

с 346/04
фр-503

ФИЗИКА НА LHC

Труды
объединённого семинара
RDMS CMS

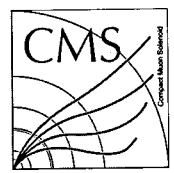
Выпуск 2

2011

C346/09
Ф-503

PHYSICS AT THE LHC

Proceedings of
Joint Seminar of RDMS CMS
Collaboration

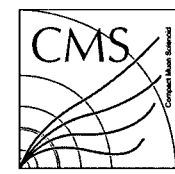


Volume 2
2011

Dubna 2011

ФИЗИКА НА LHC

Труды
объединенного семинара
сотрудничества RDMS CMS



Выпуск 2
2011

Объединенный институт
ядерной физики
Дубна 2011
БИБЛИОТЕКА

150373

Редакционная коллегия:

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

Обработка материалов: *И. И. Мигулина, М. В. Савина*
Фотографии: *В. Е. Жильцов, Н. Степаненков*

Физика на LHC: Труды объединенного семинара сотрудничества
Ф48 RDMS CMS. — Дубна: ОИЯИ, 2011. — Вып. 2. — 92 с.
ISBN 978-5-9530-0294-3

В очередной сборник трудов объединенного семинара сотрудничества RDMS CMS вошли лекции ведущих российских ученых о перспективах исследований процессов физики стандартной модели, поисках бозона Хиггса, изучении свойств кварк-глюонной среды. Отдельная лекция посвящена проблемам темной материи и асимметрии между веществом и антивеществом и возможным путям их решения с помощью Большого адронного коллайдера.

УДК [539.107 + 539.12] (092)

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 широкомасштабное 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.jinr.ru/>

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

СОДЕРЖАНИЕ

<i>В.А. Рубаков</i> Космология и Большой адронный коллайдер.....	9
<i>М.И. Высоцкий</i> Стандартная модель и LHC.....	47
<i>А.Н. Никитенко</i> Бозон Хиггса и перспективы его открытия на LHC.....	65
<i>И.М. Дрёмин</i> Кварк-глюонная среда.....	79

Содержание

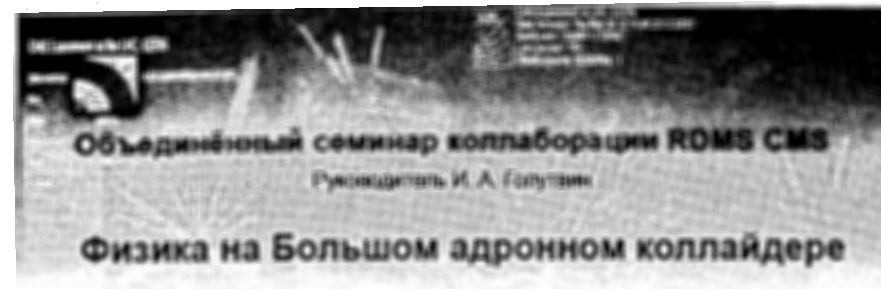
В. А. Козлов
Космологическая модель с переменным параметром Хаббла

М. В. Козлов
Свойства решений уравнений Эйнштейна для космологической модели с переменным параметром Хаббла

А. В. Козлов
Роль уравнения состояния в космологии с переменным параметром Хаббла

И. В. Козлов
Вопросы космологии с переменным параметром Хаббла

КОСМОЛОГИЯ И БОЛЬШОЙ АДРОННЫЙ КОЛЛАЙДЕР



Очередное заседание Семинара состоится 19 мая 2010 г. в 15:00 в Конференц-зале Института ядерных исследований РАН («Питомник») по адресу: Москва, Проспект 60-летия Октября, 7-А.

