname{ch}\eta_i, p_{Ti} \cos\phi_i, p_{Ti} \sin\phi_i, \sqrt{p_{Ti}^2 + m_i^2} \operatorname{sh}\eta_i] \quad (1)$$

В этом случае переход от с.ц.м. к л.с. сводится только к сдвигу быстроты $\xi_i = \eta_0 + \eta_i$, где ξ_i – быстрота частицы i в л.с., а η_0 – быстрота с.ц.м. также в л.с. Если пренебречь дальнейшим взаимодействием частиц в атмосфере (что приведет к оценке степени выстроенности по максимуму), то их положение на пленке в xy -плоскости легко вычисляется:

$$\mathbf{r}_i = \frac{\mathbf{v}_{Ti}}{v_{zi}} h = \frac{\mathbf{p}_{Ti}}{\sqrt{p_{Ti}^2 + m_i^2} \operatorname{sh}(\eta_0 + \eta_i)} h, \quad (2)$$

где \mathbf{v}_{Ti} и v_{zi} – радиальная и продольная компоненты скорости частицы соответственно, $E_i = \sqrt{p_{Ti}^2 + m_i^2} \operatorname{ch}(\eta_0 + \eta_i)$ – энергия частицы в лабораторной системе отсчета.

Так как размер области наблюдения порядка нескольких сантиметров, то эти расстояния должны удовлетворять условиям

$$r_{\min} < r_i, \quad (3)$$

$$r_i < r_{\max}, \quad (4)$$

где $r_{\min} = r_{\text{res}} \approx 1$ мм, $r_{\max} \approx 15$ мм. Условие (3) означает, что пятна не сливаются с центром, формируемым из частиц, летящих вдоль оси столкновения (в основном из области фрагментации налетающего протона). Различимость пятен на пленке накладывает еще одно ограничение на взаимные расстояния между частицами:

$$d_{ij} = \sqrt{r_i^2 + r_j^2 - 2r_i r_j \cos(\phi_i - \phi_j)}, \quad (5)$$

Оно должно быть больше 1 мм:

$$d_{ij} < r_{\text{res}}, \quad (6)$$

в противном случае частицы должны объединяться в одно кластер-пятно, пока не останутся кластеры-частицы со взаимными расстояниями больше 1 мм. При этом координаты этой новой кластера-частицы определяются так же, как и координаты центра масс двух тел в механике: $\mathbf{r}_{ij} = (\mathbf{r}_i E_i + \mathbf{r}_j E_j) / (E_i + E_j)$. Среди кластеров-частиц, удовлетворяющих условиям (3), (4), (6), отбираются 2, ..., 7 с наибольшей энергией, и для них вычисляется выстроенность, которая определяется стандартным образом [3]:

$$\lambda_N = \frac{\sum_{i \neq j \neq k}^N \cos(2\phi_{ijk})}{N(N-1)(N-2)}, \quad (7)$$

с учетом центрального кластера, т.е., $N-1 = 2, \dots, 7$. Здесь ϕ_{ijk} – угол между векторами $(\mathbf{r}_k - \mathbf{r}_j)$ и $(\mathbf{r}_k - \mathbf{r}_i)$ (для центрального пятна $\mathbf{r} = 0$). Этот параметр, изменяющийся от $-1/(N-1)$ до 1, характеризует именно расположение N точек вдоль прямой линии. В случае, например, симметричной и близкой к наиболее вероятной случайной конфигурации трех точек на плоскости (равносторонний треугольник) $\lambda_3 = -0.5$. $\lambda_N = 1$ соответствует предельному случаю, когда все точки лежат строго на прямой линии, в то время как для изотропного распределения $\lambda_N < 0$. Степень выстроенности P_N определяется как доля числа событий с $\lambda_N > 0.8$ [3] от общего числа событий с числом центров в этих событиях не меньше N .

Экспериментально измеренная [4] степень выстроенности представлена на рисунке 1 как функция числа рассматриваемых кластеров N . Для сравнения показаны также результаты нашего моделирования [5, 6], использующего генератор PYTHIA [7], при $\sqrt{s} = 14$ ТэВ. При значениях параметров $r_{\min} = r_{\text{res}} = 1$ мм, $r_{\max} = 15$ мм, $h = 1000$ м, максимально приближенных к условиям эмульсионных экспериментов, оцененная степень выстроенности (сплошная кривая) P_N для N центров значительно выше случайной выборки, но недостаточна (на фактор 3–4), чтобы описать экспериментальные данные [4] даже с учетом их больших ошибок.

Однако при моделировании процесса на значительно меньшей высоте $h \lesssim 50$ м, которая не соответствует оценке (хотя и весьма грубой) коллаборации Памир, появляется сильная зависимость степени выстроенности P_N от минимального поперечного импульса жесткого процесса p_T^{hard} (являющегося параметром в генераторе PYTHIA). Эта зависимость не была заметна при высоте $h = 1$ км, хотя некоторую незначительную тенденцию к росту степени выстроенности с ростом p_T^{hard} при этом можно было бы уловить. Без ограничения снизу на p_T^{hard} результат практически совпадает с полученным ранее (сплошная кривая на рис.1), отражая тем самым некоторые общие свойства струйной структуры жестких событий. При $p_T^{\text{hard}} > 3$ ТэВ частицы от таких жестких струй вместе с частицами, летящими вдоль оси z (в радиусе < 1 мм),

приводят к степени выстроенности (пунктирная кривая), уже сопоставимой с экспериментально наблюдаемой [4].

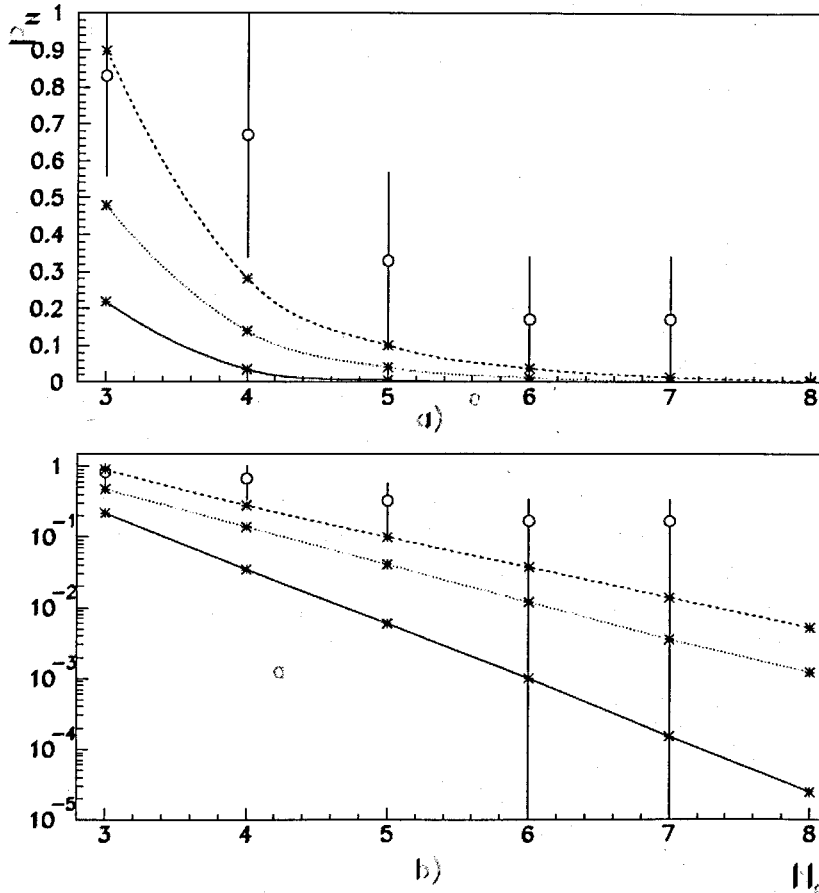


Рис. 1. Степень выстроенности P_N как функция числа кластеров N при $h = 50$ м и $\sqrt{s} = 14$ ТэВ в (а) линейном и (б) логарифмическом масштабах. Сплошная кривая – результат (совпадающий с результатом при $h = 1000$ м) без ограничения на минимальное значение жесткости процесса p_T^{hard} , точечная – при $p_T^{hard} = 300$ ГэВ, штриховая – при $p_T^{hard} = 3$ ТэВ. Точки с ошибками – экспериментальные данные, взятые из работы [4].

Рассмотрим более подробно влияние накладываемых ограничений (3), (4) (попадание на пленку) на спектр отбираемых частиц для вычисления выстроенности. Для частиц с достаточно большими поперечными импульсами p_{Ti} по сравнению с их массами m_i эти условия попадания на пленку (3), (4) приводят, в основном, к ограничению на допустимые скорости частиц в с.ц.м.:

$$r_{\min} < r_i \Rightarrow \eta_i < \eta_{\max} = \ln(r_0/r_{\min}) \cong 4.95, \quad (8)$$

$$r_i < r_{\max} \Rightarrow \eta_i > \eta_{\max} = \ln(r_0/r_{\max}) \cong 2.25, \quad (9)$$

так как в этом случае $r_i \cong r_0/e^{\eta_i}$ при $\eta_0 + \eta_i \geq 1$, где

$$r_0 = 2h/e^{\eta_0} = 2hm_p/\sqrt{s}. \quad (10)$$

Таким образом все ультрарелятивистские частицы ($p_{Ti} \gg m_i$) из интервала быстрот $4.95 \leq \eta_i \leq 9.55$ (в с.ц.м.) образуют один кластер в окрестности $r = 0$ с размером ~ 1 мм в лабораторной системе отсчета при "общепринятой" высоте $h \sim 1000$ м и энергии LHC из-за сильного лоренц-сжатия. Частицы же из промежуточного переднего интервала (8) и (9) ($2.25 \leq \eta_i \leq 4.95$ в с.ц.м.) формируют остальные $(N - 1)$ наиболее энергичные кластеры в лабораторной системе отсчета.

ТОПОЛОГИЯ ВЫСТРОЕННЫХ СОБЫТИЙ В С.Ц.М.

На необычную топологию событий с выстроенностью в с.ц.м., которая позволит легче обнаруживать и отбирать их, было обращено внимание в работе [8]. Был использован тот факт, что несмотря на отсутствие реальных моделей для описания явления выстроенности, частицы от достаточно жестких струй могут имитировать необходимую топологию событий с достаточно большой степенью выстроенности P_N в лабораторной системе наблюдения при некорректной высоте $h \sim 50$ м первичного взаимодействия.

В с.ц.м. события с выстроенностью, генерируемые достаточно жесткими струями, имеют два ярко выраженных пика энерговыделения в пространстве $\eta \times \phi$ (быстрота \times азимутальный угол), которые разделены по азимуту примерно на π . Можно ввести количественную меру, характеризующую такие выбросы энерговыделения, которая позволит обнаруживать и отбирать события с выстроенностью в с.ц.м.:

$$v_2^{p_2} = \frac{1}{N_{\text{event}}} \sum_{\text{event}} \frac{\sum_i p_{Ti}^2 \cos 2(\phi_i - \phi_{\text{axis}})}{\sum_i p_{Ti}^2}, \quad (11)$$

где ϕ_i – азимутальный угол частицы i с поперечным импульсом p_{Ti} . Суммирование ведется по всем рассматриваемым частицам. Экспериментально за направление оси ϕ_{axis} может быть выбрано направление лидирующей частицы в событии. Без весового фактора p_{Ti} наше определение становится

$$v_2 = \frac{1}{N_{event}} \frac{\sum_i \cos 2(\phi_i - \phi_{axis})}{\sum_i \delta_{ii}}, \quad (12)$$

и совпадает с определением коэффициента эллиптической азимутальной анизотропии.

В работе [8] было установлено, что события с высокой степенью выстроенности (в лабораторной системе) характеризуются также высокой степенью анизотропии потока энергии в с.ц.м.:

$$\begin{aligned} v_2^{pT} &\geq v_2^{pT}(p_T^{hard} = 3 \text{ ТэВ}) = 0.98, \\ v_2 &\geq v_2(p_T^{hard} = 3 \text{ ТэВ}) = 0.6 \end{aligned} \quad (13)$$

Здесь стоит отметить, что параметр выстроенности λ_N определен в пространстве $r \times \phi$ (радиальное расстояние \times азимутальный угол) в лабораторной системе отсчета, в то время как коэффициенты эллиптической азимутальной анизотропии v_2^{pT} и v_2 определены в пространстве $p_T \times \phi$ (поперечный импульс \times азимутальный угол) в с.ц.м. λ_N характеризует расположение N точек вдоль прямой линии, в то время как v_2^{pT} и v_2 характеризуют узость выброса энергывыделения, которая является неотъемлемым атрибутом событий с высокой степенью выстроенности (в лабораторной системе) из-за лоренц-инвариантности азимутального угла. Следовательно, в событиях с относительно большими (аномальными) коэффициентами эллиптической азимутальной анизотропии v_2^{pT} и v_2 в с.ц.м. можно ожидать большого значения параметра выстроенности λ_N в лабораторной системе отсчета. Мы предпочитаем использовать v_2^{pT} и v_2 в качестве количественной меры выстроенности в с.ц.м. вместо некоего аналога λ_N в пространстве $p_T \times \phi$ по той простой причине, что радиальное положение частиц r_i на пленке практически не зависит от их поперечного импульса и определяется, главным образом, их быстротой η_i в с.ц.м. (см. (8) и (9)).

ДИСКУССИЯ И ВЫВОДЫ

Теперь можно обсудить, что следует из факта наблюдения явления выстроенности, наших попыток описать это явление через механизм струйного рождения частиц и обнаружения “ридж”-эффекта в эксперименте CMS.

В первую очередь следует отметить, что обе коллаборации наблюдают новые необычные явления, начиная с некоторого порога на энергию первич-

ного взаимодействия: в эксперименте “Памир” это $\sqrt{s} \approx \sqrt{s_{eff}} \approx 4$ ТэВ, в CMS эксперименте – $\sqrt{s} = 7$ ТэВ. Короткоугловые дальние быстрое корреляции были обнаружены коллаборацией CMS только для событий с большой множественностью, что по существу означает наличие порога на выделение поперечной энергии в быстрое интервале $|\eta| \leq 2.4$ (кинематическая область CMS наблюдения). Коллаборация “Памир” явно не декларирует существование аналогичного порога, однако наш анализ показывает [8], что эквивалентный порог на выделение поперечной энергии в быстрое интервале $2.95 < \eta < 5.65$ (кинематическая область эксперимента “Памир”) должен быть. Эта оценка следует из соотношений (8) и (9) при учете того факта, что энергия LHC на данный момент составляет 7 ТэВ, вместо предполагаемой ранее 14 ТэВ. Заметим, что абсолютный интервал быстрое, соответствующий эксперименту “Памир”, в с.ц.м. строго не фиксирован из-за неопределенности в определении высоты первичного взаимодействия. Он может быть сдвинут. Важно, чтобы $\eta_{max} - \eta_{min} \approx 2.7$ в соответствии с изменением радиального расстояния в ~ 15 раз ($r_{max}/r_{min} = 15$) в силу соотношения $r_i \approx r_0/e^{\eta_i}$ (независимо от $r_0(h)$, т.е., высоты).

Наблюдаемый коллаборацией CMS “ридж”-эффект наиболее заметен на границе фазового пространства по $|\Delta\eta|$ т.е., при $\eta \approx 2.4$. Это как раз близко к оцененной нижней границе интервала быстрое, соответствующего эксперименту “Памир” в с.ц.м., для которого эффект компланарности выражен сильнее. При этом обе коллаборации используют совершенно разные переменные, трудно сопоставимые напрямую, чтобы характеризовать наблюдаемые явления, однако для их объяснения необходим механизм возникновения сильной компланарной структуры событий.

Хотя интригующее явление – сильная выстроенность пятен в эмульсионных экспериментах [2], соответствующая компланарному разлету вторичных частиц в акте взаимодействия – было обнаружено около 20 лет назад, сих пор не существует сколь-нибудь удовлетворительного объяснения этому удивительному факту, несмотря на многочисленные попытки (см., например, обзор [9] и ссылки в нем). Наблюдаемый коллаборацией CMS “ридж”-эффект – также в процессе своего объяснения и понимания (более 100 цитирований за последний год, согласно INSPIRE). Таким образом, на данный момент можно констатировать отсутствие реальных моделей (генераторов событий), которые позволили бы сделать детальные предсказания для экспериментов на LHC, основываясь на существующих данных эксперимента “Памир”.

Тем не менее, исходя из гипотезы, что коллаборации CMS и “Памир” наблюдают одно и то же явление, но в разных кинематических условиях, мы предсказываем аномально большие величины (на уровне наших оценок (13)) коэффициентов эллиптической азимутальной анизотропии v_2^{pT} и v_2 в переднем интервале быстрое $2.95 < \eta < 5.65$ для экспериментов на LHC. Эта сильная анизотропия потоков энергии по сравнению с фоновой от струй должна

проявляться, начиная с некоторого порога на выделение поперечной энергии в обсуждаемом интервале быстрот. Предсказание основано только на кинематических соотношениях и топологических аналогиях.

Авторы благодарят А. И. Демьянова, А. Де-Роека, С. В. Молодцова, Р. А. Мухамедшина за полезные обсуждения и дискуссии, а также Н. П. Карпинскую за помощь при подготовке рукописи к печати. Работа выполнена частично при поддержке грантов РФФИ №157 10-02-93118 и № 157 12-02-91505 и ИШ №157 871.2012.2.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] CMS Collab., JHEP **09** (2010) 091.
- [2] Pamir Collab., in Proceedings of the 21st International Cosmic Ray Conference, Adelaide, Australia (1989). Ed. by R. J. Protheroe (University of Adelaide, Australia, 1990), p. 227; S. A. Slvatinsky, in Proceedings of the 5th International Symposium on Very High Energy Cosmic Ray Interactions, Lodz, Poland, 1988}. Ed. by M. Giler (University of Lodz, Poland, 1989), p. 90.
- [3] V. V. Kopcenkin et al., Phys. Rev. D **52** (1995) 2766.
- [4] В. В. Копенкин и др., Изв. РАН Сер. физ. **58** (1994) 13.
- [5] I. P. Lokhtin et al., Eur. Phys. J C **44** (2005) 51.
- [6] I. P. Lokhtin et al., Phys. Atom. Nucl. **69** (2006) 113.
- [7] T. Sjostrand, Comp. Phys. Com. **135** (2001) 238.
- [8] A. De Roeck et al., in Proceeding of the 13th International Conference on Elastic and Diffractive Scattering (Blois Workshop) – Moving Forward into the LHC Era, e-Print: arXiv:1002.3527 [hep-ph].
- [9] R.A. Mukhamedshin, JHEP **05** (2005) 049.

“СТРУННЫЙ ХРЕБЕТ” В ПРОТОН-ПРОТОННЫХ СОУДАРЕНИЯХ НА БАК

М. Ю. Азаркин, И. М. Дремин, А. В. Леонидов

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

Наблюденная коллаборацией КМС на БАК структура “хребта” в событиях с высокой множественностью в pp -соударениях при энергии $\sqrt{s} = 7$ ТэВ [1], возможно, является первым экспериментальным подтверждением существования когерентного механизма множественного рождения частиц в соударениях адронов при высоких энергиях. Наблюдаемая структура корреляционной функции $C(\Delta\eta, \Delta\phi)$ характеризуется дальними корреляциями по псевдобыстроте $\Delta\eta$ и отчетливой локализации по азимутальному углу $\Delta\phi$, центрированной при $\Delta\phi = 0$. Особый интерес представляет возможная связь этого явления с аналогичной структурой, впервые наблюдавшейся на RHIC в соударениях тяжелых ядер при энергии $\sqrt{s} = 200$ ГэВ [2, 3, 4]. В настоящее время предложен ряд вариантов теоретического описания эффекта хребта [5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14]. В этом сообщении, основанном на работе [6], мы покажем, что структура хребта является естественным следствием мягкого механизма рождения частиц адронными струнами.

Идея работы [6] состояла в том, что буст-инвариантное рождение частиц и, как следствие, дальние корреляции по (псевдо)быстроте характеризуют обычный механизм рождения частиц “лундовской” струной [15] на котором, в частности, основано описание мягких процессов рождения частиц в генераторе PYTHIA [16]. Интересно поэтому узнать, не может ли хребет возникнуть при обычном разрыве адронных струн. Прямой ответ на этот вопрос можно получить, отключив все жесткие механизмы рождения частиц в версии PYTHIA 6.4. В этом случае единственными источниками частиц являются две адронные струны, натягивающиеся между соответствующими конструируемыми степенями свободы.

Корреляционная функция $C(\Delta\eta, \Delta\phi)$ была построена с использованием ансамбля событий, сгенерированных в PYTHIA 6.4 при $\sqrt{s} = 7$ ТэВ с ограничениями по псевдобыстроте $2.0 < |\eta| < 4.0$, триггерному поперечному импульсу $p_{\perp}^{tr} = 1.0 - 3.0$ ГэВ, противонаправленному поперечному импульсу $p_{\perp}^{as} = 0.6 - 1.5$ ГэВ и множественности $n^{part} > 12$. Полученная в результате корреляционная функция и соответствующие экспериментальные данные [1] приведена на Рис.1¹. Подчеркнем, что ограничение $n^{part} > 12$ отбирает, для рассматриваемого мягкого струнного механизма рождения частиц, события с высокой множественностью, так что их доля отвечает событиям с $n_{part} > 100$ в [1]. Результат вычисления, представленный на Рис. 1, ясно демонстрирует,

¹ Для удобства мы нормировали экспериментальные данные на теоретическое значение для противонаправленного пика при $\Delta\phi = \pi$.

что стандартный мягкий механизм множественного рождения частиц адронными струнами действительно генерирует структуру хребта с формой, близкой наблюдаемой в эксперименте [1]. Источником дальних корреляций по быстройре является здесь буст-инвариантный характер рождения частиц адронными струнами. Что касается наблюдаемого на Рис. 1 локализованного характера корреляционной функции при $\Delta\phi = 0$, естественным его объяснением служит существование выделенного направления в плоскости прицельного параметра, заданного вектором прицельного параметра для соударяющихся конститuentных степеней свободы для каждой из струн.