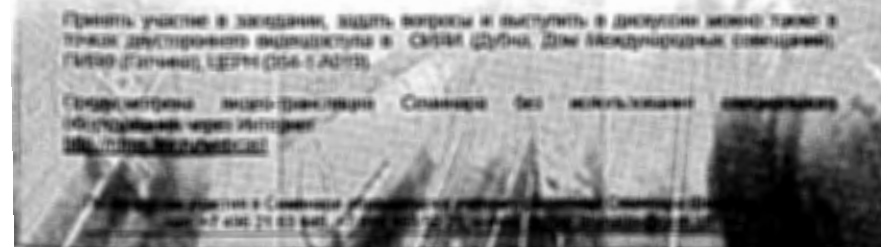
ПРОГРАММА

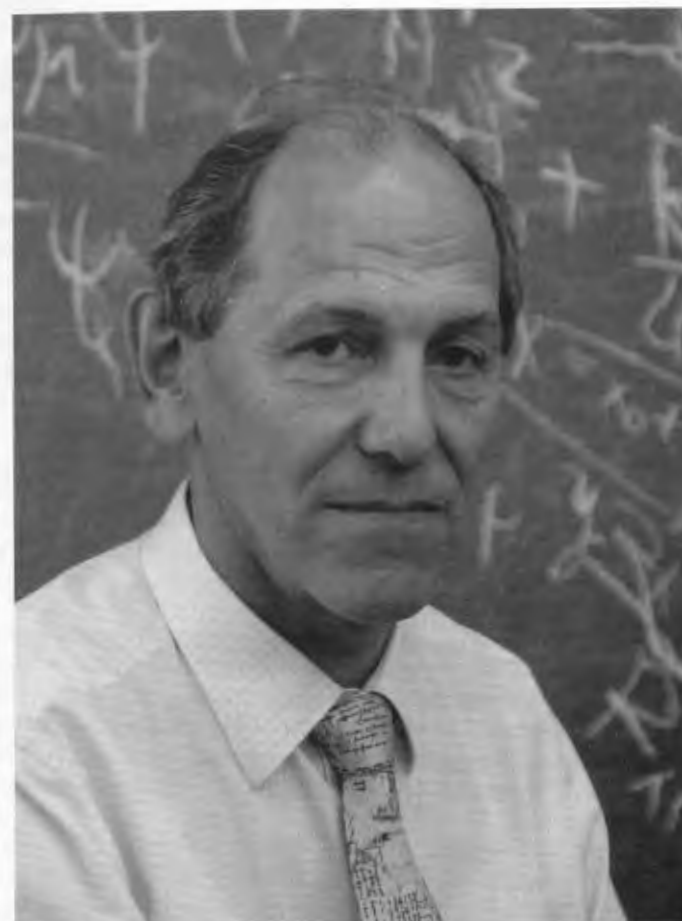
«Космология и Большой адронный коллайдер» Докладчик акад. В. А. Рубаков

Современная космология дает самые серьезные аргументы, свидетельствующие о необходимости существенного расширения представлений об элементарных частицах и их взаимодействиях на сверхмалых расстояниях. Это, во-первых, сам факт наличия вещества и отсутствия антивещества во Вселенной. Образование такой асимметрии требует реализации определенных условий в первые мгновения после Большого взрыва, что невозможно в рамках существующей теории - Стандартной модели физики частиц. Во-вторых, во Вселенной имеется темная материя, частицы которой стабильны, имеют массу (возможно, большую по меркам физики частиц) и чрезвычайно слабо взаимодействуют с веществом. В Стандартной модели таких частиц нет.

Имеются довольно веские теоретические аргументы в пользу того, что энергетические масштабы, связанные с темной материей и, возможно, асимметрией между веществом и антивеществом, находятся в области, доступной изучению на Большом адронном коллайдере.

Этим и другим аспектам связи космологии с экспериментами на Большом





Академик РАН Валерий Анатольевич Рубаков,
главный научный сотрудник Теоретического отдела
ИЯИ РАН (Троицк)

КОСМОЛОГИЯ И БОЛЬШОЙ АДРОННЫЙ КОЛЛАЙДЕР

В.А. Рубаков

Институт теоретической и экспериментальной физики, Москва

Современная космология дает самые серьезные аргументы, свидетельствующие о необходимости существенного расширения представлений об элементарных частицах и их взаимодействиях на сверхмалых расстояниях. Это, во-первых, сам факт наличия вещества и отсутствия антивещества во Вселенной. Образование такой асимметрии требует реализации определенных условий в первые мгновения после Большого взрыва, что невозможно в рамках существующей теории – Стандартной модели физики частиц. Во-вторых, во Вселенной имеется темная материя, частицы которой стабильны, имеют массу (возможно, большую по меркам физики частиц) и чрезвычайно слабо взаимодействуют с веществом. В Стандартной модели таких частиц нет. Имеются довольно веские теоретические аргументы в пользу того, что энергетические масштабы, связанные с темной материей и, возможно, асимметрией между веществом и антивеществом, находятся в области, доступной изучению на Большом адронном коллайдере. Этим и другим аспектам связи космологии с экспериментами на Большом адронном коллайдере и будет посвящена статья.