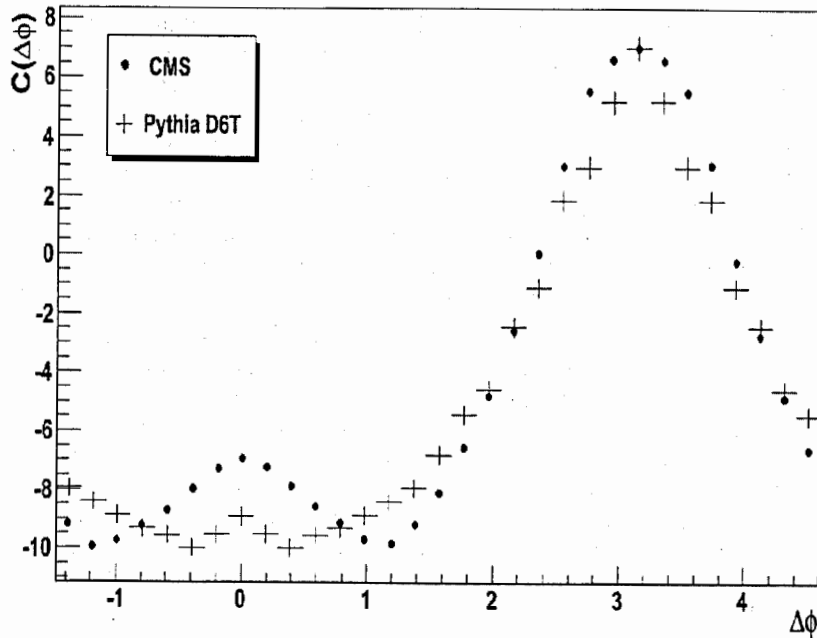


Рис. 1. Сравнение корреляционных функций в эксперименте и Монте Карло: эксперимент (точки), МК (кресты). Результаты МК получены при следующих ограничениях: $2.0 < |\eta| < 4.0$, $p_{\perp}^{tr} = 1.0 - 3.0$ ГэВ, $p_{\perp}^{as} = 0.6 - 1.5$ ГэВ, $n^{part} > 12$, 5.5М событий; данные: $2.0 < |\eta| < 4.8$, $p_{\perp}^{tr} = 1.0 - 3.0$ ГэВ, $p_{\perp}^{as} = 1.0 - 3.0$ ГэВ, $n^{part} > 110$, 354К событий. Экспериментальные данные нормированы на МК значение в противонаправленном пике.

Из проведенного рассмотрения следуют два основных вывода. Во-первых, структура хребта, формируемая стандартными адронными струнами в PYTHIA, весьма слаба и легко разрушается полужесткими механизмами множественного рождения, т.е. тормозным излучением глюонов, струями и т.д.

Во-вторых, для описания величины экспериментального эффекта струнные конфигурации должны быть гораздо более интенсивными, чем адронные струны со стандартным струнным натяжением. Такими конфигурациями могут быть предположительно существующие глазенные токовые трубки [13] или цветные шнуры [17, 18].

ЛИТЕРАТУРА

- [1] V. Khachatryan et al. (CMS Collaboration), JHEP **1009** (2010) 091.
- [2] B. I. Abelev et al. (STAR Collaboration), Phys. Rev. C **80** (2009) 064912.
- [3] A. Adare et al. (PHENIX Collaboration), Phys. Rev. Lett. **104** (2010) 252301.
- [4] B. Alver et al. (PHOBOS Collaboration), Phys. Rev. Lett. **104** (2010) 142301.
- [5] I. M. Dremin and V. T. Kim, Pis'ma v ZhETF **92** (2010) 720.
- [6] M. Yu. Azarkin, I. M. Dremin, A. V. Leonidov, Mod.Phys.Lett. **A26** (2011) 963; Erratum-ibid. **A26** (2011) 1309.
- [7] S. M. Troshin, N. E. Tyurin, Mod.Phys.Lett. **A26** (2011) 4703.
- [8] B. A. Arbuzov, E. E. Boos, V. I. Savrin, Eur. Phys. Journ. C **71** (2011) 1730.
- [9] K. Werner, T. Karpenko, T. Pierog, Phys. Rev. Lett. **106** (2011) 122004.
- [10] K. Werner et al., Phys. Rev. C **83** (2011) 044915.
- [11] R. C. Hwa, C. B. Yang, Phys. Rev. C **83** (2011) 024911.
- [12] E. Levin, A. H. Rezaeian, Phys. Rev. D **84** (2011) 024911.
- [13] A. Dumitru et al., Phys. Lett. B **697** (2011) 21.
- [14] T. A. Trainor, D. T. Kettler, Phys. Rev. C **84** (2011) 024910.
- [15] B. Andersson et al., Phys. Rept. **97** (1983) 31.
- [16] T. Sjostrand, S. Mrenna, P. Skands JHEP **0605** (2006) 026.
- [17] T. S. Biro, H. B. Nielsen, J. Knoll, Nucl. Phys. B **245** (1984) 449.
- [18] V. Topor Pop et al., Phys.Rev. C **83** (2011) 024902.

КОЛЛЕКТИВНЫЕ ЭФФЕКТЫ В СОУДАРЕНИЯХ ИОНОВ СВИНЦА ПРИ ЭНЕРГИИ $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ ТЭВ

И. П. Лохтин

Научно-исследовательский институт ядерной физики МГУ, Москва

Теоретическое и экспериментальное исследование свойств ядерной материи в условиях экстремально высоких температур и плотностей энергии является одной из актуальнейших задач современной физики высоких энергий, вызывающей растущий на протяжении последних двадцати лет научный интерес (см., например, недавний обзор [1]). Достижение деконфайнмента ядерной материи и образование нового состояния вещества - кварк-глюонной материи (КГМ) - предсказывается теорией сильных взаимодействий, квантовой хромодинамикой (КХД), для систем с достаточно высокой температурой (>200 МэВ) или плотностью барионного заряда. Согласно современным космологическим представлениям, кварк-адронный фазовый переход имел место в ранней Вселенной в первые микросекунды после Большого Взрыва. Особую актуальность данная тематика приобрела в связи с началом работы Большого адронного коллайдера (ЛHC) в Европейском центре ядерных исследований ЦЕРН. Эксперименты с пучками тяжелых ионов на ЛHC дают уникальную возможность воссоздания в лабораторных условиях существовавшей на самых ранних стадиях развития Вселенной протоматерии, изучение свойств которой представляет несомненный интерес как с точки зрения понимания природы фундаментальных взаимодействий и происхождения элементарных частиц, так и с точки зрения проверки современных теорий рождения и эволюции Вселенной.

В лабораторных условиях пучки релятивистских ядер впервые были получены в 1970 году на синхрофазотроне ОИЯИ (Дубна) при энергии $E=1-4$ ГэВ на нуклон. Впоследствии ядра были ускорены до высоких энергий и в других ядерных центрах. До начала работы ЛHC уже накоплен значительный экспериментальный материал по различным физическим наблюдаемым в соударениях тяжелых ионов на ускорителе SPS в ЦЕРНе (максимальная энергия пучков свинца в системе центра масс $\sqrt{s_{NN}} = 17$ ГэВ на пару нуклонов) и коллайдере RHIC в Брукхейвенской национальной лаборатории США (максимальная энергии пучков золота $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ на пару нуклонов). Совокупность полученных на RHIC данных (подавление выхода кваркониев и жестких адронов, сильная азимутальная анизотропия потока частиц, дальнедействующие азимутальные корреляции и др.) свидетельствует о проявлении коллективных эффектов на партонном уровне и говорит в пользу гипотезы формирования КГМ в наиболее центральных соударениях тяжелых ионов, хотя возможности альтернативных интерпретаций по-прежнему обсуждаются в научной литературе. При этом измеренные свойства среды согласуются скорее с предположением о формировании сильновзаимодействующей

ющей партонной жидкости, чем предсказываемой решеточными расчетами КХД «слабовзаимодействующей» КГМ.

Энергия столкновений во время сеансов работы LHC с пучками свинца в 2010 и 2011 годах была в 14 раз больше чем на RHIC, что открыло новый режим физики взаимодействий тяжелых ионов, в котором жесткие и полужесткие процессы рождения играют доминирующую роль. Оцениваемая начальная плотность энергии в соударениях ионов свинца на LHC существенно выше, чем на RHIC (и намного выше, чем критическое значение для кварк-адронного фазового перехода), что обуславливает более сильные коллективные эффекты, проявляющиеся в различных новых каналах рождения. При этом свойства образованной в соударениях тяжелых ионов на LHC КХД-материи могут существенно отличаться от свойств созданной на RHIC «кварк-глюонной жидкости», будучи, возможно, ближе к свойствам идеальной КГМ или партонного газа. Важно отметить, что при энергиях LHC можно ожидать проявления коллективных эффектов на партонном уровне не только в ядро-ядерных соударениях, но и в протон-протонных взаимодействиях, первые свидетельства чему (дальнодействующие азимутальные корреляции – т.н. ridge-эффект) уже были получены коллаборацией CMS для pp -событий с высокой множественностью при энергии в $\sqrt{s_{NN}} = 7$ ТэВ [2].

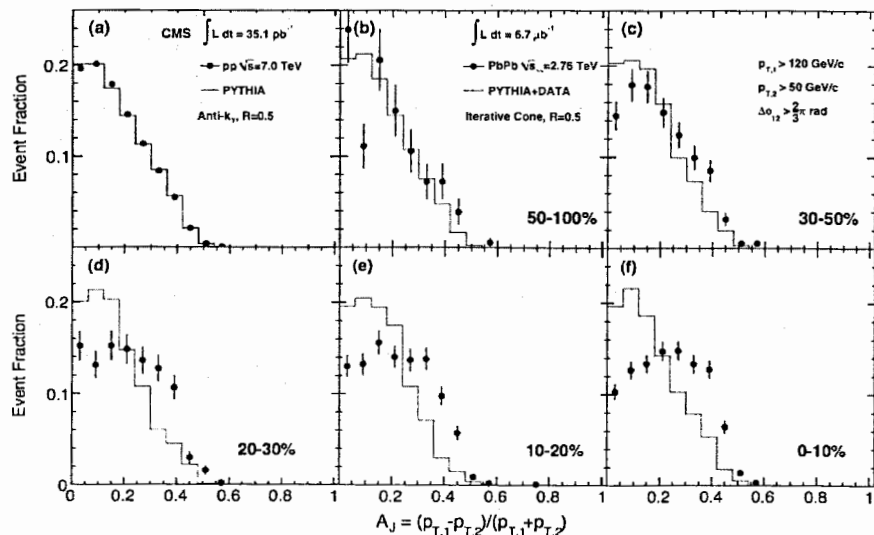


Рис. 1. Распределение по асимметрии энергии пары струй A_J для pp -соударений при $\sqrt{s_{NN}} = 7$ ТэВ (а) и различных центральных столкновений $PbPb$ при $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ ТэВ (б-г). Точки – данные CMS, гистограммы – результаты Монте-Карло моделирования, не учитывающего эффекты плотной среды [5].

В конце 2010 года был проведен первый сеанс работы LHC с пучками ионов свинца при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ ТэВ на пару нуклонов, результаты которого были собраны и проанализированы коллаборациями ALICE, ATLAS и CMS. Этими коллаборациями опубликован ряд научных статей по ряду физических наблюдаемых в соударениях ионов свинца (обзор основных результатов можно найти в [3]). Одним из первых новых коллективных эффектов, свидетельствующих о формировании горячей и плотной среды в соударениях ионов свинца на LHC, стало наблюдение асимметрии энергии в парном рождении струй в экспериментах ATLAS [4] и CMS [5]. Рисунок 1 показывает измеренное CMS распределение по асимметрии энергии пары струй A_J (разность поперечной энергии пары струй, деленная на их сумму) для различных центральных столкновений $PbPb$ и pp -соударений в сравнении с результатами Монте-Карло моделирования, не учитывающего эффекты плотной среды. Значительное увеличение числа несбалансированных по энергии пар струй в центральных столкновениях ионов свинца по сравнению с периферическими $PbPb$ - и pp -соударениями, а также с результатами моделирования, согласуется с гипотезой «гашения» высокоэнергичных адронных струй вследствие многократного рассеяния и потерь энергии кварков и глюонов в высокотемпературной среде.

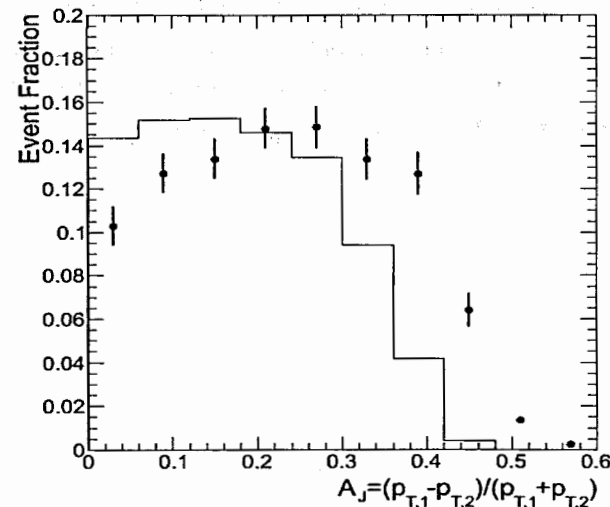


Рис. 2. Распределение по асимметрии энергии пары струй A_J (0-10% центральных столкновений $PbPb$) в соударениях ионов свинца при $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ ТэВ. Точки – данные CMS, гистограммы – результаты модели PYQUEN [6].

Возможной интерпретацией данного эффекта является наличие значительного вклада «широкоугольных» потерь энергии партонов в среде, приводящих к тому, что большая часть энергии излученных в среде глюонов выхо-

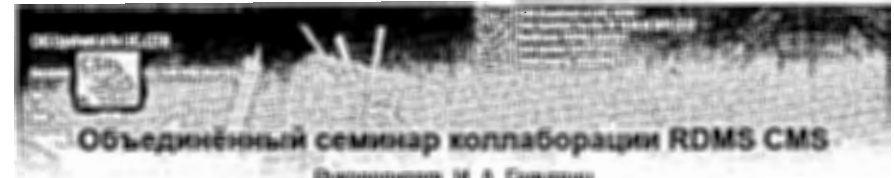
дит за пределы конуса струи. На основе анализа данных CMS по рождению адронных струй в рамках Монте-Карло модели PYQUEN было показано [6], что качественное воспроизведение наблюдаемой разбалансировки энергии пар струй может быть достигнуто в предположении, что доминирующими механизмами потерь энергии жестких партонов в среде является глюонная радиация на большие углы и столкновительные потери (см. рис. 2).

Совокупность результатов, полученных в соударениях ионов свинца на LHC, свидетельствует о формировании горячей среды (поглощающей жесткие партоновые струи) с коллективными характеристиками, качественно близкими к свойствам «кварк-глюонной жидкости», наблюдаемой на RHIC. Однако такая интерпретация является пока весьма предварительной, и дальнейшее экспериментальное и феноменологическое исследование различных процессов множественного рождения частиц в соударениях тяжелых ионов на LHC поможет проявить природу образованной материи.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] И. М. Дремин, А. В. Леонидов, УФН **53** (2011)1123.
- [2] V. Khachatryan et al. (CMS Collaboration), JHEP **1009** (2010) 091.
- [3] B. Muller, J. Schukraft, B. Wyslouch, arXiv:1202.3233 [hep-ex].
- [4] G. Aad et al. (ATLAS Collaboration), Phys. Rev. Lett. **105** (2010) 252303.
- [5] S. Chatrchyan, et al. (CMS Collaboration), Phys. Rev. C **84** (2011) 024906.
- [6] I. P. Lokhtin, A. V. Belyaev, A. M. Snigirev., Eur. Phys. J. C **71** (2011) 1650.

**ПОИСК ПРАВОГО W-БОЗОНА И ТЯЖЕЛОГО
НЕЙТРИНО НА БАК (ЭКСПЕРИМЕНТ CMS)**



Физика на Большом адронном коллайдере

Очередное заседание Семинара состоится 26 октября 2011 г. в 15:00 (мск.) в Конференц-зале Института ядерных исследований РАН («Питомник») по адресу: Москва, Проспект 60-летия Октября, 7-А.

ПРОГРАММА

«Поиск правого W -бозона и тяжелого нейтрино на БАК (эксперимент CMS)»

Докладчик Н.В. Красников (ИЯИ РАН, Москва)

В лекции дается обзор лево-право симметричной калибровочной теории и перспектив поиска тяжелого правого W -бозона и тяжелого нейтрино на детекторе CMS. Обсуждаются последние ограничения на массу правого бозона и тяжелого нейтрино, полученные при анализе данных детектора CMS

Принять участие в заседании, задать вопросы и выступить в дискуссии можно в точках двустороннего видеодоступа в ОИЯИ (Дубна), ФИАН (Москва), ИЯИ («Питомник», Москва), ПИЯФ (Гатчина), ЦЕРН (354-1-019), ТГУ (Томск), АГУ (Барнаул), КГУ (Кемерово), ОГУ (Омск), НГТУ (Новосибирск), ЯрГУ (Ярославль).

Видеотрансляция семинара осуществляется через систему управления видеоконференцсвязи Томского государственного университета.

Также, предусмотрена видео-трансляция Семинара без использования специального оборудования через Интернет: <http://rdms.fnir.ru/webcast>

По вопросам участия в семинаре обращаться к ученому секретарю семинара С.В. Шматову
тел. +7 496 21 63 445, +7 916 353 5234; +41 762 044 647 в mail: Sergei.Shmатов@cern.ch

ПОИСК ПРАВОГО W-БОЗОНА И ТЯЖЕЛОГО НЕЙТРИНО НА БАК (ЭКСПЕРИМЕНТ CMS)

Н.В. Красников

Институт ядерной физики РАН, Москва

После краткого обзора $SU_C(3) \otimes SU_L(2) \otimes SU_R(2) \otimes U(1)$ лево-право симметричной калибровочной модели обсуждается возможность детектирования сигналов от рождения нового калибровочного W_R в pp-столкновениях. Приведены ограничения на массу бозона W_R и тяжелого нейтрино, полученные на основе анализа экспериментальных данных детектора CMS с полной интегральной светимостью $L_{tot} = 240 \text{ pb}^{-1}$.

Одной из основных задач БАК (Большого адронного коллайдера), помимо поиска бозона Хиггса, является поиск новой физики вне рамок Стандартной модели (СМ). В настоящее время существует много расширений СМ, предсказывающих новые наблюдаемые эффекты на БАК [1]. Среди них стоит отметить суперсимметрию, новые дополнительные размерности, а также лево-право симметричную модель (ЛП модель) [2]. Лево-право симметричная модель [2] особенно интересна в связи с тем, что все имеющиеся на сегодня экспериментальные данные убедительно подтверждают гипотезу об осцилляции нейтрино, а, стало быть, нейтрино обладают отличными от нуля и очень маленькими массами. В рамках СМ так называемый "see saw" механизм, основанный на введении дополнительного тяжелого майоранового нейтрино, является наиболее естественным для объяснения малости масс нейтрино. Обычно предполагается, что тяжелые нейтрино являются синглетами калибровочной группы СМ и не имеют новых взаимодействий. С другой стороны, в СМ лево-правая симметрия явно нарушена, что проявляется в существовании левых изодублетов электрослабой $SU_L(2) \otimes U(1)$ калибровочной группы и правых изосинглетов той же электрослабой группы. В свете фундаментальной идеи о спонтанном нарушении симметрии представляется естественным полагать, что наблюдаемое на уровне СМ явное нарушение лево-правой симметрии связано со спонтанным нарушением этой симметрии, а на большом масштабе энергий или на малых расстояниях лево-правая симметрия восстанавливается. Наиболее экономную реализацию идеи о спонтанном нарушении лево-правой симметрии осуществляет минимальная ЛП (лево-право симметричная калибровочная модель), основанная на калибровочной группе $SU_C(3) \otimes SU_L(2) \otimes SU_R(2) \otimes U(1)$ [2], причем на большом масштабе эта калибровочная группа нарушена до калибровочной группы $SU_C(3) \otimes SU_L(2) \otimes U(1)$ СМ. Относительно $SU_L(2) \otimes SU_R(2) \otimes U(1)$ калибровочной группы левые фермионы являются дублетами калибровочной $SU_L(2)$ группы, тогда как правые фермионы являются дублетами $SU_R(2)$ калибровочной группы. ЛП модель с необходимостью включает в себя дополнительные правые нейтрино, являющиеся партнерами правых заряженных лептонов.

Минимальный набор полей Хиггса включает в себя хиггсовский бидублет, который на уровне СМ представляет собой совокупность из двух дублетов Хиггса, один из которых взаимодействует посредством ненулевой юкавской константы связи с верхними фермионами левого изодублета, а другой изодублет связан с нижними фермионами. Кроме того, для нарушения правой калибровочной группы и существования лево-правой симметрии необходимо наличие в модели двух триплетов Δ_R и Δ_L . Ненулевое вакуумное среднее правого триплета Δ_R приводит к нарушению $SU_C(3) \otimes SU_L(2) \otimes SU_R(2) \otimes U(1)$ калибровочной группы до калибровочной группы $SU_L(2) \otimes SU_R(2) \otimes U(1)$ СМ, в то время как ненулевые вакуумные средние хиггсовского бидублета ответственны за спонтанное нарушение $SU_L(2) \otimes U(1)$ калибровочной симметрии СМ до электромагнитной калибровочной симметрии $U(1)$. ЛП модель предсказывает существование новых тяжелого заряженного правого W_R бозона, тяжелого нейтрального бозона Z' и правых нейтрино N_k ($k = 1, 2, 3$) для каждого поколения кварков и лептонов.

С точки зрения поиска этих новых частиц на БАК наиболее перспективно изучение двух реакций рождения $pp \rightarrow W_R \rightarrow l + N_i + X$, $pp \rightarrow Z' \rightarrow N_i + N_i + X$, с последующими распадами тяжелых нейтрино $N_i \rightarrow l + j_1 + j_2$ на заряженные лептоны и минимум две адронные струи. В ЛП модели в силу специфики хиггсовского сектора, ответственного за нарушение правой калибровочной симметрии $SU_R(2) \otimes U(1)$, масса бозона Z' приблизительно в 1.7 раза больше массы правого W_R бозона, поэтому реакция $pp \rightarrow W_R \rightarrow l + N_i + X$ с последующим распадом $N_i \rightarrow l + j_1 + j_2$ наиболее предпочтительная при поиске экспериментальных проявлений лево-правой калибровочной симметрии на БАК. Как следствие, мы ожидаем наличие в конечном состоянии двух заряженных лептонов и минимум двух адронных струй. Основной фон от реакций СМ связан с рождением топ-антитоп кварк-антикварковой пары с последующим их распадом на лептоны и адронные струи, а также с процессом Дрелла-Яна $pp \rightarrow (Z^* \rightarrow ll) + \geq 2 \text{ hadronic jets}$. Кроме того, необходимо учитывать инструментальный фон, возникающий, когда мы ошибочно путаем адронную струю с заряженным лептоном. Как следствие каскадного распада заряженного правого бозона $W_R \rightarrow lN \rightarrow lljj$, распределение инвариантной массы двух лептонов и двух адронных струй $M_{inv}(lljj)$ обладает резонансной структурой с максимумом вблизи M_{WR} . Кроме того, как следствие распада тяжелого нейтрино $N_i \rightarrow l + j_1 + j_2$, резонансная структура должна присутствовать в распределении инвариантной массы одного из лептонов и двух адронных струй $M_{inv}(lj_j)$ с максимумом вблизи массы тяжелого нейтрино M_{N_i} . Эти обстоятельства очень помогают при поиске правого бозона W_R и тяжелого нейтрино на основе сигнатуры с двумя заряженными лептонами и двумя адронными струями.

В работе [3] изучался поиск заряженного бозона W_R и тяжелого нейтрино на БАК для детектора Компактный мюонный соленоид (CMS) на основе сигнатуры с двумя заряженными лептонами и двумя адронными струями. Анализировались экспериментальные данные 2010 года и первой половины 2011 года с полной интегральной светимостью $L_{tot} = 240 \text{ pb}^{-1}$ и полной энергией сталкивающихся протонов $E_{с.ц.м.} = 7 \text{ ТэВ}$. Изучались моды с двумя электронами и двумя мюонами в конечном состоянии, плюс минимум две адронные струи. Никаких указаний на существование правого бозона W_R и тяжелого нейтрино не было найдено. Были получены новые, рекордные по сравнению с ускорителем TEVATRON, ограничения на массу правого бозона W_R и тяжелого нейтрино. Так, например, при массе тяжелого нейтрино приблизительно вдвое меньшего чем масса правого бозона W_R , масса тяжелого бозона $M_{WR} \geq 1600 \text{ ГэВ}$. На графиках (1-6) представлены полученные ограничения на массы бозона W_R и тяжелого нейтрино. Мы ожидаем, что обработка всех экспериментальных данных 2011 года позволит приблизительно в полтора раза улучшить полученные нами ограничения.

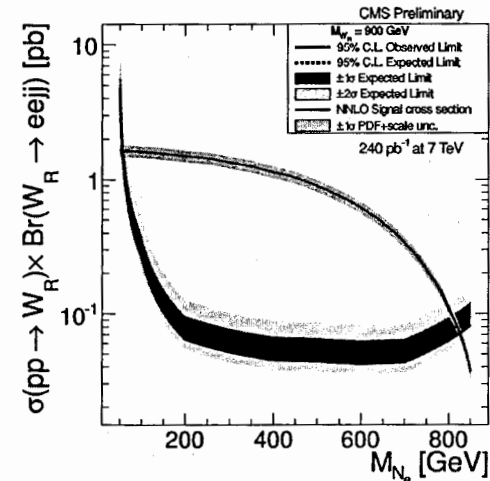


Рис. 1. Ограничение сверху на сечение рождения правого бозона W_R в зависимости от массы тяжелого электронного нейтрино при $M_{WR} = 900 \text{ ГэВ}$.

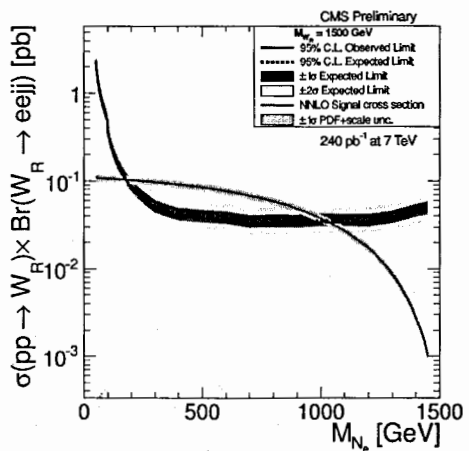


Рис. 2. Ограничение сверху на сечение рождения правого бозона W_R в зависимости от массы тяжелого электронного нейтрино при $M_{WR} = 1500$ ГэВ.

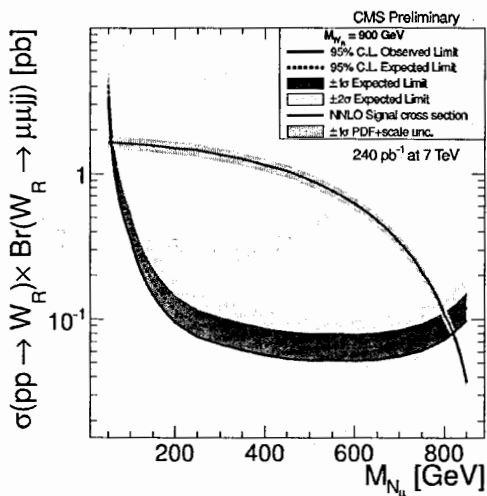


Рис. 3. Ограничение сверху на сечение рождения правого бозона W_R в зависимости от массы тяжелого мюонного нейтрино при $M_{WR} = 900$ ГэВ.

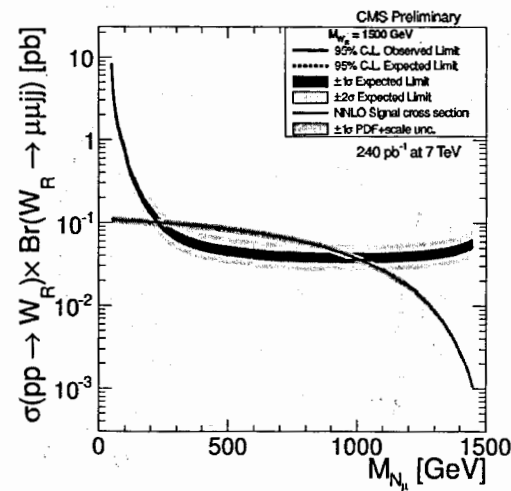


Рис. 4. Ограничение сверху на сечение рождения правого бозона W_R в зависимости от массы тяжелого мюонного нейтрино при $M_{WR} = 1500$ ГэВ.

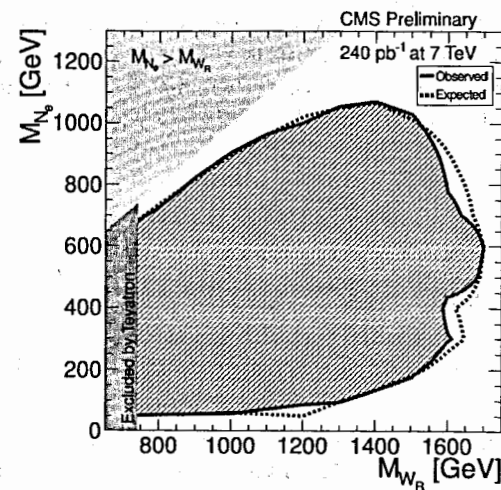


Рис. 5. Ограничения на массы W_R и тяжелого электронного нейтрино на 95 процентном уровне достоверности для ЛП модели. Массы внутри эллипса исключены.

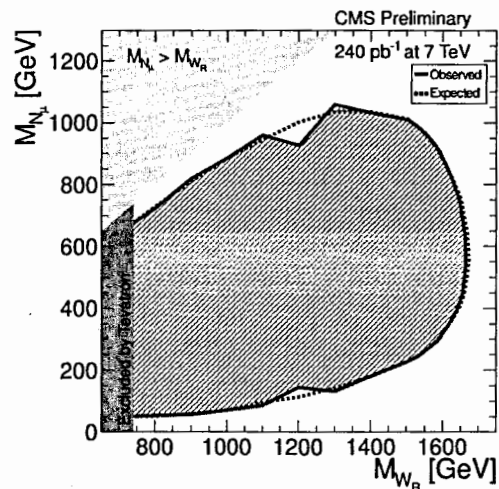


Рис. 6. Ограничения на массы W_R и тяжелого мюонного нейтрино на 95 процентном уровне достоверности для ЛП модели. Массы внутри эллипса исключены.

В этом кратком обзоре на примере поиска правого заряженного бозона W_R и тяжелого нейтрино мы продемонстрировали, насколько большие возможности, по сравнению с предыдущими ускорителями, дает БАК для поиска физики вне рамок СМ. Будем надеяться, что в последующие годы БАК откроет новую физику вне рамок СМ. Работа поддержана грантом РФФИ 10-02-00468а.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Н.В. Красников и В.А. Матвеев, "Новая физика на Большом адронном коллайдере", Издательство "КРАССАНД", Москва, 2011.
- [2] J.C. Pati and A. Salam, Phys. Rev. D 10, 275 (1974); R.N. Mohapatra and J.C. Pati, Phys. Rev. D 11, 366 (1975); G. Senjanovic and R.N. Mohapatra, Phys. Rev. D 12, 1502 (1975).
- [3] CMS Collaboration, "Search for a heavy neutrino and right-handed W of the left-right symmetric model in pp collisions at 7 TeV", CMS Note 3011/131 (2011).

ДИСКУССИЯ ПОСЛЕ ДОКЛАДА

ИЯИ РАН, Москва

Вопрос: В экспериментах на Тэватрон предпринимались попытки обнаружения правых калибровочных бозонов и в распадах на пару кварк-антикварк. Вероятность существования подобных распадов влияют и на вероятность полуплеptonных распадов, соответственно, уменьшая пределы на нейтринные моды распадов. Проводились ли подобные исследования в CMS?

Н.В.: В CMS проводился независимый поиск объектов, которые образуются в слиянии кварка и антикварка, а также распадаются на парку кварк-антикварк, т.е. исследовалась возможная резонансная структура в спектре двухструйных событий. В настоящий момент ограничения на массу W_R в этом канале составляет 1.5 ТэВ. В наших исследованиях мы использовали "бренчинги" распадов, зависящие как от вероятности распадов по другим каналам, так и от массы тяжелого нейтрино. Например, если масса тяжелого нейтрино слишком мала, то угол разлета между двумя струями, на которые распадается нейтрино, настолько незначителен, что невозможно провести идентификацию двух независимых струй и, соответственно, провести анализ по инвариантной массе. И, в свою очередь, когда масса тяжелого нейтрино приближается к массе правого бозона, то его "бренчинг" распада на лептон и две струи очень мал.

ФИАН, Москва

Вопрос: Существует ли радикальное отличие в доступных для измерения в эксперименте масс правых бозонов и тяжелого нейтрино при проектной энергии столкновения протонов при 14 ТэВ и текущей энергии 7 ТэВ и светимости?

Н.В.: Ожидаемое сечение рождения будет в несколько раз больше и, соответственно, массовый передел будет увеличен как минимум в два раза. Соответственно идея проведения поиска в данном канале останется такой же.

ЦЕРН, Женев

Вопрос: Если будет найден правый калибровочный бозон с массой в районе два ТэВ и тяжелое нейтрино с массой один ТэВ, то даст ли это какие-нибудь сведения о наличии бозона Хиггса в этом калибровочном секторе?

В.Н.: В принципе, масса бозона Хиггса не может очень сильно отличаться от массы калибровочных бозонов. В данной модели предсказываются дважды заряженные бозоны Хигга и их масса не может отличаться от массы найденных новых калибровочных более чем в два раза. Это означает, что и подобные бозоны Хиггса могут быть обнаружены на LHC.

Вопрос: А если бозона Хиггса не существует, что будет с моделью?

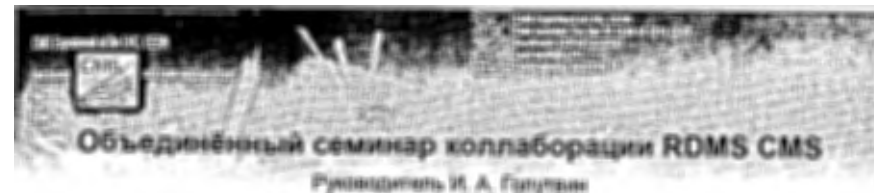
В.Н.: Это означает, что модель неправильна.

ОИЯИ, Дубна

Вопрос: Зачем для подобных поисков нужна высокая светимость? При той же самой энергии столкновений, что Вам даст увеличение интегральной светимости до 5 фбн^{-1} (в 25 раз).

В.Н.: У нас в 25 раз увеличится число событий, что даст возможность увеличить доступный предел на массу нового бозона.

ОТКРЫТИЕ НОВОГО БОЗОНА



Физика на Большом адронном коллайдере

Очередное заседание Семинара состоится 04 июля 2012 г. в 10:30 (мск.) в Доме международных совещаний Объединённого института ядерных исследований, Дубна.

Программа

- Открытие семинара проф. И.А. Голутвин
- Приветствие дирекции ОИЯИ акад. В.А. Матвеев
- Трансляция научного семинара в CERN, на котором будут представлены последние результаты экспериментов ATLAS и CMS по поиску бозона Хиггса.
- Трансляция пресс-конференции в CERN с участием дирекции CERN, руководителей международных коллабораций и представителей средств массовой информации.
- Планируются сеансы прямой связи с CERN

4 июля 2012 г. Европейская организация по ядерным исследованиям (CERN) проводит научный семинар посвященный последним результатам экспериментов ATLAS и CMS по поиску бозона Хиггса http://press.web.cern.ch/press/PressReleases/Releases2012/PR16_12E.html.

Для научных сообществ ATLAS и CMS семинар является первым мероприятием по представлению своих результатов по данным LHC 2012 г., более подробное обсуждение ожидается на конференции ICHEP в Мельбурне. К настоящему времени ускоритель успешно обеспечил набор трети из запланированного на 2012 г. объема данных, которые были проанализированы ATLAS и CMS.

Сотрудничества ATLAS и CMS, каждое из которых объединяет более 3000 исследователей из почти 180 институтов и научных организаций всего мира, организуют презентацию своих результатов в различных странах для ознакомления широких кругов научной общественности, средств массовой информации и всех заинтересованных лиц и организаций.

Принять участие в заседании, задать вопросы и выступить в дискуссии можно в точках двустороннего видеодоступа в ОИЯИ (Дубна), ФИАН (Москва), ИЯИ ("Питомник", Москва), ПИЯФ (Гатчина), ЦЕРН (Main Auditorium), ТГУ (Томск), АГУ (Барнаул), КГУ (Кемерово), ОГУ (Омск), НГТУ (Новосибирск), ЯрГУ (Ярославль).

Видеотрансляция семинара осуществляется через систему управления видеоконференцсвязи Томского государственного университета.

Также предусмотрена видео-трансляция Семинара без использования специального оборудования через Интернет: <http://rdms.iinr.ru/webcast>

По вопросам участия в семинаре обращаться к ученому секретарю семинара С.В. Шматов, тел. +7 496 21 63 445, +7 916 353 52 21, +41 762 044 647, e-mail: Sergei.Shmатов@cern.ch

ПРЕЗЕНТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ПО ОБНАРУЖЕНИЮ НОВОГО БОЗОНА В ЭКСПЕРИМЕНТАХ ATLAS И CMS

Очередное заседание объединенного семинара "Физика на LHC", организованного сотрудничеством институтов России и стран-участниц ОИЯИ в эксперименте "Компактный мюонный соленоид", состоялось 4 июля в Доме международных совещаний ОИЯИ (ДМС). По системе видеоконференционной связи ДМС был связан с Санкт-Петербургским институтом ядерной физики в Гатчине и Европейским центром ядерных исследований (ЦЕРН) в Женеве. Трансляция семинара велась через интернет в различные научные центры России и страны-участницы ОИЯИ, университеты Москвы, Санкт-Петербурга, Ярославля, Минска, Новосибирска, Томска, Твери и других городов.

Заседание приурочено к научному семинару, проходившему в ЦЕРН и предварявшему важнейшую конференцию по физике частиц ICHEP2012 в Мельбурне. Для научных сообществ ATLAS и CMS семинар стал первым мероприятием по представлению результатов по поиску бозона Хиггса на объединенных экспериментальных данных 2011–2012 гг.

Семинар в Дубне открыл его руководитель, председатель сотрудничества RDMS, профессор Игорь Анатольевич Голутвин. Он напомнил об истории объединенного семинара RDMS CMS и рассказал об пути, который LHC и эксперимент CMS прошли за 27 месяцев, начиная от момента запуска коллайдера 30 марта 2010 г. С приветствием к участникам обратился вице-директор ОИЯИ профессор Михаил Григорьевич Иткис. Он отметил большой вклад ОИЯИ в подготовку экспериментов на LHC, и особо подчеркнул его огромную интеллектуальную составляющую, которую внесли ученые и специалисты ОИЯИ, их активное участие в проведении сеансов на коллайдере в Женеве, сборе и обработки информации.

Открывая первый сеанс прямой связи из ЦЕРН с дубненской аудиторией, перед началом эпохального семинара руководитель проекта CMS в ОИЯИ Анатолий Вадимович Зарубин отметил, что дубненские ученые вместе с коллаборацией прошли долгий 20-летний путь от разработки концепции CMS в 1992 и создания экспериментального комплекса, до регистрации первых протон-протонных столкновений и получения первых физических результатов. И наконец, сегодня ожидается представление новых результатов по поиску бозона Хиггса, являющихся наиболее значимыми для современной науки.

Открывая первый сеанс прямой связи из ЦЕРН с дубненской аудиторией, перед началом эпохального семинара руководитель проекта CMS в ОИЯИ Анатолий Вадимович Зарубин отметил, что дубненские ученые вместе с коллаборацией прошли долгий 20-летний путь от разработки концепции

CMS в 1992 и создания экспериментального комплекса, до регистрации первых протон-протонных столкновений и получения первых физических результатов. И наконец, сегодня ожидается представление новых результатов по поиску бозона Хиггса, являющихся наиболее значимыми для современной науки.

Комментируя значение события, академик РАН Валерий Анатольевич Рубаков, в частности, отметил, что сегодня тот день, который мировая научная общественность ожидала многие годы – сегодня может быть получен первый ответ на вопрос: “существует ли скалярная частица, которую называют бозоном Хиггса или что-то другое стоит за механизмом нарушения электрослабой симметрии?” “Это, конечно же, безумно интересно,” – поделился своими впечатлениями В. А. Рубаков – “ажиотаж здесь огромный, заполнены не только все аудитории, куда транслируется семинар, кругом стоят огромные экраны, съехалось множество физиков со всех уголков мира и все стремятся принять участие в этом мероприятии. Я смотрю на это событие и с точки зрения перспективы. Ясно, что эпопея только начинается, первые самые грубые представления, как устроен бозон Хиггса, как он взаимодействует, мы, наверное, сегодня узнаем. Но, с одной стороны, также предстоит выяснить много деталей, а с другой, существование относительно легкого скалярного бозона – это еще не доказательство, что механизм, который был предложен, работает. И предстоит еще разобраться, как именно устроено нарушение электрослабой симметрии, какой именно механизм ответственен за это нарушение. Это – задача будущего, которую придется решать многие годы, в основном на Большом адронном коллайдере, но возможно для этой цели придется создавать и другую установку”.

До начала семинара в ЦЕРН руководитель эксперимента CMS в 2010–2011 гг. (именно в это время были получены первые указания на существование новой частицы с массой около 125 ГэВ) Гвидо Тоннели поделился своими ожиданиями с российской частью участников заседания от предстоящего события:

Приглашая Гвидо Тонелли, руководителя эксперимента CMS в 2010–2011 гг., поделиться своими ожиданиями от предстоящего события, А. В. Зарубин подчеркнул, что благодаря огромным усилиям Гвидо стали возможными и сегодняшние события, и семинар, и главное получение и представление важного результата, поскольку именно в это время были получены первые указания на существование новой частицы с массой около 125 ГэВ. Гвидо Тонелли, обращаясь к российской части участников заседания, рассказал: “Прежде всего, я очень счастлив сегодня, возможно я самый счастливый физик на Земле в этот момент. Причину вы узнаете через пару часов, сейчас я могу сказать, что это очень важный день для эксперимента CMS, для нашей

области науки и в том числе для физиков России, которые сделали очень многое для получения этих результатов. Они внесли большой вклад как в создание эксперимента CMS, его эксплуатацию и получение данных, так и в проведение физического анализа. Многие результаты, представляемые сегодня, не были бы возможными без вклада российских физиков, в том числе и молодежи. Я не могу сказать большего до официального представления результатов, но отмечу, что еще в декабре прошлого года наши результаты демонстрировали указание на возможное существование бозона Хиггса Стандартной модели в районе массы 125 ГэВ. И цель сегодняшнего семинара ответить на вопрос – действительно ли два эксперимента (ATLAS и CMS) подтверждают эти результаты на большем объеме данных. Теперь я направляюсь в переполненную главную аудиторию ЦЕРН, куда выстроилась очередь из тысячи молодых людей, которые занимали места еще со вчерашнего вечера и провели целую ночь в ожидании этого события”.

В 11 часов в режиме реального времени началась трансляция научного семинара в ЦЕРН и пресс-конференции с участием дирекции, руководителей международных коллабораций и представителей средств массовой информации. На семинар были приглашены авторы идеи спонтанного нарушения электрослабой симметрии по “механизму Хиггса” – физики Джеральд Гуральник, Карл Хаген, Питер Хиггс и Франсуа Энглер, появление которых в аудитории было встречено бурными аплодисментами.

Генеральный директор ЦЕРН Рольф Дитер Хойер, руководитель эксперимента CMS Джо Инкандела (эксперимент CMS) и руководитель эксперимента ATLAS Фабиола Джианотти (ATLAS) представляют интригующие результаты – оба эксперимента увидели явные признаки наличия новой частицы в области масс 125 ГэВ. Результаты объединенного анализа данных 2011 и 2012 гг. подтвердили результаты, представленные экспериментами в декабре 2011 г., когда были получены первые сигналы существования новой частицы со статистической значимостью 2–3 стандартных отклонения. В новом представленном анализе локальная статистическая значимость достигла 4.9 и 5.0 стандартных отклонений в детекторах CMS и ATLAS. Распад новой частицы наблюдается в трех независимых каналах – распадах на пары калибровочных бозонов ($\gamma\gamma$, ZZ и WW). Наблюдение двух фотонов в конечном состоянии указывает на то, что новая частица является бозоном, а не фермионом, и ее спин не может быть равным 1.