Тема о связи космологии с новой физикой на Большом адронном коллайдере (БАК), которую мы, возможно, увидим в самом недалеком будущем, уже стала достаточно традиционной. Тем не менее, она привлекает всеобщий интерес, поскольку вопросы о том, что происходило в ранней Вселенной, как она развивалась на разных этапах своей эволюции, волнуют многих из нас. В настоящее время теория, описывающая состав частиц и фундаментальные взаимодействия между ними, Стандартная модель физики частиц (СМ), проверена вплоть до расстояний 10^{-16} см и соответствующих энергий порядка сотни ГэВ. Сейчас мы подошли к неизведанному порогу энергий, и из разных соображений, в том числе – космологических, достаточно очевидно, что перед физикой элементарных частиц встают вопросы, на которые она еще не отвечала, вопросы совершенно нового типа. Скорее всего, в ближайшие годы взгляд на то, как устроены законы природы, будет существенно дополнен и расширен, и в значительной степени это случится благодаря экспериментам на БАК.

Если говорить о космологии, то она дает, пожалуй, наиболее надежные экспериментальные свидетельства того, что СМ неполна, и должен произойти выход за ее рамки. Обсуждению причин и мотиваций для такого выхода и посвящен этот доклад.

За последние 15 – 20 лет космология стала точной наукой, и сейчас существует множество наблюдательных данных, которые, как мы увидим

ниже, хорошо согласуются с теоретическими представлениями. Измерения свойств как современной, так и ранней Вселенной сегодня характеризуются достаточно высокой точностью. Среди этих данных можно отметить измерение светимости объектов, которые считаются (с оговорками), «стандартными свечами», – сверхновых типа Ia. Благодаря им мы знаем темп расширения Вселенной сегодня, а также то, как этот темп менялся в сравнительно недалеком прошлом. Второй тип измерений – глубокие обзоры галактик и квазаров. Здесь речь идет о нескольких миллионах наблюдаемых объектов и масштабах расстояний вплоть до 5 гигапарсек (15 млрд. световых лет). Именно для таких масштабов уже получена карта Вселенной и выяснено, какие имеются структуры и как они эволюционировали сейчас и в сравнительно недалеком прошлом (под «сравнительно недалеким» понимается время несколько млрд лет назад, реально – около 10 млрд.). Картина ближней Вселенной (Рис. 1), полученная еще в середине 90-х гг. прошлого века, демонстрирует, как выглядит все вышесказанное, и насколько быстро развивается эта область. Масштаб здесь – 1,5 млрд. световых лет (500 мегапарсек). На рисунке можно видеть большие «скупивания» вещества, чередующиеся с пустотами. Так что на масштабе меньше нескольких десятков мегапарсек Вселенная, конечно же, неоднородна – в ней есть галактики, скопления галактик, галактические пустоты. Но, если говорить о больших масштабах и о Вселенной в целом, то она однородна, что и показывает следующая карта (Рис. 2) на масштабе гигапарсек.

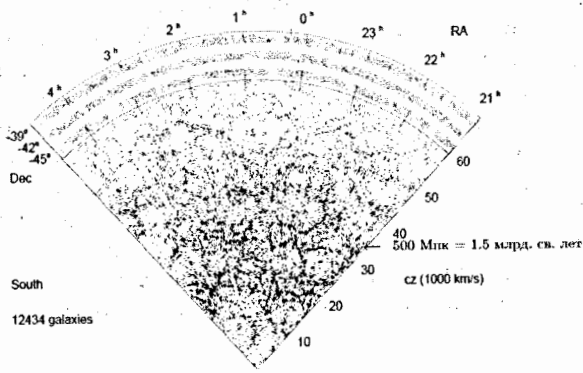
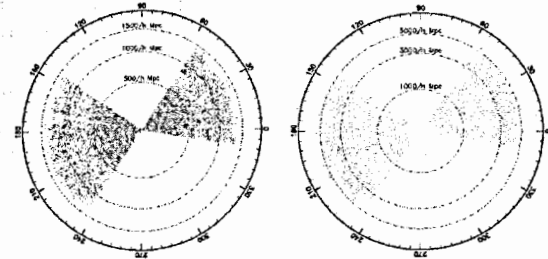


Рис.1. Ближняя Вселенная (Las Campanas, середина 1990-х)



Галактики

Квazarы

Рис. 2. Галактики и квазары на масштабе гигапарсек (SDSS, текущее десятилетие)

Таким образом, основное свойство современной Вселенной – это то, что она везде одинакова (если говорить об усреднении по областям пространства размерами в сотни мегапарсек и больше). Вселенная изотропна. Она расширяется, области (или «боксы») пространства растягиваются, и темп этого расширения, как я уже говорил, известен и в настоящее время, и для прошлых эпох. Вселенная – «теплая», в ней есть реликтовое излучение с температурой 2,725 К (это тепловое электромагнитное излучение впервые было обнаружено Пензиасом и Вильсоном в 50-х годах прошлого века). Это говорит нам о том, что в прошлом температура была гораздо более высокой – она постепенно понижалась в процессе расширения Вселенной. И был некий момент в прошлом, отвечающий переходу из плазменного состояния среды в газообразное.

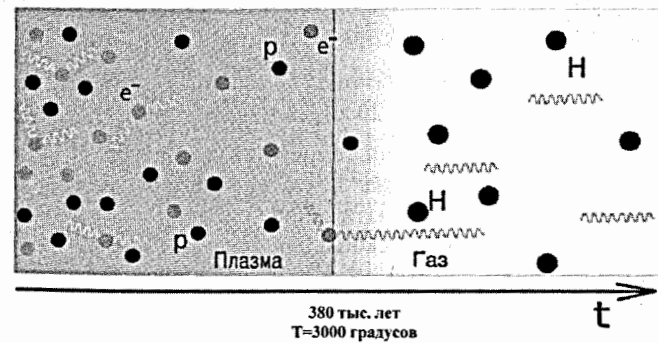


Рис. 3. Переход плазма-газ в ранней Вселенной

На рис.3 схематично показано, что до момента, пока сохранялось плазменное состояние, в горячей среде были отдельные протоны и электроны, которые

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

активно взаимодействовали друг с другом и рассеивались в плазме. Но в некий момент, называемый моментом рекомбинации (соответствующим температуре 3000 К), из несвязанных протонов и электронов образовались атомы водорода, а фотоны отделились и с тех пор путешествуют во Вселенной свободно и без взаимодействий. Поэтому реликтовое излучение несет на себе отпечаток состояния Вселенной в момент рекомбинации, когда возраст Вселенной составлял всего лишь 380 тыс. лет. По сравнению с сегодняшним значением около 13,7 млрд. лет это, конечно, очень юный возраст.

На хорошо известной «фотографии» микроволнового излучения (Рис. 4), снятой для всей видимой небесной сферы (в реальности эта панорама получается после обработки экспериментальных наблюдаемых с применением специального математического аппарата), отчетливо видны области, отмеченные разным цветом, от фиолетового к красному, по степени возрастания температуры. Это говорит о том, что Вселенная была не вполне неоднородной в то время (она и сейчас неоднородна, конечно), были области как более, так и менее плотные.

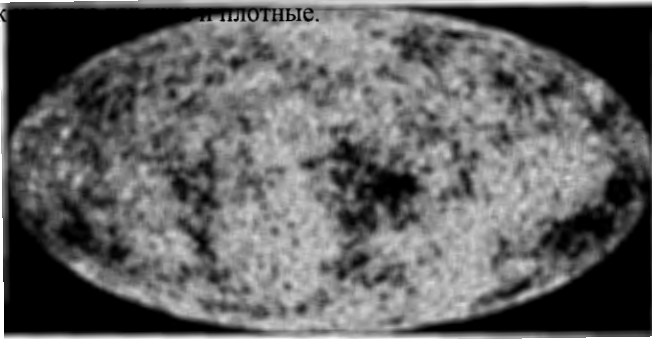


Рис. 4. Реконструированная карта анизотропии реликтового излучения (WMAP, 2006)