Семинар в ЦЕРН завершился пресс-конференцией, на которой дирекция ЦЕРН (генеральный директор Р. Д. Хойер, директор по научной работе Серджио Бертолуччи и директор по ускорителям Стив Майерс) и руководители экспериментов ATLAS и CMS ответили на вопросы прессы.

Открывая второй сеанс прямой связи из ЦЕРН с дубненской аудиторией, А. В. Зарубин отметил, что этот день безусловно войдет в историю физи-

ки и будет отмечен красной датой яркого открытия в физическом календаре. На сегодня мы уже знаем, что новая частица – это бозон с массой около 125 ГэВ. Но впереди огромная работа по измерению спина и четности, определения констант связи, уточнения массы. Блестящая работа БАК вселяет уверенность, что через год мы приблизимся к полноте понимания ответов на эти вопросы. На специальной встрече с российскими физиками и прессой представители руководства CMS Гвидо Тоннели, Тициано Кампорези и Жоа Варела прокомментировали состоявшееся открытие:

Жоа Варела: “Сегодня действительно особый день для всех нас. Мы все очень взволнованы, трудно сохранять спокойствие в такой момент. Факт открытия новой частицы неоспорим. Во время семинара и пресс-конференции все могли в этом убедиться. Я не буду говорить больше об этой частице, является ли она бозоном Хиггса или нет, что это означает для физики частиц (мое мнение – многое). Сейчас я хочу воспользоваться случаем и от имени коллаборации CMS сердечно поблагодарить наших коллег из сотрудничества институтов России и стран-участниц ОИЯИ. Я все еще помню, как в 1992 г. вместе с первым руководителем CMS Мишелем Делла Негра приехал в Москву, чтобы пригласить российских ученых принять участие в эксперименте CMS. У меня сохранились очень хорошие воспоминания от этой поездки. И я думаю, что эксперимент не достиг бы всего этого без тесного сотрудничества многих стран, в том числе России и ОИЯИ. И я хотел бы еще раз поблагодарить всех вас за действительно большой вклад в этот эксперимент”.

Тициано Кампорези: “Я думаю, что, прежде всего, надо поздравить всю коллаборацию. Мы все живем в исторический момент, который мы все будем помнить. Мы были вовлечены в поиски бозона Хиггса последние двадцать лет и сейчас большие усилия институтов CMS и физиков CMS завершились успехом. И я хотел бы отметить основополагающую роль RDMS, это конгломерат институтов, сформированный вокруг Дубны, сыграл ключевую роль в создании эксперимента, что сделало сегодняшний успех возможным”.

Гвидо Тоннели: “Сейчас мы имеем объект, который мы называем бозон Хиггса, этот объект имеет массу в районе 125 ГэВ, а его свойства еще предстоит изучить в деталях – измерение констант связи, уточнение массы, ширины. К другому важному моменту относится понимание Природы объекта – является ли он в точности тем, что предсказывает Стандартная модель. Этот объект может дать нам указания, что происходит на масштабах ТэВ и далее”.

В. А. Рубаков подвел итог состоявшегося открытия: “Во-первых, экспериментальным коллективам удалось сделать сильный рывок по сравнению с предыдущим годом, когда были получены первые указания на существова-

ние новой частицы. Это впечатляет. Я не ожидал, что будет объявлено об открытии. Была проделана фантастическая работа за такое короткое время. Мне, как теоретику, удивительно, что бозон Хиггса оказался, насколько мы сегодня видим, именно таким, как предсказывает Стандартная модель. Надо привыкать к этому знанию, потому что это идет в разрез с тем, что не только я, но и многие мои коллеги-теоретики представляли. Механизм Хиггса, механизм спонтанного нарушения симметрии, который предсказывает такую легкую с понятными свойствам скалярную частицу, бозон, очень наивный. И примеры спонтанного нарушения симметрии из физики твердого тела совершенно не такие наивные, не такие простые. И это наталкивало долгое время на мысль, что должна быть более интересная нетривиальная динамика, но сейчас выясняется, что ничего подобного нет. Во всяком случае, по тем характеристикам, что сейчас просматриваются видно что-то очень простое, похожее на механизм со скалярным полем с потенциалом в виде “мексиканской шляпы”. Эти свойств конечно же просматриваются очень приблизительно, это – первые результаты, первые данные, которые согласуются с предсказаниями Стандартной модели. Точность этого согласия пока еще не очень высока и, конечно, задача ближайших десятилетий будет состоять в том, чтобы разобраться в деталях со свойствами этой частицы, с тем, как именно нарушается электрослабая симметрия. Поэтому сегодняшнее обнаружение открывает нам дальнейшую перспективу и перспективу интересную.”



В заключение семинара проф. И. А. Голутвин зачитал заявление коллаборации CMS о наблюдении новой частицы с массой 125 ГэВ, а главный ученый секретарь ОИЯИ проф. Н. А. Русакович озвучил заявление коллаборации ATLAS и пресс-релиз ЦЕРН.

ЭКСПЕРИМЕНТЫ ЦЕРН УКАЗЫВАЮТ НА НОВУЮ ЧАСТИЦУ

Пресс-релиз ЦЕРН

Женева, 4 июля 2012

На семинаре, проведенном сегодня в ЦЕРН и предвещающим важнейшую конференцию по физике частиц ICHEP2012 в Мельбурне, эксперименты ATLAS и CMS представили свои последние предварительные результаты по поиску долгожданной частицы Хиггса. Оба эксперимента увидели явные признаки наличия новой частицы в области масс около 126 ГэВ.

"Мы наблюдаем значительное превышение событий, на уровне 5 сигма, в области масс около 126 ГэВ. Выдающиеся возможности LHC и ATLAS, а также огромные усилия многих людей, привели нас к этому захватывающему моменту", сказала руководитель эксперимента ATLAS Фабиола Джанотти, "но сейчас необходимо еще немного времени для подготовки публикации этих результатов".

"Полученные результаты являются предварительными, но наблюдаемый сигнал в 5 сигма очень впечатляющий. Если это действительно новая частица, то мы знаем, что это должен быть бозон, и это будет самая тяжелая из подобных когда-либо найденных частиц", заявил руководитель эксперимента CMS Джо Инкандела. "Последствия этого весьма значительны, и именно по этой причине мы должны быть очень тщательны во всех наших исследованиях и перекрестных проверках".

"Трудно остаться равнодушным к этим результатам", говорит директор по исследованиям ЦЕРН Серджио Бертолуччи. "В прошлом году мы анонсировали, что в 2012 году новая хиггсоподобная частица будет найдена, либо бозон Хиггса Стандартной модели будет исключен. Со всей осторожностью, мне кажется, что мы находимся в переломной точке - наблюдение этой новой частицы указывает путь в направлении более глубокого понимания того, что мы видим в данных".

Результаты, представленные сегодня, основаны на данных 2011 и 2012 годов и являются предварительными – анализ данных 2012 г. все еще продолжается. Публикация показанных сегодня результатов ожидается примерно в конце июля. Более полная картина сделанных на сегодняшний день наблюдений проявится в этом году несколько позже, уже после того как эксперименты на LHC наберут больший объем данных.

Следующим шагом будет определение Природы этой частицы и ее значения для нашего понимания Вселенной. Является ли она бозоном Хиггса, предсказанным в 1964 году, который представляет собой завершающий недостающий компонент Стандартной модели физики элементарных частиц? Или это

что-то более экзотическое? Стандартная модель описывает элементарные частицы, из которых состоим мы и все видимые вещи во Вселенной, а также взаимодействия между ними. Однако, все, что мы можем видеть, составляет не более 4% от общей массы Вселенной. Более экзотические версии частицы Хиггса могут быть мостом для понимания 96% оставшейся части Вселенной, что остается на сегодняшний день неясным.

"Мы достигли важной вехи в нашем понимании Природы", указал генеральный директор ЦЕРН Рольф Хойер. "Наблюдение частицы, согласующейся с гипотезой бозона Хиггса, открывает путь к более детальным исследованиям, требующим большей статистики, которая позволит точно определить свойства новой частицы, и, скорее всего, пролить свет на другие тайны Вселенной».

Изучение характеристик новой частицы потребует значительного времени и большего объема данных. Но какими бы свойствами частица Хиггса ни обладала, наши знания о фундаментальной структуре материи обогатятся.

НАБЛЮДЕНИЕ НОВОЙ ЧАСТИЦЫ С МАССОЙ 125 ГЭВ

Заявление коллаборации CMS

ЦЕРН, 4 июля 2012

Резюме

Сегодня, на совместном семинаре в ЦЕРН и на конференции "ICHEP 2012 [1] в Мельбурне исследователи эксперимента Компактный мюонный соленоид (CMS) на Большом адронном коллайдере (LHC) представили предварительные результаты по поиску бозона Хиггса стандартной модели (SM) на основе данных, набранных до июня 2012 года.

CMS наблюдает превышение событий при значении массы приблизительно 125 ГэВ [2] со статистической значимостью пять стандартных отклонений (5 сигма) [3] над ожидаемым фоном. Вероятность того, что наблюдаемый сигнал является флуктуацией фона, равна один на три миллиона. Самое значимое подтверждение наблюдается в двух конечных состояниях с наилучшим массовым разрешением: во-первых, в канале с двумя фотонами в конечном состоянии, и, во-вторых, в канале с двумя парами заряженных лептонов - (электроны или мюоны). Мы интерпретируем это, как рождение ранее не наблюдавшейся частицы с массой около 125 ГэВ.

Данные CMS также исключают существование бозона Хиггса стандартной модели в диапазонах масс: 110–122.5 ГэВ и 127–600 ГэВ с уровнем статистической достоверности 95% [4]. Меньшие значения масс были ранее исключены на коллайдере LEP в ЦЕРН с таким же уровнем статистической достоверности.

В пределах статистической и систематической погрешностей результаты поиска по нескольким каналам совместимы с ожидаемой гипотезой бозона Хиггса стандартной модели. Однако необходим больший объем данных, чтобы установить, обладает ли новая частица всеми свойствами бозона Хиггса стандартной модели, или же некоторые свойства не совпадают, что указывает на новую физику за пределами стандартной модели.

LHC продолжает работу во впечатляющем темпе. К концу 2012 года CMS рассчитывает более чем утроить общий объем набранных на сегодняшний день данных. Эти данные позволят CMS пролить свет на природу этой новой зарегистрированной частицы, а также расширить другие исследования, направленные на поиск новой физики.

Стратегия поиска CMS

Коллаборацией CMS проанализирован полный набор экспериментальных данных в протон-протонных столкновениях, набранных в 2011 году, а в 2012 году до 18 июня включительно. Накопленная в 2011 и 2012 годах интеграль-

ная светимость равна 5.1 фбн^{-1} при энергии 7 ТэВ в системе центра масс и 5.3 фбн^{-1} при энергии 8 ТэВ.

Стандартная модель предсказывает короткоживущий бозон Хиггса, распадающийся на другие хорошо известные частицы. Эксперимент CMS исследовал пять основных каналов распада хиггсовского бозона. Три канала распада – на пару бозонов ($\gamma\gamma$, ZZ или WW) и два канала – на пару фермионов ($b\bar{b}$ или $\tau\bar{\tau}$). Здесь γ означает фотон, Z и W являются переносчиками слабого взаимодействия, b – это прелестный кварк а τ – это тау лептон. При поиске бозона Хиггса с массой 125 ГэВ чувствительность каналов $\gamma\gamma$, ZZ и WW приблизительно одинакова. В целом, они более чувствительны, чем каналы распада на пару $b\bar{b}$ и $\tau\bar{\tau}$.

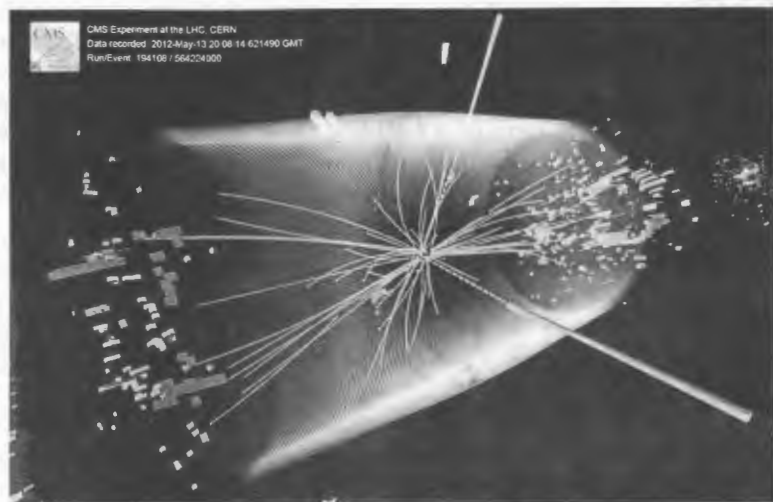


Рис. 1. Событие, зарегистрированное детектором CMS в 2012 г. при энергии 8 ТэВ в системе центра масс протон-протонных столкновений. Событие показывает ожидаемый характерный распад бозона Хиггса стандартной модели на пару фотонов (пунктирные желтые линии и зеленые “башни”). Событие также может быть известным фоновым процессом стандартной модели.

Каналы $\gamma\gamma$ и ZZ очень важны, поскольку оба они позволяют измерить массу новой частицы с высокой точностью. В канале $\gamma\gamma$ масса определяется из энергий и направлений двух высокоэнергетических фотонов, измеряемых кристаллическим электромагнитным калориметром установки CMS (ECAL, Рис. 1). В канале ZZ масса определяется из распада пары γ -бозонов на две па-

ры электронов или мюонов, либо на пары электронов и мюонов (Рис. 2). Они измеряются внутренним трекером, электромагнитным калориметром и мюонными камерами.

WW -канал является более сложным. Каждый γ -бозон определяется по его распаду на электрон и нейтрино, или мюон и нейтрино. Нейтрино не регистрируется при прохождении через детектор CMS, поэтому бозон Хиггса стандартной модели проявляется не как узкий пик, а как превышение числа событий в широком диапазоне масс. Канал $b\bar{b}$ имеет большой фон от процессов стандартной модели, поэтому при анализе исследуются события, в которых бозон Хиггса рождается совместно с W - или Z -бозонами, распадающимися на электрон(ы) или мюон(ы). Канал $\tau\bar{\tau}$ измеряется по распадам τ на электроны, мюоны и адроны.

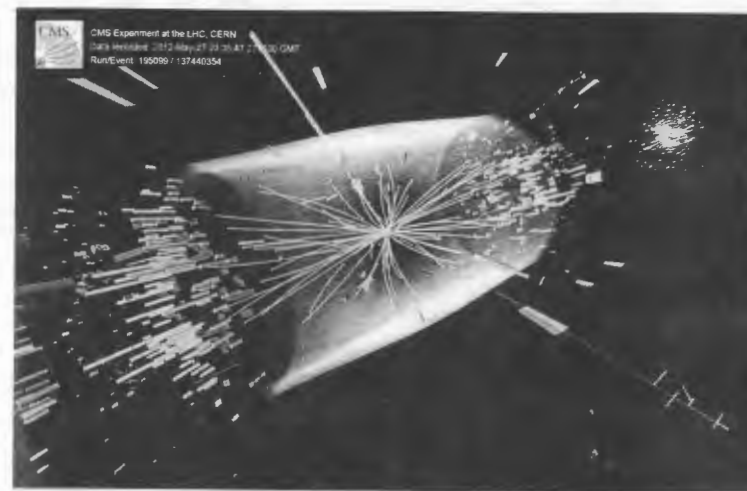


Рис. 2. Событие, зарегистрированное детектором CMS в 2012 г. при энергии 8 ТэВ в системе центра масс протон-протонных столкновений. Событие показывает ожидаемый характерный распада бозона Хиггса стандартной модели на пару γ -бозонов, один из которых в свою очередь распадается на пару электронов (зеленые линии и зеленые “башни”), а другой – на пару мюонов (красные линии). Событие также может быть известным фоновым процессом стандартной модели.

Описание результатов CMS

В случае, если бозон Хиггса не существует, экспериментальных данных CMS вполне достаточно, чтобы полностью исключить его существование в области масс 110–600 ГэВ на уровне статистической достоверности 95%. Фактически, данные CMS исключают существование бозона Хиггса стандартной

модели в двух широких массовых диапазонах: 110–122.5 ГэВ и 127–600 ГэВ на уровне статистической достоверности 95%.

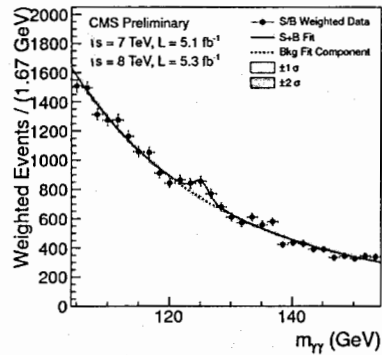


Рис. 3. Распределение пары фотонов ($\gamma\gamma$) по инвариантной массе для данных CMS 2011 и 2012 (черные точки с ошибками). Данные “взвешены” с учетом отношения сигнал-фон для каждой категории событий. Сплошная красная линия показывает фит сигнала и фона, прерывистая линия – фит только фона.

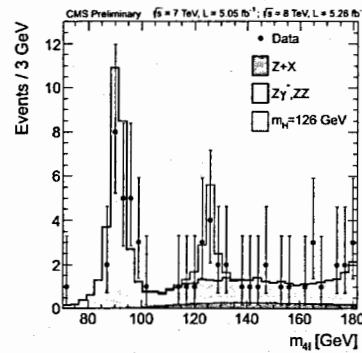


Рис. 4. Массовое распределение черты-рехлептонных реконструированных событий в каналах $4e$, 4μ и $2e 2\mu$. Точками показаны данные, закрашенной гистограммой представлен фон, а не закрашенной гистограммой – ожидаемый сигнал. Приведены совместные измерения для данных, набранных при энергии 7 ТэВ и 8 ТэВ.

Область 122.5–127 ГэВ не может быть исключена, так как мы наблюдаем превышение числа событий в трех из пяти проанализированных каналах:

- **канал $\gamma\gamma$:** массовое распределение пары фотонов $\gamma\gamma$ показано на Рис. 3. В нем наблюдается превышение числа событий над уровнем фона при значении массы в районе 125 ГэВ со значением статистической значимости 4.1 сигма. Наблюдение двух фотонов в конечном состоянии указывает на то, что новая частица является бозоном, а не фермионом, и ее спин не может быть равным 1.
- **канал ZZ :** Рис. 4 показывает массовое распределение четырехлептонных событий (две пары электронов, или две пары мюонов, или пара электронов и пара мюонов). С учетом их угловых характеристик превышение числа событий над уровнем фона при значении массы в районе 125 ГэВ составляет 3.2 сигма.
- **канал WW :** наблюдается широкое превышение событий над фоном в массовом распределении на уровне 1.5 стандартных отклонений.

- **канал $b\bar{b}$ и канал $\tau\bar{\tau}$:** не наблюдается превышения событий.

Статистическая значимость превышения сигнала над уровнем фона при совместном анализе данных по всем пяти каналам (Рис. 5) составляет 4.9 сигма. Совместный анализ только по двум наиболее чувствительным и высокоточным каналам ($\gamma\gamma$ и ZZ) обеспечивает статистическую значимость наблюдаемого эффекта 5.0 сигма. Вероятность флуктуации фона на такую величину оценивается как $1/3000000$.

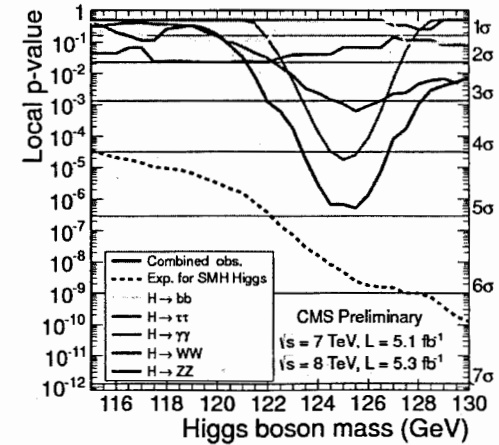


Рис. 5. Вероятность (p -value) флуктуации фона до наблюдаемого количества событий в данных CMS в зависимости от массы для пяти основных каналов. Черная линия показывает комбинированную величину p -value для всех каналов.

Масса новой частицы определена без учета каких-либо предположений об относительных вероятностях мод распада и составляет 125.3 ± 0.6 ГэВ. Измеренная вероятность образования новой частицы (σ_{DAT}) находится в согласии с предсказанной величиной вероятности образования бозона Хиггса стандартной модели (σ_{SM}): $(\sigma_{DAT})/(\sigma_{SM}) = 0.80 \pm 0.22$.

Большие усилия были направлены на детальное изучение характеристик детектора, отбор событий, оценку фона и других возможных источников систематических и статистических погрешностей. Анализ данных 2011г. [6] показал превышение событий над фоном в районе 125 ГэВ. Поэтому, чтобы избежать возможной систематической ошибки в методике отбора событий и не «усилить» искусственно эффект 2011г., данные 2012 г. обрабатывались как бы «вслепую» [7]. Это означает, что массовый диапазон, где ожидалось наличие превышения числа событий, не исследовался, пока не были досконально изучены и утверждены критерии обработки данных.

В целях перепроверки полученных результатов обработка данных велась по крайней мере двумя независимыми группами ученых. Ими были получен ряд свидетельств, усиливающих достоверность полученных результатов:

- Превышение событий наблюдается в районе 125 ГэВ как по данным 2011 г. (7 ТэВ), так и по данным 2012 г. (8 ТэВ);
- Превышение наблюдается в обоих каналах высокого разрешения ($\gamma\gamma$ и ZZ);
- Превышение в каналах WW согласуются с предположением о существовании частицы с массой 125 ГэВ;
- Превышение наблюдается в каналах распада, имеющих в конечном состоянии фотоны, электроны, мюоны и адроны.

Предварительные результаты, представленные сегодня, будут доработаны для опубликования в конце лета.

Планы на будущее

Новая частица, наблюдающаяся со значением массы в районе 125 ГэВ, с ограниченной статистической точностью совместима с гипотезой бозона Хиггса стандартной модели. Тем не менее, требуются дополнительные данные для измерения ее свойств, таких как вероятности распада в различных модах ($\gamma\gamma$, ZZ , WW , $b\bar{b}$ и $\tau\bar{\tau}$) и, в перспективе, определении спина и четности для однозначного установления, действительно ли новая частица является бозоном Хиггса стандартной модели, или же это наблюдение сигнала новой физики за пределами стандартной модели.