Относительная величина флуктуаций температуры на небесной сфере очень мала, $\delta T/T \sim 10^{-5}$. Замечательно, однако, что эти малые флуктуации все же вполне обнаружимы и измеримы. И именно они и стали зародышами тех структур (первых звезд, галактик, скоплений галактик), которые мы сейчас наблюдаем во Вселенной. Как видно, тут есть неоднородности с самыми разными угловыми масштабами, как большими, так и более мелкими, то есть неоднородности характеризовались целым спектром длин волн. Здесь мы ведем речь о длинах волн потому, что неоднородности в горячей плазме – это, фактически, звуковые волны, существовавшие в горячей Вселенной до момента рекомбинации. Описание этой картины делается в терминах разложения Фурье по сферическим гармоникам на небесной сфере:

$$\frac{\delta T}{T}(\theta, \varphi) = \sum_{l,m} a_{lm} Y_{lm}(\theta, \varphi) \quad (1)$$

Измеряемые в экспериментах коэффициенты при индивидуальных сферических гармониках, точнее, значения $\langle a_{lm}^* a_{lm} \rangle = C_l$ (на графиках обычно показывают величину $D_l = C_l/2\pi l(l+1)$) при пересчете дают флуктуации температуры на разных угловых масштабах. Здесь l – номер гармоники, так что чем больше этот номер, тем больше соответствующий импульс. Соответственно, тем меньше получается угловой масштаб неоднородности и длина звуковой волны. Существенная физика здесь – это, в первую очередь, первичные флуктуации плотности, которые существовали в совсем ранней Вселенной, еще до стадии горячего Большого взрыва и в первые его моменты. Они должны быть как-то заложены в теорию, источником может быть инфляция или что-то другое, но в любом случае это должен быть некий этап эволюции Вселенной, предшествовавший Большому взрыву. Поэтому спектр первичных неоднородностей – это один из параметров, который нужно заложить «руками» или (желательно) получить из более «высокой» теории.

Второй важный аспект – это развитие звуковых волн в космической среде, с момента начала горячей стадии и до окончания рекомбинации. Понятно, что состав космической плазмы играет здесь ключевую роль, и один из главных параметров – отношение числа барионов и фотонов. Это отношение извлекается с хорошей точностью из измерений свойств реликтового излучения. Ну и, наконец, на свойства реликтового излучения влияет распространение фотонов после рекомбинации, то есть история расширения Вселенной с того момента и до наших дней, а также геометрия пространства. Последняя влияет самым непосредственным образом, поскольку мы осуществляем измерения угловых масштабов. Длины волн видны под разными углами в разной геометрии. В открытой Вселенной с отрицательной кривизной или же в замкнутой Вселенной с положительной (сферической трехмерной) кривизной углы будут разными.

Рис.5 показывает спектр флуктуаций температуры реликтового излучения в зависимости от углового масштаба или от мультипольного числа l . В этом угловом спектре есть вполне отчетливые структуры, пики и провалы. Видно, что анизотропия космического микроволнового фонового излучения промерена до довольно больших номеров гармоник, и у нас имеется целая характерная кривая. Что здесь важно – во-первых, сами положения пиков и номер гармоники, на которую приходится максимум флуктуаций. Что это означает? Это означает, что во Вселенной на момент рекомбинации была некая характерная длина волны, для которой звуковые волны были наиболее развиты, их амплитуда была наибольшей. Именно на этой характерной длине волны (точнее, в узком диапазоне длин волн) наиболее сильны флуктуации температуры. Это проявляется в угловой

зависимости на угловых масштабах, примерно соответствующих полтора-двум градусам, где флуктуации наиболее заметны. Данную длину волны мы видели бы под разными углами в пространствах с разной геометрией, поэтому отсюда мы делаем вывод о геометрии нашего пространства. Так вот, геометрия наша — евклидова, поскольку именно случаю плоского пространства соответствует такое расположение пиков в угловом спектре, как показано выше. Четырехмерная пространственно-временная кривизна, конечно, существует, она отвечает расширению нашей Вселенной, а вот трехмерная пространственная кривизна равна нулю, в соответствии с измеренным спектром анизотропии микроволнового излучения. Таким образом, закон о равенстве суммы углов треугольника 180 градусам соблюдается для треугольников со сторонами вплоть до сорока миллиардов световых лет! Экспериментальный факт об евклидовости нашего пространства с точки зрения общей теории относительности совсем не является обязательным. Кроме прочего, надо заметить, что также это означает, что мы видим далеко не всю Вселенную, и доступная сейчас для наблюдений область пространства составляет не более одного процента полного ее объема. А скорее всего, мы видим даже еще меньшую часть полной Вселенной.

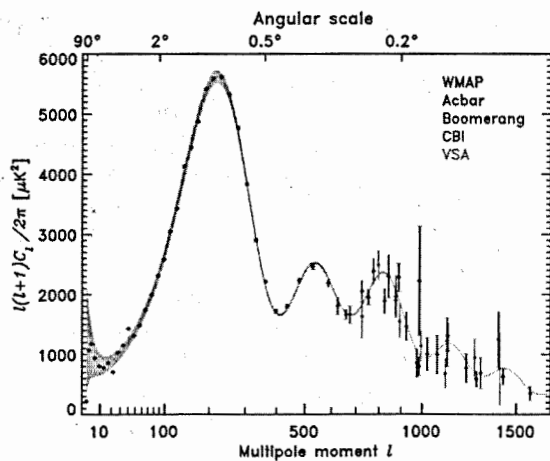
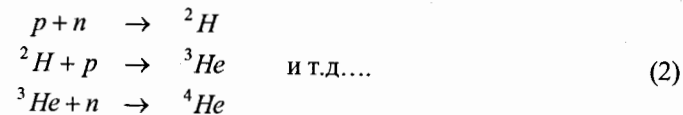


Рис. 5. Спектр мощности реликтового излучения в зависимости от углового масштаба (данные пяти экспериментов, сплошная линия отвечает теоретическим предсказаниям).

Теперь обратимся к возможности заглянуть в более ранние моменты жизни Вселенной (до рекомбинации), от одной секунды до трех минут. И изучить стадии эволюции, которые характеризовались температурами от десятков кэВ до, примерно, 1 МэВ. Это — стадии, на которых происходили

термоядерные реакции, и из первичных протонов и нейтронов, до того существовавших независимо, стали образовываться легкие ядра: дейтерий, ^3He , ^4He :



Измерение реликтовых концентраций этих легких изотопов позволяет убедиться, что мы хорошо и правильно понимаем эволюцию ранней Вселенной во времена от секунды до нескольких минут после Большого взрыва. По космологическим меркам, МэВ — это, все-таки, не безумно высокая температура, поэтому термин «ранняя», применительно к эволюции Вселенной, тут надо понимать адекватно. Что было раньше, то есть при температурах выше 1 МэВ, сегодня мы не знаем. Реально нет никаких экспериментальных данных и свидетельств относительно стадий эволюции до 1 секунды. Как Вселенная развивалась и изменялась теоретически понятно, но экспериментально неизвестно. Так что, как мы все надеемся, в этом отношении БАК нам должен что-то подсказать.

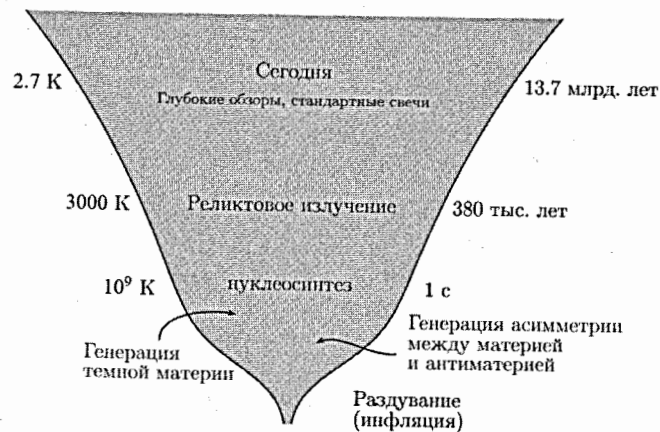


Рис. 6. Этапы эволюции Вселенной и данные о них

Все, что мы знаем сегодня о Вселенной, составляет вполне самосогласованную картину. Есть целый ряд разных наблюдений, согласующихся друг с другом (реликтовое излучение, наблюдение структур во Вселенной и пр.). Но самый интригующий момент заключается в том, что полученная картина ортогональна тому, что известно в физике элементарных частиц. И вот сейчас мы переходим к обсуждению этой нестыковки.