LHC продолжает свою работу чрезвычайно успешно. К концу 2012 года CMS рассчитывает более чем утроить общий объем набранных на сегодняшний день данных и, благодаря этому, продолжить исследование природы новой частицы. Если она действительно окажется бозоном Хиггса стандартной модели, то ее свойства и значение для стандартной модели будут подробно изучены. Если же это не бозон Хиггса стандартной модели, то CMS займется изучением новой физики, что подразумевает возможность исследования и дополнительных новых частиц на LHC. В любом случае, будет продолжаться поиск новых частиц или сил, которые могут наблюдаться в будущих сеансах LHC при более высоких энергиях и интенсивностях сталкивающихся пучков.

О CMS

Более подробную информацию можно найти на сайте CMS: <http://cern.ch/cms> или обращайтесь cms.outreach@cern.ch

CMS является одним из двух многоцелевых экспериментов на LHC, которые были созданы для поиска новой физики. Он предназначен для регистрации

широкого спектра частиц и обнаружения явлений, возникающих в протон-протонных взаимодействиях и взаимодействиях тяжелых ионов на LHC. CMS поможет ответить на такие вопросы, как: "Из чего на самом деле состоит Вселенная и какие силы действуют в ее пределах?" и "Что дает всему массу?" Эксперимент изучает свойства известных частиц с беспрецедентной точностью, а также осуществляет поиск совершенно новых, не предсказанных явлений. Такие исследования не только улучшают наше понимание того, как функционирует Вселенная, но, в конечном итоге, могут вызвать технологический прорыв, который изменит наш мир, как это часто бывало в прошлом.

Концептуальный проект эксперимента CMS датируется 1992 годом. Строительство гигантского детектора (15 м диаметром, около 29 м в длину и весом 14000 тонн) потребовало 16 лет усилий от одной из крупнейших международных научных коллабораций, существовавших когда-либо: 3275 физиков (в том числе 1535 студентов) из 41-ой страны, а также 790 инженеров и техников, из 179 институтов и исследовательских лабораторий, расположенных по всему миру.

Ссылки

[1] ICHEP – 36-я Международная конференция по физике высоких энергий, Мельбурн, Австралия, 4–11 июля, 2012. Результаты будут представлены совместно на двух мероприятиях: персонально в ЦЕРН и по видеосвязи в режиме реального времени на ICHEP.

[2]. Электрон-вольт (эВ) – единица энергии. $1 \text{ ГэВ} = 1.000.000.000 \text{ эВ}$. В физике элементарных частиц, где масса и энергия часто взаимозаменяемы, общепринятой единицей массы является $\text{эВ}/c^2$ (из соотношения $E = mc^2$, где c – скорость света в вакууме). Еще более распространено использование так называемой «естественной системы единиц», в которой скорость света равна единице (и, соответственно, $E = m$), и эВ является так же и единицей массы.

[3] Стандартное отклонение описывает распределение набора измерений вокруг среднего значения. Оно может быть использовано для количественного описания степени несовместимости набора данных с заданной гипотезой. Физики выражают стандартное отклонение в единицах, называемых σ ("сигма"). Чем больше величина σ , тем более несовместимы данные с выбранной гипотезой. Обычно, чем более неожиданное открытие, тем большее значение σ требуется для его подтверждения.

[4]. Уровень статистической достоверности (CL) соответствует проценту независимых статистических тестов с результатом в указанном диапазоне. Например, 95% уровень значимости означает, что результат измерения будет находиться в указанном диапазоне в 95% случаев.

[5] <http://news.stanford.edu/news/2004/july21/femtobarn-721.html>

[6] <http://cms.web.cern.ch/news/cms-search-standard-model-higgs-boson-lhc-data-2010-and-2011>

[7] <http://cms.web.cern.ch/news/blinding-and-unblinding-analyses>

ПОЗДРАВЛЕНИЕ АВТОРОВ СОТРУДНИЧЕСТВА RDMS С НАБЛЮДЕНИЕМ НОВОЙ ЧАСТИЦЫ С МАССОЙ 125 ГЭВ

Руководитель коллаборации CMS Д. Инкадела,
председатель сотрудничества RDMS CMS И. А. Голутвин
(от имени коллаборации CMS)



To the RDMS authors of the 'Observation of a new
boson with mass near 125 GeV' article



Armenia: ANI: S.Chatrchyan, V.Khachatryan, A.Sirunyan, A.Tumanyan. Belarus: NCFHEP: V.Chekhovsky, I.Emeliantchik, A.Litvin, V.Makarenko, V.Mossolov, N.Shumeiko, A.Solin, R.Stefanovitch, I.Suarez Gonzalez. BNP: A.Fedorov, M.Kozmik, O.Misevitch, R.Zuyevski. Bulgaria: INRNE: L.Dimitrov, V.Ganchev, S.Piperov, G.Sultanov, V.Tcholakov, I.Vankov. US: LLNL: P.Petkov. Czech Republic: CF: M.Finger, M.Finger Jr. Georgia: EAP: V.Ronadze, L.Runa. IHEP: N.Amaglobeli, I.Bagaturia, B.Chladze, R.Kvataze, D.Lomidze, R.Shanidze, Z.Tsamaladze. Russia: JINR: S.Afanasyev, I.Belotelov, P.Bunin, Y.Ershov, M.Gavrilenko, A.Golunov, I.Golubrin, N.Gorbunov, I.Gorbunov, I.Gramenitski, V.Kalagin, A.Kamenev, V.Karjavin, V.Konoplyanikov, V.Korenko, G.Kozlov, A.Kurenkov, A.Lanev, A.Makarkin, A.Malafayev, I.Meinichenko, V.V.Mikheyev, P.Moskiz, D.Oleynik, A.Orlov, V.Palichuk, V.Peregrin, A.Petrov, M.Savina, R.Semenov, S.Smatov, S.Shuba, A.Skatchkova, N.Skatchkov, V.Smetanikov, V.Smirnov, D.Smolch, E.Tikhonenko, S.Vasil'ev, A.Vokodko, A.Zarubin, V.Zhitov. PHEP: S.Evtyukhin, V.Golovtsov, T.Narov, V.Km, P.Levchenko, V.Murzin, V.Oreshkin, I.Smirnov, V.Sulimov, L.L.Varlov, S.Vavilov, A.Vorobyev, An.Vorobyev. INR: Yu.Andreev, A.Antimov, A.Dermeniev, S.Gninenko, N.Golubev, D.Gorbunov, A.Karimiyev, M.Kislanov, N.Krasnikov, V.Matveev, A.Pashenkov, G.Pivovarov, V.E.Postoev, V.Rubakov, V.Shrin'yants, A.Solov'ev, D.Tilov, A.Toropin, S.Troitsky. ITEP: V.Epsh'teyn, M.Erofeeva, V.Gavrilov, V.Kaftanov, I.Kisilevich, V.Koksov, A.Konoplyanikov, M.Kossov, Y.Kozlov, A.Krokhin, D.Litvin'sev, N.Lychnovskaya, A.Oulanov, V.Popov, G.Safronov, S.Semenov, N.Stepanov, V.Stoin, E.Vlasov, V.Zaytsev, A.Zhokin. MSU: A.Belyaev, E.Boss, V.Bunichov, A.Dem'yanov, M.Dubinin, L.Duclo, A.Ershov, A.Gribushin, V.Ilyin, A.Kaminskiy, V.Klyukhin, O.Kobolova, V.Korotkiy, A.Kryukov, I.Lobkin, A.Marinina, S.Odratsov, M.Pet'lov, S.Petrushanko, A.Popov, A.Prosuryakov, L.Sarycheva, V.Savin, A.Singeev, I.Vardanyan. PhEP: V.Andreev, M.Azarkin, I.Chernin, M.Krivosyann, A.Lependov, G.Miyazaki, S.V.Rusakov, A.Vinogradov. IHEP: I.Ashg'rey, I.Bays'tev, S.Brioukov, V.Gritshin, V.Kachanov, A.Kalinin, D.Korstan'tinov, A.Korablev, V.Krychikina, A.Levina, V.Petrov, A.Ryabov, R.Ryutin, A.Sobol, V.Talov, L.Tour'tchanovitch, S.Troshin, N.Ty'rin, A.Uzunian, A.Volkov. Ukraine: ISCOMAS: B.Grynyov. KIPT: L.Levchuk, S.Lukyanenko, D.Soroka, P.Sorokin.

Dear Colleagues!

The past 20 years of responsible and intensive work in the CMS Collaboration have yielded important results. The result of this work is the discovery of new particle, which may be the so-called Higgs boson.

We sincerely want to congratulate you on your contributions to the preparation and publication of the first scientific article from CMS devoted to the observation of a new boson with mass at 125 GeV!

For some of us, this discovery is the first in our scientific careers. Studying the properties of this particle is yet to come, but the first step has been taken and done brilliantly! Each of you deserves to be a co-author of this discovery, which is reflected in the author list of this article. Please accept our sincere congratulations and wishes for further scientific progress and achievements!

On behalf of CMS Collaboration

Joe Incandela, CMS Spokesperson
Igor Golutvin, RDMS Spokesperson

31.07.2012

**АВТОРАМ RDMS “НАБЛЮДЕНИЯ НОВОГО БОЗОНА С МАССОЙ
ОКОЛО 125 ГЭВ”**

Уважаемые, коллеги!

Прошедшие 20 лет ответственной и интенсивной работы коллаборации CMS принесли важные результаты. Результат этой работы – открытие новой частицы, которая может оказаться так называемым бозоном Хиггса.

Мы искренне хотим поздравить вас с вашим вкладом в подготовку и публикацию первой научной статьи CMS, посвященной наблюдению нового бозона с массой около 125 ГэВ.

Для некоторых из нас это открытие – первое в научной карьере. Еще предстоит изучить свойства этой частицы, но первый шаг сделан, и сделан блестяще! Каждый из вас заслуженно является соавтором этого открытия, что и отражает авторский список этой работы. Пожалуйста, примите чисто-сердечные поздравления и пожелания дальнейшего научного прогресса и достижений.

От имени коллаборации CMS

Джо Инкадела, руководитель коллаборации CMS

Игорь Голутвин, председатель сотрудничества RDMS CMS

31.07.2012

**СПИСОК АВТОРОВ СОТРУДНИЧЕСТВА RDMS CMS СТАТЬИ ЭКСПЕРИМЕНТА CMS “НАБЛЮДЕНИЯ НОВОГО БОЗОНА С МАССОЙ ОКОЛО 125 ГЭВ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ CMS НА LHC”
(ЖУРНАЛ PHYS. LETT. B 716 (2012) 30)**

S. Chatrchyan, V. Khachatryan, A.M. Sirunyan, A. Tumasyan
Yerevan Physics Institute, Yerevan, Armenia

V. Chekhovsky, I. Emeliantchik, A. Litomin, V. Makarenko,
V. Mossolov, N. Shumeiko, A. Solin, R. Stefanovitch,
J. Suarez Gonzalez
National Centre for Particle and High Energy Physics, Minsk,
Belarus

A. Fedorov, M. Korzhik, O. Missevitch, R. Zuyevski
Research Institute for Nuclear Problems, Minsk, Belarus

L. Dimitrov, V. Genchev, P. Iaydjiev, S. Piperov, M. Rodozov,
S. Stoykova, G. Sultanov, V. Tcholakov, R. Trayanov, I. Vankov,
M. Vutova
Institute for Nuclear Research and Nuclear Energy, Sofia, Bulgaria

C. Roumenin, D. Uzunova, R. Zahariev
Institute of System Engineering and Robotics, Sofia, Bulgaria

A. Dimitrov, R. Hadjiiska, V. Kozhuharov, L. Litov, B. Pavlov,
P. Petkov
University of Sofia, Sofia, Bulgaria

M. Finger, M. Finger Jr.
Charles University, Prague, Czech Republic

V. Rojinshvili, L. Rurua
E. Andronikashvili Institute of Physics, Academy of Science, Tbilisi,
Georgia

N. Amaglobeli, I. Bagaturia, B. Chiladze, R. Kvatadze, D. Lomidze,
R. Shanidze, Z. Tsamalaidze
Institute of High Energy Physics and Informatization, Tbilisi State
University, Tbilisi, Georgia

S. Afanasiev, I. Belotelov, P. Bunin, Y. Ershov, M. Gavrilenko, A. Golunov, I. Golutvin, N. Gorbounov, I. Gorbunov, I. Gramenitski, V. Kalagin, A. Kamenev, V. Karjavin, V. Konoplyanikov, V. Korenkov, G. Kozlov, A. Kurenkov, A. Lanev, A. Makankin, A. Malakhov, I. Melnitchenko, V. Mitsyn, P. Moisenz, D. Oleynik, A. Orlov, V. Palichik, V. Perelygin, A. Petrosyan, M. Savina, R. Semenov, S. Shmatov, S. Shulha, A. Skachkova, N. Skatchkov, V. Smetannikov, V. Smirnov, D. Smolin, E. Tikhonenko, S. Vasil'ev, A. Volodko, A. Zarubin, V. Zhiltsov
Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

S. Evstyukhin, V. Golovtsov, Y. Ivanov, V. Kim, P. Levchenko, V. Mukzin, V. Oreshkin, I. Smirnov, V. Sulimov, L. Uvarov, S. Vavilov, A. Vorobyev, An. Vorobyev
Petersburg Nuclear Physics Institute, Gatchina (St. Petersburg), Russia

Yu. Andreev, A. Anisimov, A. Dermenev, S. Gninenko, N. Golubev, D. Gorbunov, A. Karneyeu, M. Kirsanov, N. Krasnikov, V. Matveev, A. Pashenkov, G. Pivovarov, V.E. Postoev, V. Rubakov, V. Shirinyants, A. Solovey, D. Tliso, A. Toropin, S. Troitsky
Institute for Nuclear Research, Moscow, Russia

V. Epshteyn, M. Erofeeva, V. Gavrilov, V. Kaftanov, I. Kiselevich, V. Kolosov, A. Konoplyannikov, M. Kossov, Y. Kozlov, A. Krokhotin, D. Litvintsev, N. Lychkovskaya, A. Oulianov, V. Popov, G. Safronov, S. Semenov, N. Stepanov, V. Stolin, E. Vlasov, V. Zaytsev, A. Zhokin
Institute for Theoretical and Experimental Physics, Moscow, Russia

A. Belyaev, E. Boos, V. Bunichev, A. Demiyanov, M. Dubinin, L. Dudko, A. Ershov, A. Gribushin, V. Ilyin, A. Kaminskiy, V. Klyukhin, O. Kodolova, V. Korotkikh, A. Kryukov, I. Lokhtin, A. Markina, S. Obraztsov, M. Perfilov, S. Petrushanko, A. Popov, A. Proskuryakov, L. Sarycheva, V. Savrin, A. Snigirev, I. Vardanyan
Moscow State University, Moscow, Russia

V. Andreev, M. Azarkin, I. Dremin, M. Kirakosyan, A. Leonidov, G. Mesyats, S.V. Rusakov, A. Vinogradov
P.N. Lebedev Physical Institute, Moscow, Russia

I. Azhgirey, I. Bayshev, S. Bitioukov, V. Grishin, V. Kachanov, A. Kalinin, D. Konstantinov, A. Korablev, V. Krychkine, A. Levine, V. Petrov, A. Ryabov, R. Ryutin, A. Sobol, V. Talov, L. Tourtchanovitch, S. Troshin, N. Tyurin, A. Uzunian, A. Volkov
State Research Center of Russian Federation, Institute for High Energy Physics, Protvino, Russia

B. Grynyov
Institute of Single Crystals of National Academy of Science, Kharkov, Ukraine

L. Levchuk, S. Lukyanenko, D. Soroka, P. Sorokin
National Scientific Center, Kharkov Institute of Physics and Technology, Kharkov, Ukraine

ПОСЛЕДНИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПОИСКА БОЗОНА ХИГГСА В ЭКСПЕРИМЕНТЕ ATLAS

Заявление коллаборации ATLAS

ЦЕРН, 4 июля 2012

4 июля 2012 коллаборация ATLAS представила на семинаре в ЦЕРН, который проводился с помощью видеотрансляции параллельно с открывшейся международной конференции по физике высоких энергий (ICHEP) в Мельбурне (Австралия), обновленные результаты по поиску бозона Хиггса. На семинаре в ЦЕРН были представлены предварительные результаты для физиков, находящихся там, а также по видеотрансляции для их коллег в сотнях других институтов по всему миру. Детальный анализ результатов поиска бозона Хиггса в эксперименте ATLAS будет представлен на международной конференции в конце этой недели в Мельбурне.

“Сегодня поиск бозона Хиггса настолько продвинулся, как мы даже не могли мечтать”, – заявила глава коллаборации ATLAS Фабиола Джанотти (Fabiola Gianotti). “Мы наблюдаем в наших данных явные признаки существования новой частицы на уровне пяти стандартных отклонений (5σ) в области масс около 126 ГэВ. Выдающиеся рабочие характеристики ускорителя LHC и детектора ATLAS, а также огромные усилия многих людей, привели нас к этому волнующему результату. Чуть больше времени потребуется для того, чтобы закрепить эти результаты, и, конечно, нужно накопить больше данных и провести больше исследований для определения свойства этой новой частицы.”

Бозон Хиггса – нестабильная частица, живущая только мельчайшую долю секунды перед тем, как распасться на другие частицы. В эксперименте бозон Хиггса можно наблюдать, только измеряя его продукты распада. В стандартной модели электрослабых взаимодействий, которая является весьма успешной физической теорией, обеспечивающей очень точное описание материи, ожидается, что бозон Хиггса распадается в различные комбинации частиц, или каналы. Вероятность распада в разные каналы зависит от массы бозона Хиггса.

Коллаборация ATLAS сконцентрировала свои усилия на изучении двух взаимно дополняющих каналов: распад бозона Хиггса либо в два фотона, либо в четыре лептона. Оба эти канала имеют превосходное массовое разрешение. Канал распада в два фотона имеет умеренный сигнал на большом, но измеряемом фоне, а канал распада в четыре лептона имеет слабый сигнал, но очень низкий фон. Оба канала показывают статистически значимое превышение примерно в том же месте – около массы 126 ГэВ. Статистическая комбинация этих и других каналов устанавливает, что наблюдается отклонение от фона на уровне пяти стандартных отклонений (5σ). Это означает, что только

один эксперимент из трех миллионов возможных других может случайно наблюдать такой же сигнал без существования бозона Хиггса во Вселенной.

Представленные результаты являются дополнением результатов предыдущего анализа данных, показанных в ЦЕРН в декабре прошлого года и опубликованных в начале этого года. Результаты, показанные в декабре, были получены из данных, собранных в 2011 году при столкновениях протонов с энергией 7 ТэВ. Эти результаты ограничивали существование бозона Хиггса в двух узких интервалах масс – около 117 ГэВ и 129 ГэВ. Небольшой избыток событий над ожидаемым фоном наблюдался как в эксперименте ATLAS, так и в эксперименте CMS около массы 126 ГэВ, что примерно соответствует массе атома йода.

Следующий шаг для эксперимента ATLAS, ускорителя LHC и сообщества физики высоких энергий состоит в измерении свойств этой частицы и сравнении этих измерений с предсказанными свойствами бозона Хиггса. Уже сейчас некоторые из этих свойств соответствуют предсказаниям, например, тот факт, что частица наблюдается в предсказанных каналах и с массой определенной из других, косвенных измерений. В предстоящие недели и месяцы, эксперимент ATLAS уточнит свойства этой частицы, чтобы дать более ясную картину: является ли эта частица бозоном Хиггса, или это – первый представитель из большого семейства таких частиц, либо это – что-то совсем другое.

Данные 2012 года набираются в протонных столкновениях с повышенной энергией в системе центра масс до 8 ТэВ и включают в себя больше данных (набранных за три месяца), чем было набрано за весь 2011 год. Это быстрое накопление данных стало возможным благодаря выдающимся усилиям группы ускорителя LHC. Набор данных, представленных на семинаре, соответствует примерно одному квадриллиону (миллион миллиардов) протонных столкновений.

Детектор ATLAS, даже в более трудных условиях пучка 2012 года, работал замечательно, с высокой эффективностью, набрав данные высочайшего качества для поиска бозона Хиггса. Мощные вычислительные ресурсы обеспечивались по всему миру с использованием ГРИД (LHC Computing Grid) инфраструктуры, что имело важное значение для реконструкции и анализа данных.

"Создание детектора, который позволяет нам сейчас наслаждаться такими захватывающими физическими результатами, было огромным совместным усилием коллаборации на протяжении многих лет", – сказала доктор Фабиола Джанотти (Fabiola Gianotti). "Потребовалось около 15 лет для конструирования, создания прототипов, строительства, монтажа и ввода в эксплуатацию детектора. Этот период останется в памяти всех коллег коллаборации ATLAS, которые внесли свой вклад в это. Очень компетентный и мотивиро-

ванный коллектив физиков, инженеров и техников Объединенного института ядерных исследований активно участвовал на всех этапах создания детектора. Дубненская группа в ATLAS является одним из основных столпов коллаборации ATLAS с самого её начала. В этом послании руководство коллаборации ATLAS передает теплые слова благодарности и поздравления всему коллективу ОИЯИ за их огромные достижения. Мы очень рады теперь поделиться с вами "богатым физическими урожаем", большая часть которого базируется на идеях и пионерских работах физиков Дубны и выходит далеко за рамки поиска бозона Хиггса".

Как ожидается, ускоритель LHC, перед началом долгой остановки для модернизации ускорителя, обеспечит эксперимент ATLAS до конца 2012 года дополнительными данными, превышающими в два раза те, которые были набраны в начале 2012 года. Когда к концу 2014 года ускоритель начнет работать снова, он будет работать с энергией в системе центра масс протонных пучков почти в два раза выше сегодняшней энергии 7 ТэВ.

Новые данные 2012 года и данные, полученные после модернизации ускорителя, позволят ученым ответить на вопросы о бозоне Хиггса, поднятые на сегодняшнем семинаре, а также на другие вопросы, фундаментальные для нашего знания о природе.



Руководитель сотрудничества RDMS,
председатель семинара проф. И. А. Голутвин.



Участники семинара в ЦЕРН.
А. В. Зарубин, Т. Кампорези, В. А. Рубаков, Г. Тоннели, С. В. Шматов.



На связи с ЦЕРН
руководитель сотрудничества RDMS проф. И. А. Голутвин и
директор ЛИТ ОИЯИ проф. В. В. Кореньков.



Ж. Варела и А. В. Зарубин.



Участники семинара в Доме международных совещаний ОИЯИ (Дубна).



С. В. Шматов и Г. Тонели.

**ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ КВАРК-
ГЛЮОННОЙ МАТЕРИИ В СОУДАРЕНИЯХ
ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ НА LHC**



Физика на Большом адронном коллайдере

Очередное заседание Семинара состоится 06 июня 2012 г. в 15:00 (мск.) в конференц-зале Учебно-научного центра Объединенного института ядерных исследований (ауд.437 здания ЛИТ), Дубна.

«Исследование свойств кварк-глюонной материи в соударениях тяжелых ионов на LHC» Докладчик проф. И.П. Лохтин (НИИЯФ МГУ, Москва)

Одним из основных предсказаний теории сильных взаимодействий, квантовой хромодинамики, является достижение деконфайнмента ядерной материи и образование нового состояния вещества - кварк-глюонной плазмы - для систем с достаточно высокой температурой или плотностью барионного заряда. Предполагается, что формирование такого экстремального состояния материи может происходить в ультрарелятивистских соударениях тяжелых ионов. В докладе представлены последние результаты экспериментов на Большом адронном коллайдере (LHC) по соударениям ионов свинца при энергии 2.76 ТэВ на пару нуклонов (данные сеансов 2010 и 2011 г.г.). Обсуждаются интерпретации наблюдаемых физических эффектов и дальнейшие перспективы физики тяжелых ионов на LHC.

Принять участие в заседании, задать вопросы и выступить в дискуссии можно в точках двустороннего видеодоступа в ОИЯИ (Дубна), ФИАН (Москва), ИЯИ ("Питомник", Москва), ПИЯФ (Гатчина), ЦЕРН (354-1-019), ТГУ (Томск), АГУ (Барнаул), КГУ (Кемерово), ОГУ (Омск), НГТУ (Новосибирск), ЯрГУ (Ярославль).

Видеотрансляция семинара осуществляется через систему управления видеоконференцсвязи Томского государственного университета.

Также предусмотрена видео-трансляция Семинара без использования специального оборудования через Интернет: <http://rdms.iinr.ru/webcast>

По вопросам участия в семинаре обращаться к научному секретарю семинара С.В. Шматову, тел. +7 496 21 63 445, +7 916 353 52 21; факс +7 496 21 64 647; e-mail: Sergei.Shmатов@cern.ch

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ КВАРК-ГЛЮОННОЙ МАТЕРИИ В СОУДАРЕНИЯХ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ НА LHC

И. П. Лохтин

Научно-исследовательский институт ядерной физики МГУ, Москва

Одним из основных предсказаний теории сильных взаимодействий (квантовой хромодинамики) является достижение деконфайнмента ядерной материи и образование нового состояния вещества — кварк глюонной плазмы — для систем с достаточно высокой температурой или плотностью барионного заряда. Предполагается, что формирование такого экстремального состояния материи может происходить в релятивистских соударениях тяжелых ионов. В лекции представлены последние результаты экспериментов на Большом адронном коллайдере (LHC) по соударениям ионов свинца при энергии 2.76 ТэВ на пару нуклонов (данные сеансов 2010 и 2011 годов). Обсуждаются интерпретации наблюдаемых физических эффектов и дальнейшие перспективы физики тяжелых ионов на LHC.

1. Поиск кварк-глюонной материи в соударениях тяжелых ионов

Теоретическое и экспериментальное исследование свойств ядерной материи в условиях экстремально высоких температур и плотностей энергии является одной из актуальнейших задач современной физики высоких энергий, вызывающей растущий на протяжении последних двадцати лет научный интерес (см., например, недавний обзор [1]). Достижение деконфайнмента ядерной материи и образование нового состояния вещества — кварк-глюонной материи (КГМ) — предсказывается теорией сильных взаимодействий (квантовой хромодинамикой, КХД), для систем с достаточно высокой температурой (> 200 МэВ) или плотностью барионного заряда. Согласно современным космологическим представлениям, кварк-адронный фазовый переход имел место в ранней Вселенной в первые микросекунды после Большого Взрыва. Особую актуальность данная тематика приобрела в связи с началом работы Большого адронного коллайдера (LHC) в Европейском центре ядерных исследований (ЦЕРН). Эксперименты с пучками тяжелых ионов на LHC дают уникальную возможность воссоздания в лабораторных условиях существовавшей на самых ранних стадиях развития Вселенной прото-материи, изучение свойств которой представляет несомненный интерес как с точки зрения понимания природы фундаментальных взаимодействий и происхождения элементарных частиц, так и с точки зрения проверки современных теорий рождения и эволюции Вселенной.

В лабораторных условиях пучки релятивистских ядер впервые были получены в 1970 году на синхрофазотроне ОИЯИ (Дубна) при энергии $E = 1-4$ ГэВ на нуклон. Впоследствии ядра были ускорены до высоких энергий и

в других ядерных центрах. До начала работы LHC уже был накоплен значительный экспериментальный материал по различным физическим наблюдаемым в соударениях тяжелых ионов на ускорителе SPS в ЦЕРНе (максимальная энергия пучков свинца в системе центра масс $\sqrt{s_{NN}} = 17$ ГэВ на пару нуклонов) и коллайдере RHIC в Брукхейвенской национальной лаборатории США (максимальная энергия пучков золота $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ на пару нуклонов). Совокупность полученных на RHIC данных (подавление выхода кваркониев и жестких адронов, сильная азимутальная анизотропия потока частиц, дальнедействующие азимутальные корреляции и др.) свидетельствует о проявлении коллективных эффектов на партонном уровне и говорит в пользу гипотезы формирования КГМ в наиболее центральных соударениях тяжелых ионов, хотя возможности альтернативных интерпретаций по-прежнему обсуждаются в научной литературе. При этом измеренные свойства среды согласуются скорее с предположением о формировании сильновзаимодействующей партонной жидкости, чем предсказываемой решеточными расчетами КХД “слабовзаимодействующей” КГМ.

Энергия столкновений пучков ионов свинца во время сеансов работы LHC в 2010 и 2011 годах была в 14 раз больше, чем на RHIC, что открыло новый режим физики ядро-ядерных взаимодействий, в котором жесткие и полужесткие процессы рождения частиц играют доминирующую роль. Оцениваемая начальная плотность энергии в соударениях ионов свинца на LHC существенно выше, чем на RHIC (и намного выше, чем критическое значение для кварк-адронного фазового перехода), что обуславливает более сильные коллективные эффекты, проявляющиеся в различных новых каналах рождения. При этом свойства образованной в соударениях тяжелых ионов на LHC КХД-материи могут существенно отличаться от свойств созданной на RHIC “кварк-глюонной жидкости”, будучи, возможно, ближе к свойствам идеальной КГМ или партонного газа. Отметим, что при энергиях LHC можно ожидать проявления коллективных эффектов на партонном уровне не только в ядро-ядерных соударениях, но и в протон-протонных взаимодействиях, первые свидетельства чему (дальнедействующие азимутальные корреляции — т.н. “ridge-эффект”) уже были получены коллаборацией CMS для pp-событий с высокой множественностью при энергии $\sqrt{s} = 7$ ТэВ [2].

В настоящий момент в научной литературе принято разделение экспериментальных сигналов формирования КГМ на “мягкие” и “жесткие” тесты. Процессы жесткого рождения частиц (т.е. идущие с большими поперечными импульсами p_T или массами M много больше характерного масштаба конфайнмента КХД, $p_T, M \gg 200$ МэВ) интересны прежде всего тем, что они несут информацию о самых начальных стадиях эволюции соударений тяжелых ионов: начальной кварк-глюонной плотности и транспортных коэффи-

циентах. Одним из основных жестких тестов КГМ на LHC является поглощение в ней высокоэнергичных струй цветозаряженных партонов, приводящее к ряду эффектов: подавлению выхода адронов с большими поперечными импульсами; модификации спектров, формы и функции фрагментации струй; разбалансировке поперечной энергии в процессах парного рождения струй и в процессах рождения струи в сопровождении (виртуального) фотона или Z^0 -бозона. Полезным обстоятельством при этом является то, что рождение жестких адронных струй в экспериментах по e^+e^- аннигиляции, в ep - и pp -взаимодействиях на коллайдере — достаточно хорошо изученное явление, которое явилось наглядным тестом теории возмущений КХД, подтвердив на опыте справедливость многих ее предсказаний. Модификация спектров жестких частиц в ядро-ядерных взаимодействиях по сравнению с нуклон-нуклонными соударениями (при эквивалентной энергии на нуклон в системе центра масс) указывает на наличие перераспределения и потерь энергии партонов в плотной материи. Полученные на RHIC данные по рождению частиц с большими поперечными импульсами (фактор подавления жестких адронов в центральных соударениях $AuAu \sim 5$, подавление высокоэнергичных двухчастичных корреляций “вперед-назад” и эллиптический поток в полужестких соударениях $AuAu$ при больших поперечных импульсах) находятся в качественном согласии с гипотезой гашения струй в КГМ. Однако пособытийная реконструкция струй в экспериментах на RHIC затруднена малым сечением рождения струй и сильными фоновыми эффектами. В соударениях тяжелых ионов на LHC возможна эффективная реконструкция высокоэнергичных струй с использованием калориметрии и трековой системы. При энергии LHC сечение рождения жестких струй на несколько порядков выше, чем на RHIC, а статистика достаточно высока для систематического анализа различных аспектов КХД-физики за пределами кинематических границ, достижимых на RHIC.

Модифицированные в среде спектры мюонных пар больших инвариантных масс и вторичных J/ψ -резонансов (от распада B -мезонов) позволяют проанализировать потери энергии тяжелых кварков, которые, как ожидается, должны отличаться от потерь энергии легких кварков вследствие эффекта “мертвого конуса” — подавления коллинеарной радиации массивных партонов. Отметим, что данные RHIC по спектрам одиночных электронов от фрагментации c -кварков указывают на сильную степень их подавления, которая количественно сопоставима со степенью подавления легких адронов и не описывается в рамках моделей потерь энергии тяжелых кварков в КГМ. На LHC становится доступным изучение потерь энергии в среде более массивных — кварков.

Другим важным эффектом, чувствительным к начальным условиям формирования КГМ, является рождение и подавление связанных состояний тяжелых кварков (кваркониев) в соударениях тяжелых ионов. Анализ корре-

ляторов и потенциалов кваркониев в решеточной КХД при конечных температурах показывает, что различные состояния чармония (cc) и боттомония (bb) должны “плавиться” при температурах, для которых радиус цветовой экранировки в КГМ (дебаевский радиус) оказывается меньше радиуса связанного состояния. Наблюдаемая в экспериментах на SPS и RHIC картина подавления выхода J/ψ -мезонов (чармониев) на данный момент не имеет однозначной интерпретации. В частности, данные по измерению спектров J/ψ на RHIC указывают на такую же степень их подавления как и на SPS (при двукратной оцениваемой разнице в температуре среды), что может свидетельствовать либо о “последовательном” характере поглощения (плавление только возбужденных состояний чармония), либо о комбинации сильного плавления прямых J/ψ и регенерации чармония вследствие наличия большого количества s -кварков в плотной материи. Ожидается, что природа подавления чармониев может быть прояснена на LHC при гораздо более высоких температурах среды. Отметим, что в эксперименте CMS достигается лучшее из всех детекторов LHC, которые применяются для анализа данных по соударениям тяжелых ионов, разрешение мюонных пар по инвариантной массе, позволяющее разделять различные состояния кваркониев при хорошем отношении сигнала к фону. Это открывает уникальную возможность изучать пороговую диссоциацию как чармониев, так и семейства более тяжелых кваркониев — боттомониев $\Upsilon(1S, 2S, 3S)$. Поскольку разные состояния Υ должны разрушаться при различных температурах, сканирование соответствующих факторов подавления может служить эффективным “термометром” КГМ. Кроме того, спектр кваркониев чувствителен к модификации партонных распределений в ядре в области малых долей партонного импульса вследствие “глюонного насыщения”, что также является новым предметом исследования в ядро-ядерных и протон-ядерных соударениях.

Если жесткие процессы множественного рождения частиц несут информацию о самых ранних стадиях ядерной реакции, то мягкие процессы рождения чувствительны главным образом к пространственно-временной структуре системы уже после ее термализации, поэтому несут информацию о термодинамических свойствах образующейся материи. В частности, коллективные потоковые эффекты (радиальный и анизотропный потоки), проявляющиеся в импульсных спектрах адронов, характеризуют гидродинамическое поведение образованной материи. Анализ мягких тестов в соударениях $PbPb$), (множественность и импульсные спектры заряженных адронов, азимутальная анизотропия, дальнедействующие азимутальные корреляции, плотность потока энергии в широком диапазоне быстрот), позволяет получать новую информацию о таких свойствах образованной материи (на стадии ее “вымораживания”) как плотность энергии, радиальная коллективная скорость, коэффициенты азимутальной анизотропии, коэффициенты вязкости.

В конце 2010 года был проведен первый сеанс работы LHC с пучками ионов свинца при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ ТэВ на пару нуклонов, позволивший набрать статистику, соответствующую интегральной светимости около 8 обратных микробарн. Данные были собраны и проанализированы коллаборациями ALICE, ATLAS и CMS (обзор основных результатов сеанса 2010 года можно найти в [3]). В конце 2011 года был проведен второй сеанс работы LHC с пучками ионов свинца при той же энергии, но интегральной светимости примерно в 20 раз больше (160 обратных микробарн), чем в 2010 году, что позволило существенно увеличить статистику (что критично, в частности, для ряда жестких тестов). Кроме того, в марте 2011 года был проведен специальный сеанс работы LHC с пучками протонов при такой же энергии на нуклон, как и в соударениях ионов свинца (было набрано порядка 240 обратных нанобарн, что по сечениям жестких процессов примерно эквивалентно статистике первого сеанса $PbPb$), данные которого использовались для сравнения различных характеристик жестких процессов в соударениях pp и $PbPb$. На июнь 2012 года коллаборациями ALICE, ATLAS и CMS было опубликовано 35 статей по анализу данных соударений $PbPb$ на LHC [4-38], основные результаты которых представлены в данном обзоре.

2. Центральность ядро-ядерных взаимодействий

Важным понятием в физике тяжелых ионов является понятие центральности взаимодействия, которая характеризуется параметром удара b — расстоянием между центрами сталкивающихся ядер в плоскости, перпендикулярной оси столкновения (т.н. “плоскости реакции”, рис. 1). Наиболее центральные соударения ($b \sim 0$) интересны тем, что в них ожидаются максимальные плотность энергии и объем области перекрытия ядер, и эффекты среды должны проявляться наиболее отчетливо. С другой стороны, в полу-центральных соударениях ядер ($b \sim R_A$, где R_A — радиус ядра) можно наблюдать эффекты, связанные с азимутальной асимметрией объема плотной материи. Определенный интерес представляют и периферические соударения ($b \sim 2R_A$), в которых эффекты среды минимальны, но возможно изучение других процессов (например, электромагнитных взаимодействий). Таким образом, важной методической задачей является разбиение анализируемых событий по классам центральности. Существуют различные способы определения центральности, основанные на корреляции между параметром удара и различными физическими наблюдаемыми. Например, в эксперименте CMS для определения центральности используется энерговыделение в переднем калориметре (HF) установки, покрывающем область малых полярных углов по отношению к оси пучка (псевдобыстроты $3 < |\eta| < 5.2$); при этом n процентов событий с максимальным энерговыделением соответствует n процентов наиболее центральных соударений (рис. 2). Тогда для каждого класса центральности можно модельным образом вычислить специальную величину — среднее число нуклонов, участвующих в соударении, $\langle N^{part} \rangle$, в зависимости от которого

обычно и представляются экспериментально измеряемые характеристики различных физических процессов.

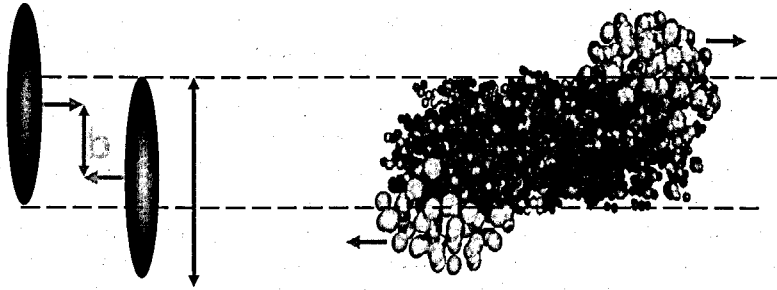


Рис. 1. Схематическое представление центральности ядро-ядерного взаимодействия в плоскости, перпендикулярной оси столкновения.

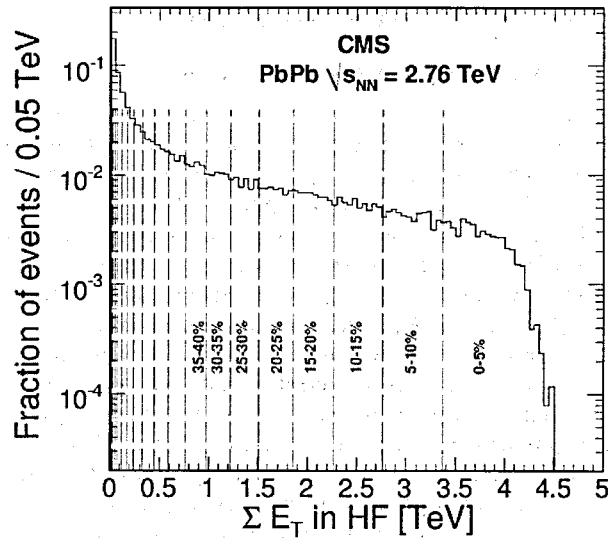


Рис. 2. Распределение по энерговыделению в переднем калориметре CMS в столкновениях $PbPb$ при $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ ТэВ (0–5% обозначает 5% наиболее центральных соударений и т.д.) [27].

3. Множественность частиц и поток энергии.

Множественность заряженных частиц является ключевой глобальной физической наблюдаемой в соударениях адронов и ядер высоких энергий. Измеренные ALICE [4, 7], ATLAS [21] и CMS [27] множественности заряженных частиц в центральной области быстрот находятся в согласии, dN_{ch}/η ($\eta = 0$) \approx 1600 для 5% наиболее центральных соударений $PbPb$, что в 2 раза выше чем в центральных соударениях ионов золота на RHIC. При этом наблюдается очень слабая зависимость множественности от псевдобыстроты в акцептансе $|\eta| < 2.5$ трековых систем ATLAS [21] и CMS [27] (рис. 3, левый). Как и ожидается, множественность увеличивается с ростом центральности (т.е. с уменьшением параметра удара b и увеличением числа “нуклонов-участников” N^{part}); зависимости множественности от центральности, измеренные разными экспериментами, также совпадают в пределах статистических и систематических неопределенностей (рис. 3, средний). Наблюдаемая зависимость множественности от энергии сталкивающихся пучков ионов хорошо аппроксимируется степенной функцией и имеет более резкий рост с $\sqrt{s_{NN}}$, чем эта же зависимость в $-$ соударениях (рис. 3, правый), что свидетельствует о важной роли жестких нуклон–нуклонных рассеяний в релятивистских ядро-ядерных взаимодействиях.

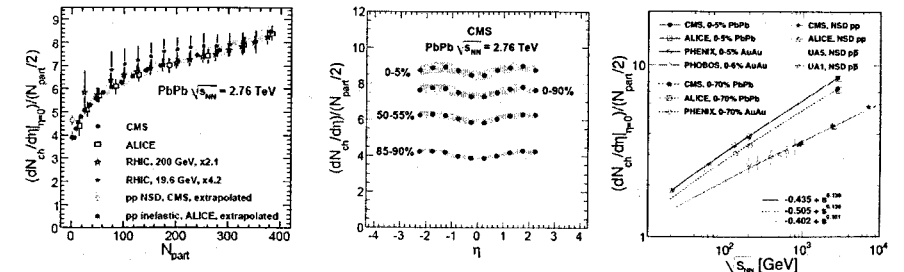


Рис. 3. Нормированная на среднее число нуклонов-участников множественность заряженных частиц в столкновениях $PbPb$ при $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ ТэВ в зависимости от псевдобыстроты (левый рисунок) и центральности (средний рисунок), а также от энергии пучков (правый рисунок) [27].

Другой важной глобальной физической наблюдаемой является выделяемая во взаимодействии поперечная энергия E_T , определение которой позволяет оценить начальную плотность энергии среды. Измеренный [36] с помощью калориметрической системы CMS поток поперечной энергии dE_T/η максимален в центральной области быстрот $\eta = 0$ и уменьшается с ростом $|\eta|$ (рисунок 4, левый), зависимость dE_T/η от η хорошо аппроксимируется функцией Гаусса. Для 2.5% наиболее центральных соударений $PbPb$ значение dE_T/η ($\eta = 0$) \approx 2.1 TeV в 3 раза выше, чем в центральных соударениях

AuAu на RHIC. Оцениваемая плотность энергии $\varepsilon(\eta = 0) \propto dE_T/y$ ($y = 0$) (y — быстрота) в момент времени $\tau_0 = 1$ фм/с составляет ≈ 15 ГэВ/фм³, что в 2.8 больше, чем на RHIC (и примерно в 100 раз больше, чем плотность нормальной ядерной материи). Поток поперечной энергии, как и множественность, увеличивается с ростом центральности соударений (рисунок 4, средний) и энергией пучков (рисунок 4, правый). Однако для dE_T/η зависимость от энергии имеет более резкий характер чем для dN_{ch}/η , что связано с ростом среднего поперечного импульса частиц $\langle p_T \rangle$ с $\sqrt{s_{NN}}$.

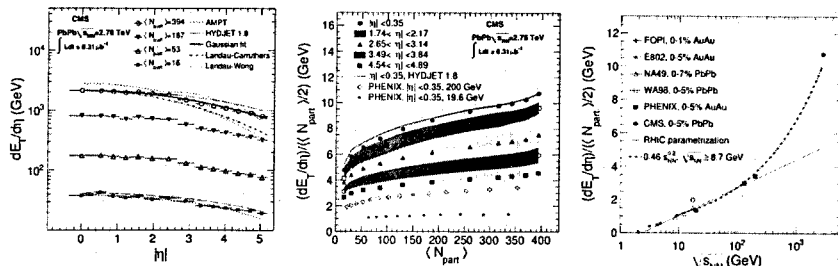


Рис. 4. Поток поперечной энергии в столкновениях *PbPb* при $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ ТэВ в зависимости от псевдобыстроты (левый рисунок) и центральности (средний рисунок), а также от энергии пучков (правый рисунок) [36]. В последних двух случаях значение dE_T/η нормировано на среднее число нуклонов-участников. Точки — данные, кривые — различные аппроксимации и модели.

4. Анизотропный поток частиц и азимутальные корреляции.

В нецентральных соударениях тяжелых ионов начальная пространственная асимметрия области взаимодействия приводит к анизотропии импульсных спектров наблюдаемых частиц (рис. 5). Такого рода коллективное поведение сильновзаимодействующей материи называется “анизотропных потоком” (“anisotropic flow”) и хорошо описывается в рамках гидродинамических моделей, которые обеспечивают механизм преобразования начальной пространственной азимутальной анизотропии в конечную импульсную. Величина потока характеризуется коэффициентами Фурье-разложения распределения частиц по азимутальному углу ϕ относительно плоскости реакции. В частности, коэффициент эллиптического потока v_2 определяется как вторая Фурье-гармоника такого распределения, $v_2 = \langle \cos(2\phi) \rangle$.

Зависимости коэффициента эллиптического потока от поперечного импульса p_T и центральности взаимодействий *PbPb* были проанализированы ALICE [5, 16], ATLAS [20] и CMS [33, 34] (на ATLAS и CMS была также измерена зависимость v_2 от псевдобыстроты η — слабое уменьшение v_2 с ро-

стом $|\eta|$, более выраженное для периферических соударений). Рисунок 6 показывает зависимость v_2 от p_T , измеренную CMS [33] в сравнении с аналогичной зависимостью, полученной на RHIC (эксперимент PHENIX). Данная зависимость имеет максимум при $p_T \sim 3$ ГэВ/с (область, где с гидродинамическим режимом, в котором v_2 растет с p_T практически линейно, начинает “конкурировать” режим жестких партон-партонных рассеяний). Эллиптический поток имеет также максимум в распределении по центральности (30–50% центральности). Интересно, что зависимости v_2 от p_T на LHC и RHIC очень близки.

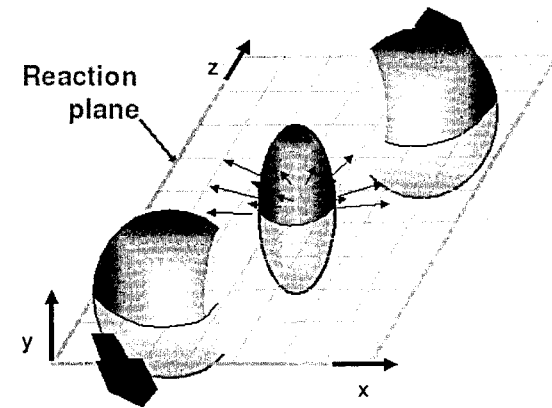


Рис. 5. Схематическое представление анизотропного потока в нецентральных ядро-ядерных взаимодействиях в плоскости реакции xy , перпендикулярной оси столкновения z .

Однако, проинтегрированное по всем p_T значение v_2 на LHC выш, чем на RHIC примерно на 30% (рис. 7), что обусловлено ростом среднего поперечного импульса с энергией. Важным результатом является также наблюдение ненулевого эллиптического потока при очень высоких поперечных импульсах, вплоть до $p_T \sim 40$ ГэВ/с [34], что может служить указанием на потери энергии жестких кварков и глюонов в азимутально несимметричном объеме плотной материи. Кроме того, были измерены высшие гармоники (v_3, v_4, v_5, v_6) Фурье-разложения распределения частиц по азимутальному углу ϕ , которые имеют качественно похожие зависимости от поперечного импульса p_T и центральности [9, 20, 32]. Модельный анализ данных по различным Фурье-гармоникам анизотропного потока дает возможность получить информацию о пространственной структуре области излучения частиц, начальных условиях, уравнении состояния и вязкости образованной среды.

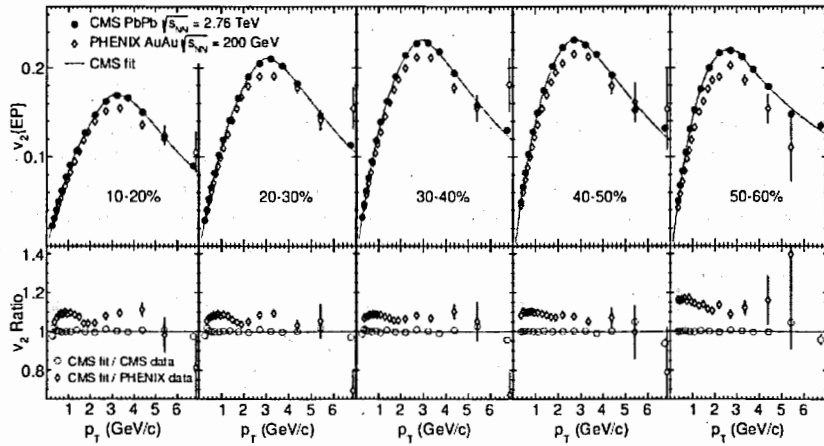


Рис. 6. Импульсная зависимость коэффициента эллиптического потока в столкновениях $PbPb$ при $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ ТэВ для различных центральных взаимодействий [34]. Данные LHC (CMS, круги) сравниваются с данными RHIC (PHENIX, ромбики). Нижний рисунок показывает отношение аппроксимации данных CMS (кривые на верхнем рисунке) к значениям данных CMS и PHENIX.

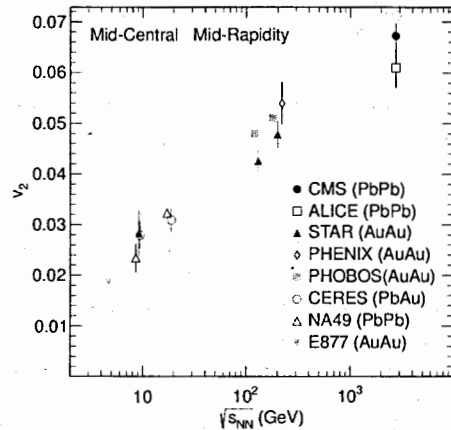


Рис. 7. Интегральный коэффициент эллиптического потока в полусредних столкновениях тяжелых ионов в зависимости от энергии пучков [34].

Еще одной важной характеристикой коллективных эффектов в соударениях тяжелых ионов являются различные двухчастичные азимутальные

корреляции [10, 11, 25, 32]. В частности, дальнедействующие азимутальные корреляции (ridge-эффект), наблюдавшиеся ранее в соударениях тяжелых ионов на RHIC и в протон-протонных соударениях с высокой множественностью вторичных частиц на LHC [2], были измерены также в соударениях ионов свинца [25, 32], в зависимости от поперечного импульса частиц и центральности взаимодействий. На рисунке 8 показан пример двумерных $\Delta\phi - \Delta\eta$ корреляционных функций для различных центральных соударений $PbPb$ [32]. В наиболее центральных взаимодействиях виден четкий пик на $\Delta\phi \approx 0$ ($\Delta\phi$ – разница значений азимутальных углов триггерной и ассоциированной частиц), который сохраняется даже при очень больших относительных псевдобыстрогах этих частиц (вплоть до $|\Delta\eta| = 4$). При этом эффект ослабевает для более периферических соударений и больших поперечных импульсов. Одна из возможных интерпретаций ridge-эффекта заключается в том, что он может быть проявлением сильно флуктуирующих начальных условий типа “продольных трубок”. В этом случае при последующей гидродинамической эволюции скоррелированность частиц по азимутальным углам сохраняется, в то время как по полярным углам распределение оказывается довольно широким. В научной литературе предлагаются и другие теоретические объяснения данного явления как для протон-протонных, так и для ядерных взаимодействий.

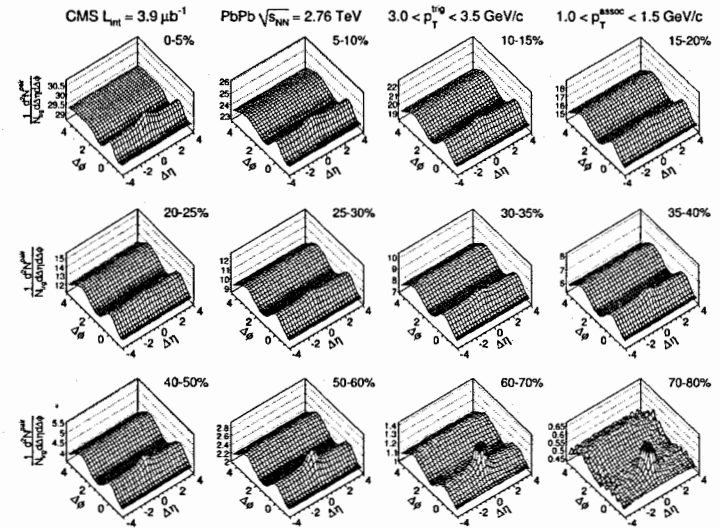


Рис. 8. Двумерные $\Delta\phi - \Delta\eta$ корреляционные функции (отбор триггерных заряженных частиц с $3.0 < p_T < 3.5$ ГэВ/с и ассоциированных заряженных частиц с $1.0 < p_{assoc} < 1.5$ ГэВ/с) в столкновениях $PbPb$ при $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ ТэВ для различных центральных взаимодействий [32].

5. Импульсные спектры частиц и фактор ядерной модификации.

Распределения частиц по поперечному импульсу в соударениях тяжелых ионов несут важную информацию о механизмах множественного рождения в различных кинематических режимах. При относительно небольших p_T ($< 1-2$ ГэВ/с) частицы рождаются, главным образом, в результате мягких взаимодействий и их спектр определяется коллективным поведением образованной материи. Спектр же адронов с большими p_T определяется фрагментацией адронных струй от жестких партонных рассеяний и несет, таким образом, информацию о потерях энергии кварков и глюонов в плотной материи (которые наиболее интенсивны на самых ранних стадиях реакции, когда температура и плотность энергии максимальны и должны приводить к подавлению выхода высокоэнергичных адронов). Отклонение в поведении жестких частиц в соударениях тяжелых ионов по сравнению с pp — соударениями характеризуется фактором ядерной модификации R_{AA} , который определяется как отношение выхода частиц данного типа в ядро-ядерных взаимодействиях к их числу в протон-протонных столкновениях (при такой же энергии на пару нуклонов), нормированному на число нуклон-нуклонных соударений (вычисляется модельным образом для данного класса центральности). Если $R_{AA} = 1$, то это значит, что для данного типа частиц эффекта среды не наблюдается, и ядро-ядерное взаимодействие является просто линейной суперпозицией нуклон-нуклонных соударений. Если $R_{AA} < 1$ или $R_{AA} > 1$ — это свидетельство того, что в столкновениях тяжелых ионов наблюдается соответственно подавление или усиление выхода частиц данного типа по сравнению с соответствующими pp — соударениями. Фактор ядерной модификации для заряженных адронов в соударениях ионов свинца на LHC был измерен до $p_T = 100$ ГэВ/с [6, 29]. Рисунок 9 показывает распределение заряженных адронов по поперечному импульсу и p_T -зависимость R_{AA} , полученные в эксперименте CMS [29]. Эффект подавления максимален в наиболее центральных соударениях (где ожидаются максимальные потери энергии партонов в среде) и для адронов с $p_T \sim 7$ ГэВ/с. Минимальное значение фактора ядерной модификации в центральных взаимодействиях составляет $R_{AA} \sim 0.15$ при $p_T \sim 7$ ГэВ/с и растет с поперечным импульсом, “насыщаясь” на уровне $R_{AA} \sim 0.5$ при $p_T > 50$ ГэВ/с. Импульсная зависимость фактора ядерной модификации определяется энергетической зависимостью потерь энергии кварков и глюонов в среде, что позволяет на основе анализа данных тестировать различные модели “гашения струй” и извлекать информацию о начальных условиях формирования образованной материи. Отметим, что на LHC эффект подавления жестких адронов измерен до гораздо больших p_T , чем на RHIC (где максимально достижимые $p_T = 20$ ГэВ/с).

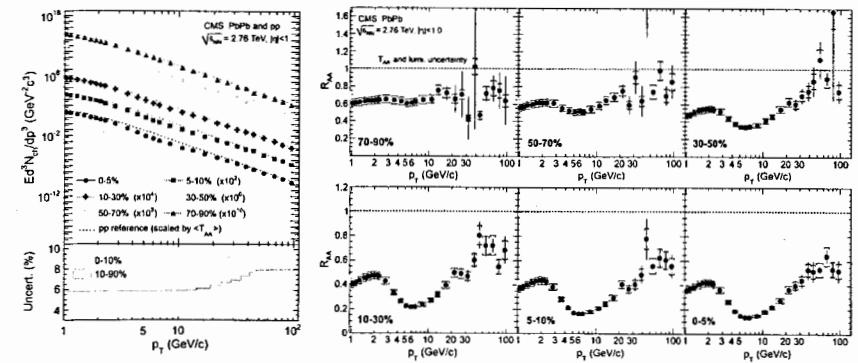


Рис. 9. Распределение заряженных адронов по поперечному импульсу (левый рисунок, точки — данные, кривые — нормированные на число нуклон-нуклонных соударений pp данные при той же энергии на пару нуклонов) и зависимость фактора ядерной модификации от поперечного импульса (правый рисунок) в столкновениях $PbPb$ при $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ ТэВ для различных центральных взаимодействий [29].

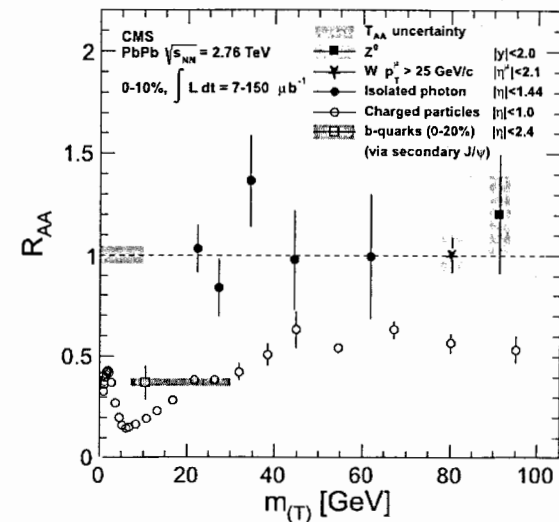


Рис. 10. Зависимость фактора ядерной модификации от поперечной массы в 10% наиболее центральных столкновениях $PbPb$ при $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ ТэВ для заряженных адронов, Z^0 -бозонов, W^\pm -бозонов, прямых фотонов и вторичных J/ψ -мезонов (от фрагментации b -кварков).

При этом (в пределах статистических и систематических неопределенностей) не наблюдается отклонения R_{AA} от единицы для электромагнитного рождения Z^0 -бозонов [19, 24], W^\pm -бозонов [38] и прямых фотонов [28], что подтверждает правомерность использования модели независимых нуклон-нуклонных соударений для жестких процессов, если они не модифицируются в столкновениях тяжелых ионов по сравнению с pp -взаимодействиями. Рисунок 10 суммирует зависимости фактора ядерной модификации от поперечной массы ($m_T^2 = m^2 + p_T^2$, где m — масса частицы) для различных процессов рождения в наиболее центральных соударениях ионов свинца на ЛHC (эффект подавления вторичных J/ψ -мезонов будет обсуждаться в разделе 7).

6. Гашение струй в каналах струя + струя и фотон + струя.

При энергиях ЛHC становится возможным непосредственное наблюдение в соударениях тяжелых ионов эффекта гашения реконструированных адронных струй и изучение модификации их характеристик. Одним из первых новых эффектов, свидетельствующих о формировании горячей и плотной среды в соударениях ионов свинца на ЛHC, стало наблюдение асимметрии энергии в парном рождении струй в экспериментах ATLAS [18] и CMS [23]. В дальнейшем этот эффект был более детально проанализирован в зависимости от энергии струй [31], была также исследована функция фрагментации струй [37]. Рисунок 11 показывает измеренное CMS распределение по асимметрии энергии пары струй A^J (разность поперечной энергии пары струй, деленная на их сумму) для различных центральностей столкновений $PbPb$ и pp соударений в сравнении с результатами Монте-Карло моделирования, не учитывающего эффекты плотной среды [31]. Значительное увеличение числа несбалансированных по энергии пар струй в центральных столкновениях ионов свинца по сравнению с периферическими $PbPb$ - и pp -соударениями, а также с результатами моделирования согласуется с гипотезой гашения жестких кварк-глюонных струй вследствие их перерасеяния и потерь энергии в плотной среде. Геометрически такие события соответствуют ситуации, когда вершина рождения пары струй находится близко к поверхности области ядерного перекрытия, и первая (“лидирующая”) струя выходит из среды практически без взаимодействия, в то время как вторая (“подавленная”) струя проходит через плотную материю и теряет часть энергии. Оцениваемые относительные потери энергии таких подавленных струй увеличиваются с ростом центральности и слабо зависят от их начальной энергии (которую в среднем можно оценить как энергию лидирующей струи), в наиболее центральных соударениях струи теряют в среднем ~10% их начальной энергии (рис. 12).

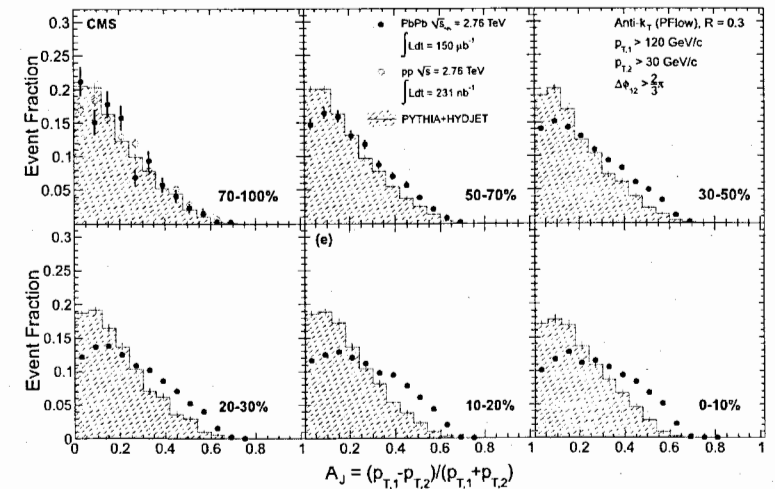


Рис. 11. Распределение по асимметрии энергии пары струй A^J для pp соударений и различных центральностей столкновений $PbPb$ при $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ ТэВ [31]. Точки — данные CMS, гистограммы — результаты Монте-Карло моделирования, не учитывающего эффекты плотной среды.

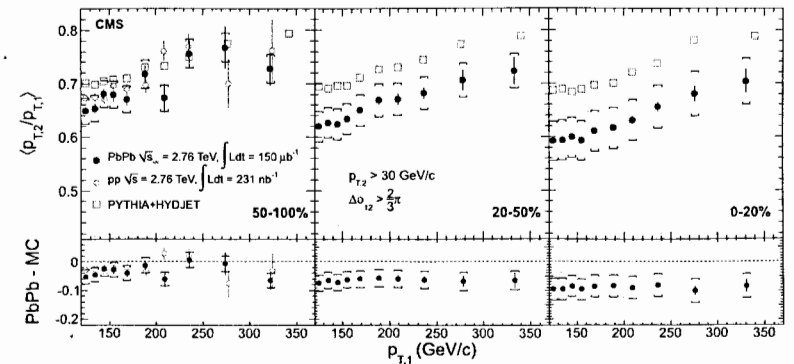


Рис. 12. Среднее отношение энергии подавленной и лидирующей струй в зависимости от энергии лидирующей струи для pp -соударений и трех центральностей столкновений $PbPb$ при $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ ТэВ [31]. Круги — данные CMS, прямоугольники — результаты Монте-Карло моделирования, не учитывающего эффекты плотной среды. На нижних рисунках показана разница между данными и результатами моделирования.

Для нахождения потерянной энергии подавленных струй анализ калориметрических струй был дополнен исследованием выхода частиц с малыми поперечными импульсами в окрестности конуса струй, измеряемых трековой системой CMS с использованием методики “недостающего поперечного импульса” [23]. Было обнаружено, что значительный вклад в энергию, выделяемую вблизи струй, приходится на треки с малыми p_T (< 2 ГэВ/с), и этот вклад увеличивается с ростом асимметрии A^J и наблюдается на достаточно больших расстояниях от оси струи. Полученный результат согласуется с предположением, что большая часть теряемой струей энергии преобразуется в рождение мягких адронов за пределами конуса струи (“широкоугольные” потери энергии кварков и глюонов в среде). Было также показано [37], что распределение по доли уносимого импульса струи (функция фрагментации) для достаточно жестких адронов ($p_T > 4$ ГэВ/с) носит универсальный характер как для лидирующих, так и для подавленных струй, практически не зависит от центральности взаимодействия и одинаково для $PbPb$ – и pp – соударений, что может свидетельствовать о том, что конечная фрагментация струй происходит за пределами плотной среды.

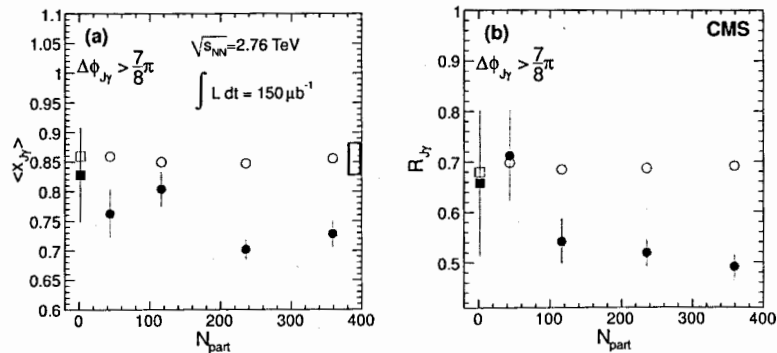


Рис. 13. Среднее отношение поперечного импульса струи и фотона $x^{J\gamma}$ (а) и доля наблюдаемых событий, в которых изолированный фотон рождается в сопровождении жесткой струи $R^{J\gamma}$ (б) в зависимости от центральности столкновений $PbPb$ при $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ ТэВ [35]. Закрашенные символы — данные CMS, открытые символы — результаты Монте-Карло моделирования, не учитывающего эффекты плотной среды (круги — $PbPb$, квадраты — pp).

Высокая статистика, набранная в сеансе 2011 года, позволила изучить асимметрию поперечной энергии в более редком канале — рождении струи в сопровождении фотона [35]. Преимуществом данного канала является то, что фотон выходит из плотной среды без взаимодействия и “калибровка” начальной энергии струи на энергию фотона может быть сделана в более чистом

виде, чем в случае с рождением пар струй. Анализировались события с рождением изолированного фотона с $p_T > 60$ ГэВ/с и адронной струи с $p_T > 30$ ГэВ/с. p_T -разбалансировка в таких событиях характеризовалась отношением поперечного импульса струи и фотона $x^{J\gamma} = p_T(jet)/p_T(\gamma)$. Можно также ввести отношение числа наблюдаемых событий фотон + струя к числу событий с рождением одиночных изолированных фотонов, $R^{J\gamma} = \langle N^{\gamma+jet} / N^\gamma \rangle$. На рисунке 13 показаны зависимости величин $x^{J\gamma}$ и $R^{J\gamma}$ от центральности взаимодействий $PbPb$ [35]. Значительное уменьшение отношения поперечного импульса струи и фотона (на ~15%) и доли наблюдаемых событий, в которых изолированный фотон рождается в сопровождении жесткой струи (на ~20%) в центральных столкновениях ионов свинца, по сравнению с периферическими $PbPb$ – и pp – соударениями и с результатами моделирования, также согласуется с гипотезой “гашения” струй в плотной среде.

7. Кварконии и тяжелые кварки.

Как уже упоминалось во введении, наблюдаемая на SPS и RHIC картина подавления выхода J/ψ – мезонов в соударениях тяжелых ионов пока не имеет однозначной интерпретации, и ожидается, что природа этого явления может быть прояснена на LHC (где также открывается новая возможность исследования различных состояний Υ –мезонов). К настоящему времени получен ряд интересных результатов по рождению кваркониев в соударениях ионов свинца на LHC [13, 19, 26, 30].

Измеренная ALICE [13] степень подавления выхода J/ψ – мезонов с малыми поперечными импульсами на LHC меньше, чем на RHIC (рис. 14) и согласуется с моделями регенерации чармония из состояния высокотемпературной кварк-глюонной материи с содержанием большого количества с-кварков. При этом подавление выхода J/ψ – мезонов с высокими поперечными импульсами ($p_T > 6.5$ ГэВ/с), измеренное ATLAS [19] и CMS [26, 30], значительно сильнее чем подавление при малых p_T , что свидетельствует об эффекте “плавления” связанных состояний с-кварков в данной кинематической области. Помимо подавления первичных J/ψ – резонансов, в эксперименте CMS впервые наблюдалось подавление выхода вторичных чармониев от распада B –мезонов [30] (рис. 10 в разделе 5), что может служить указанием на перерассеяние и потери энергии тяжелых b –кварков в плотной среде.

В эксперименте CMS в соударениях ионов свинца также впервые наблюдалось подавление выхода возбужденных состояний Υ –мезонов ($\Upsilon(2S)$, $\Upsilon(3S)$) относительно их основного состояния $\Upsilon(1S)$ (в ~6.5 раз по сравнению с pp соударениями) [26, 39] (рис. 15), согласующееся с гипотезой дебаевского экранирования цветового заряда в среде. При этом измеренные факторы ядерной модификации ($R_{AA} \sim 0.56$ для $\Upsilon(1S)$, ~0.12 для $\Upsilon(2S)$ и < 0.1 для $\Upsilon(3S)$) позволяют предположить “последовательный” характер плавления возбужденных состояний боттомония и отсутствие плавления основного со-

стояния (т.к. примерно половина $\Upsilon(1S)$ -мезонов рождается через возбужденные состояния). Этот результат также согласуется с предварительными данными эксперимента STAR на RHIC ($R_{AA} \sim 0.5$ для $\Upsilon(1S+2S+3S)$).

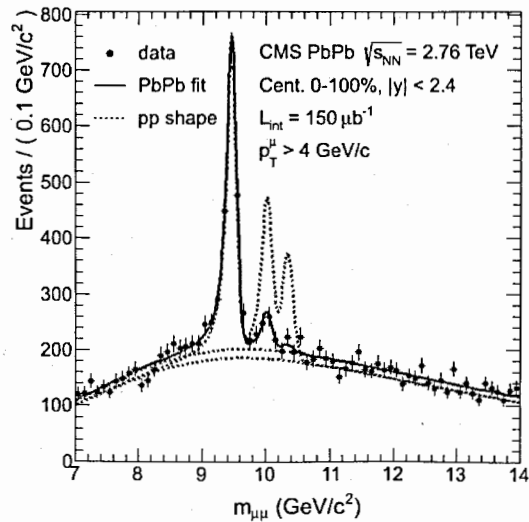


Рис. 14. Распределение по инвариантной массе мюонных пар в столкновениях $PbPb$ при $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ ТэВ [39]. Точки — данные CMS, сплошная кривая — аппроксимация данных, штриховая кривая — аппроксимация pp -данных при той же энергии на пару нуклонов.

Помимо изучения связанных состояний тяжелых кварков значительный интерес представляет анализ рождения D - и B -мезонов, спектр которых чувствителен к прохождению соответственно c - и b -кварков через плотную материю. Сравнение степени подавления инклюзивных адронов, D -мезонов и B -мезонов позволяет сравнить интенсивность перерасеяния и потерь энергии в КГМ легких и массивных партонов. Рисунок 16 показывает измеренный ALICE [14] фактор ядерной модификации D -мезонов в 20% наиболее центральных соударений ионов свинца в сравнении с данным фактором для заряженных адронов и вторичных J/ψ -резонансов от распада B -мезонов. Можно видеть тенденцию к упорядоченности R_{AA} по массе, $R_{AA}(\pi) < R_{AA}(D) < R_{AA}(B)$, что качественно согласуется с предположением об уменьшении потерь энергии кварков в среде с ростом их массы.

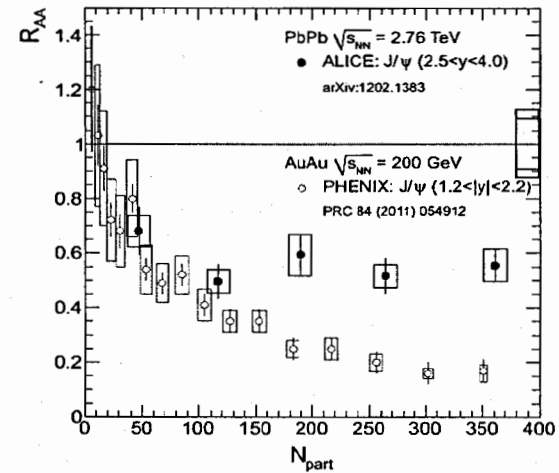


Рис. 15. Зависимость фактора ядерной модификации J/ψ -мезонов от центральности столкновений $PbPb$ при $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ ТэВ [13]. Закрашенные круги — данные LHC (ALICE), открытые круги — данные RHIC (PHENIX).

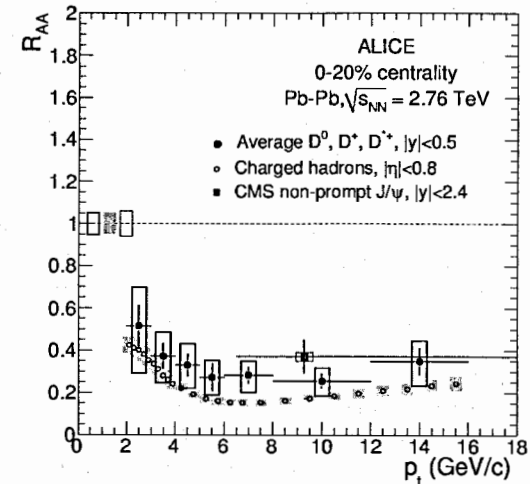


Рис. 16. Импульсная зависимость фактора ядерной модификации D -мезонов (закрашенные точки) для 20% наиболее центральных столкновений $PbPb$ при $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ ТэВ в сравнении с данным фактором для заряженных адронов (открытые точки) и вторичных J/ψ -резонансов от распада B -мезонов (закрашенный прямоугольник) [14].

8. Заключение.

Проведение экспериментов с пучками тяжелых ионов на коллайдерах RHIC и LHC дает уникальную возможность воссоздания в лабораторных условиях протоматерии, которая существовала на самых ранних стадиях развития Вселенной – кварк-глюонной плазмы, образование которой при достаточно высоких температурах или плотностях барионного заряда является одним из основных предсказаний квантовой хромодинамики. Совокупность полученных на RHIC данных (в частности, подавление выхода жестких адронов и сильная азимутальная анизотропия потока частиц) свидетельствует о проявлении коллективных эффектов на партонном уровне и говорит в пользу гипотезы формирования сильно взаимодействующей кварк-глюонной материи (“кварк-глюонной жидкости”) в соударениях тяжелых ионов.

Во время сеансов работы LHC с пучками свинца в 2010 и 2011 годах энергия столкновений была в 14 раз больше, чем на RHIC, что открыло новый режим физики взаимодействий тяжелых ионов с важной ролью жестких процессов. Оцениваемая начальная плотность энергии на LHC существенно выше чем на RHIC (и намного выше, чем критическое значение для кварк-адронного фазового перехода), что обуславливает сильные коллективные эффекты, проявляющиеся в различных новых каналах рождения (прямое наблюдения эффекта гашения струй в каналах струя + струя и фотон + струя, подавление выхода возбужденных состояний Υ -мезонов и вторичных J/ψ -мезонов). Возможно, что свойства образованной на LHC среды качественно близки к свойствам “кварк-глюонной жидкости”, наблюдаемой на RHIC. Но для более определенных выводов необходимо дальнейшее исследование различных процессов множественного рождения частиц в соударениях тяжелых ионов на LHC.

В сентябре 2013 года был проведен первый тестовый сеанс соударений протон-свинец при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ ТэВ, более длительный сеанс состоялся в начале 2013 года. Основная цель исследований протон-ядерных соударений – анализ влияния ядерных эффектов начального состояния на измеряемые в ядро-ядерных взаимодействиях физические наблюдаемые (в частности, изучение модификации партонных распределений в ядре, т.н. “ядерное экранирование”). После двухлетнего перерыва в работе LHC планируется увеличение энергии пучков ионов свинца до $\sqrt{s_{NN}} \sim 5-5.5$ ТэВ, что позволит провести дифференциальный анализ различных эффектов в соударениях тяжелых ионов в новом энергетическом режиме, а также исследовать некоторые новые каналы рождения, для которых пока не удалось накопить значительную статистику (например, рождение адронной струи в сопровождении Z^0 -бозона). В перспективе возможны также соударения более легких ионов. Можно ожидать, что после нескольких лет работы LHC с пучками тяжелых

ионов детальный анализ различных физических наблюдаемых в совокупности с данными по соударениям тяжелых ионов при более низких энергиях позволит сделать выводы о природе и свойствах образованной среды и получить новую фундаментальную информацию о кварк-глюонной структуре ядерной материи в экстремальных, малоизученных режимах сверхвысоких плотностей энергии и температур.

Литература

- [1] И.М. Дремин, А.В. Леонидов, “Кварк-глюонная среда” УФН 53 (2011) 1123.
- [2] CMS Collaboration, “Observation of long-range near-side angular correlations in proton-proton collisions at the LHC”, JHEP 1009 (2010) 091.
- [3] B. Muller, J. Schukraft, B. Wyslouch, “First results from $Pb + Pb$ collisions at the LHC”, Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. 62 (2012) 361.
- [4] ALICE Collaboration, “Charged-particle multiplicity density at mid-rapidity in central $Pb - Pb$ collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV”, Phys. Rev. Lett. 105 (2010) 252301.
- [5] ALICE Collaboration, “Elliptic flow of charged particles in $Pb - Pb$ collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV”, Phys. Rev. Lett. 105 (2010) 252302.
- [6] ALICE Collaboration, “Suppression of charged particle production at large transverse momentum in central $Pb - Pb$ collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV”, Phys. Lett. B 696 (2011) 30.
- [7] ALICE Collaboration, “Centrality dependence of charged-particle multiplicity density at mid-rapidity in $Pb - Pb$ collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV”, Phys. Rev. Lett. 106 (2011) 032301.
- [8] ALICE Collaboration, “Two-pion Bose-Einstein correlations in central $Pb - Pb$ collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV”, Phys. Lett. B 696 (2011) 328.
- [9] ALICE Collaboration, “Higher harmonic anisotropic flow measurements of charged particles in $Pb - Pb$ collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV”, Phys. Rev. Lett. 107 (2011) 032301.
- [10] ALICE Collaboration, “Harmonic decomposition of two-particle angular correlations in $Pb - Pb$ collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV”, Phys. Lett. B 708 (2012) 249.
- [11] ALICE Collaboration, “Particle-yield modification in jet-like azimuthal di-hadron correlations in $Pb - Pb$ collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV”, Phys. Rev. Lett. 108 (2012) 092301.

- [12] ALICE Collaboration, "Measurement of event background fluctuations for charged particle jet reconstruction in $Pb - Pb$ collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV", JHEP **1203** (2011) 053.
- [13] ALICE Collaboration, " J/ψ production at low transverse momentum in $Pb - Pb$ collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV", Phys. Rev. Lett. **109** (2012) 072301.
- [14] ALICE Collaboration, "Suppression of high transverse momentum D mesons in central $Pb - Pb$ collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV", JHEP **09** (2012) 112.
- [15] ALICE Collaboration, "Measurement of the cross section for electromagnetic dissociation with neutron emission in $Pb - Pb$ collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV", Phys. Rev. Lett. **109** (2012) 252302.
- [16] ALICE Collaboration, "Production of muons from heavy flavour decays at forward rapidity in pp and $Pb - Pb$ collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV", Phys. Rev. Lett. **109** (2012) 112301.
- [17] ALICE Collaboration, "Anisotropic flow of charged hadrons, pions and (anti-) protons measured at high transverse momentum in $Pb - Pb$ collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV", Phys. Lett. B **719** (2013) 18.
- [18] ATLAS Collaboration, "Observation of a centrality-dependent dijet asymmetry in lead-lead collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV with the ATLAS detector at the LHC", Phys. Rev. Lett. **105** (2010) 252303.
- [19] ATLAS Collaboration, "Measurement of the centrality dependence of J/ψ yields and observation of Z production in lead-lead collisions with the ATLAS detector at the LHC", Phys. Lett. B **697** (2011) 294.
- [20] 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.
- [21] ATLAS Collaboration, "Measurement of the centrality dependence of the charged particle pseudorapidity distribution in lead-lead collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV with the ATLAS detector", Phys. Lett. B **710** (2012) 363.
- [22] ATLAS Collaboration, "Measurement of the azimuthal anisotropy for charged particle production in $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV lead-lead collisions with the ATLAS detector", Phys. Rev. C **86** (2012) 014907.
- [23] CMS Collaboration, "Observation and studies of jet quenching in $PbPb$ collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV", Phys. Rev. C **84** (2011) 024906.
- [24] CMS Collaboration, "Study of Z boson production in $PbPb$ collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV", Phys. Rev. Lett. **106** (2011) 212301.
- [25] CMS Collaboration, "Long-range and short-range dihadron angular correlations in central $PbPb$ collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV", JHEP **07** (2011) 76.
- [26] CMS Collaboration, "Indications on suppression of excited Y states in $PbPb$ collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV", Phys. Rev. Lett. **107** (2011) 052302.
- [27] CMS Collaboration, "Dependence on pseudorapidity and on centrality of charged hadron production in $PbPb$ collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV", JHEP **08** (2011) 141.
- [28] CMS Collaboration, "Measurement of isolated photon production in pp and $PbPb$ collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV", Phys. Lett. B **710** (2012) 256.
- [29] CMS Collaboration, "Study of high-pT charged particle suppression in $PbPb$ compared to pp collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV", Eur. Phys. J. C **72** (2012) 1945.
- [30] CMS Collaboration, "Suppression of non-prompt J/ψ , prompt J/ψ , and $Y(1S)$ in $PbPb$ collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV", JHEP **05** (2012) 063.
- [31] CMS Collaboration, "Jet momentum dependence of jet quenching in $PbPb$ collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV", Phys. Lett. B **712** (2012) 176.
- [32] CMS Collaboration, "Centrality dependence of dihadron correlations and azimuthal anisotropy harmonics in $PbPb$ collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV", Eur. Phys. J. C **72** (2012) 2012.
- [33] CMS Collaboration, "Measurement of the elliptic anisotropy of charged particles produced in $PbPb$ collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV", Phys. Rev. C **87** (2013) 014902.
- [34] CMS Collaboration, "Azimuthal anisotropy of charged particles at high transverse momenta in $PbPb$ collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV", Phys. Rev. Lett. **109** (2012) 022301.
- [35] CMS Collaboration, "Studies of jet quenching using isolated photon+jet correlations in $PbPb$ and pp collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV", Phys. Lett. B **718** (2013) 773.
- [36] CMS Collaboration, "Measurement of the pseudorapidity and centrality dependence of the transverse energy density in $PbPb$ collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV", Phys. Rev. Lett. **109** (2012) 152303.
- [37] CMS Collaboration, "Measurement of jet fragmentation into charged particles in pp and $PbPb$ collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV", JHEP **10** (2012) 087.
- [38] CMS Collaboration, "Study of W boson production in pp and $PbPb$ collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV", Phys. Lett. B **715** (2012) 66.
- [39] CMS Collaboration, "Observation of sequential Y suppression in $PbPb$ collisions", Phys. Rev. Lett. **109** (2012) 222301.

ДИСКУССИЯ ПОСЛЕ ДОКЛАДА

ИЯИ РАН, Москва

Вопрос: Что Вы можете сказать о перспективах прецизионных измерений кваркониев при хорошем разрешении, например в эксперименте LHC-B? Планируются ли такие работы в будущем?

И.П.: Этот вопрос лучше всего адресовать к участникам этого эксперимента. По моим сведениям вершинный детектор LHC-B не может работать условиях высокой множественности при столкновении ядер свинца. Однако в протон-ядерных столкновениях, ожидаемых в конце 2012 г., это вполне возможно, и LHC-B планирует работать в таком режиме. Разрешение этого детектора позволяет разделить не три состояния Υ , как на CMS, а четыре.

ФИАН РАН, Москва

Вопрос: Какая ситуация по сравнению модели HIJET с моделью HIJING?

И.П.: Наша модель HIJET сейчас используется в CMS, как реперная точка сравнения моделирования Монте-Карло с данными. Модель была настроена на данных и описывает различные физические наблюдаемые (спектр частиц, множественность, фактор ядерной модификации и т.д.) довольно хорошо. Но эффекты типа “ридж” или другие корреляционные эффекты мы пока описать не можем.

ЦЕРН, Женева

Вопрос: Насколько оправдано сравнение состояний, которое было в ранней Вселенной, с тем, что образуется в столкновении ионов? Все-таки, в ядро-ядерных взаимодействиях наблюдаются встречные потоки, гидродинамика, турбулентность, а там было другое состояние. Состояние тоже с большой плотностью и температурой, и по этим характеристикам их можно сравнивать, но кинетика взаимодействия, все-таки, не совсем одинакова.

И.П.: Все верно. Мы говорим об аналогии с ранней Вселенной в том смысле, что была похожая энергия, похожая температура, и возможно, что этот кварк-глюонный “суп” существовал тогда, и процессы были похожи. Кинематика же была другой, даже симметрия взаимодействия различается – в ранней Вселенной сферическая, у нас в эксперименте на встречных пучках – цилиндрическая.

ОИЯИ, Дубна

Вопрос: Вы говорили о подавлении J/ψ , т.е. статистики довольно много. В работах на Тэватроне, в частности в эксперименте D0, исследовались поляри-

зационные эффекты J/ψ . Было бы интересно посмотреть такие же эффекты на CMS в столкновении ядер.

И.П.: Поляризация J/ψ в столкновении протонов исследовалась на LHC в эксперименте ALICE, в экспериментах ATLAS и CMS пока таких работ не было. Напрямую такие измерения делать сложно, но можно попробовать использовать угловые корреляции, по которым возможно определить механизмы рождения кваркониев. Например, азимутальная корреляция между кварконием и адронами может сделать выбор между синглетным или октетным механизмом.

Вопрос: Можно ли в настоящий момент сказать с определенностью, что есть такая среда, как кварк-глюонная плазма или этот вопрос все еще открыт? Действительно ли мы наблюдаем деконфайнмент?

И.П.: Мне кажется, что то, что мы видим – это плотная ядерная среда с коллективными свойствами и большой плотностью энергии. Но четко сказать, что это деконфайнмент – это вопрос модельных интерпретаций, указания на это есть. Сказать, что это на 100% доказанный факт, наверное, нельзя.

Вопрос: Вы говорили, что в центральных взаимодействиях мы наблюдаем рекомбинацию J/ψ .

И.П.: Нет, рекомбинацию ψ' . Дело в том, что если у нас есть только подавление, то конечно ψ' должно быть подавлено относительно J/ψ . Если же у нас есть область, где ψ' больше, чем J/ψ , то одной из возможных интерпретаций этого эффекта является процесс рекомбинации кваркониев, который для ψ' более сильный, чем для J/ψ . Это согласуется с тем, что у нас подавление более значительно при больших p_T , потому что в этой области поперечных импульсов эффект рекомбинации работать не должен. Но пока однозначной интерпретации у теоретиков нет, потому что эти данные появились чуть более недели назад.

Вопрос: Какие экспериментальные сигнатуры наиболее критичны с точки зрения разделения моделей?

И.П.: Модели должны воспроизводить основные характеристики – множественность, спектры частиц. Далее дифференциальные наблюдаемые – подавление струй, подавление кваркониев, гидродинамические потоки. Но надо рассматривать всю совокупность наблюдаемых.

1000

Научное издание

ФИЗИКА НА LHC

*Труды объединенного семинара
сотрудничества RDMS CMS*

Выпуск 3

2013-73

Ответственный за подготовку сборника к печати *С. В. Шматов.*

Сборник отпечатан методом прямого репродуцирования
с предоставленных оригиналов.

Подписано в печать 25.07.2013.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 7,13. Уч.-изд. л. 7,64. Тираж 300. Заказ № 58030.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований

141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/