ТЕМНАЯ МАТЕРИЯ ВО ВСЕЛЕННОЙ

Итак, еще раз, что мы знаем сегодня о Вселенной? Она плоская, она расширяется, темп этого расширения сегодня определяется современным значением параметра Хаббла

$$\frac{d \ln R}{dt} = H_0 = \frac{1}{14 \cdot 10^9 \text{ years}} \quad (3)$$

Так что за следующие 14 млрд. лет Вселенная расширится еще примерно вдвое. Мы знаем уравнение эволюции Вселенной, и все, что сейчас известно из эксперимента, подтверждает этот факт. Уравнение эволюции пространственно-плоской Вселенной имеет очень простой вид (уравнение Фридмана):

$$H_0^2 = \frac{8\pi}{3} G \rho_0 \quad (4)$$

То есть темп расширения (здесь он записан для своего современного значения) в квадрате пропорционален полной плотности энергии во Вселенной (полной плотности всех существующих форм материи), и коэффициент пропорциональности в этом соотношении есть ньютоновская гравитационная постоянная. Отсюда, при известном темпе расширения, можно найти современное значение плотности энергии во Вселенной. Она получается небольшой, $\rho_0 = (5,3 \pm 0,5) \text{ ГэВ}/\text{м}^3$. Разные виды материи дают разные вклады в это полное значение. В частности, если бы плотность энергии в основном обуславливалась барионами, то это означало бы, что во Вселенной в среднем присутствует порядка пяти барионов на кубометр. На самом же деле их гораздо меньше, поскольку измерения реликтового излучения и примеси легких элементов в первичной плазме независимо друг от друга и от других измерений позволяют оценить плотность барионов в современной Вселенной, равную $\rho_B = 0,24 \text{ ГэВ}/\text{м}^3$, то есть всего порядка 4,5 % от полной. Относительно других частиц. Про нейтрино мы знаем, что их масса заведомо меньше 2 эВ, и легко рассчитать, сколько их всего во Вселенной. Тогда получается, что они дают заведомо меньший, чем барионы, вклад в полную плотность энергии. И еще меньший вклад приходит от фотонов и электронов. Все остальное сосредоточено в темной материи (ТМ, примерно 20 % полной плотности энергии), и в темной энергии (ТЭ, 72 – 75 %). Вот это и есть то место, в котором СМ становится неполной – нам требуется ТМ и ТЭ.

Без ТМ никак невозможно обойтись в согласованной картине Вселенной. Поскольку помимо того, что есть «недостача» в измеренной плотности барионов, по сравнению с полной измеренной плотностью энергии, ТМ видна по своим гравитационным эффектам. Во-первых, есть

данные по образованию галактик и скоплений галактик в процессе эволюции Вселенной, и есть непосредственные измерения гравитационных потенциалов этих объектов. То есть для различных масштабов от примерно десятков килопарсек и до нескольких мегапарсек существуют независимые измерения гравитационных потенциалов. Например, для скоплений галактик существует весьма продвинутый метод (один из) – измерение гравитационного потенциала по эффекту гравитационного линзирования.

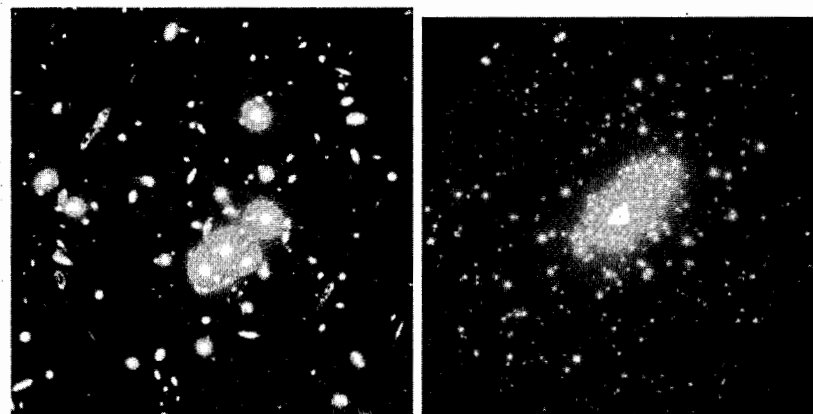


Рис. 7. Гравитационное линзирование света от галактик на большом скоплении (слева) и восстановленное распределение темной материи (справа).

На рис.7 слева показан регистрируемый телескопами видимый свет (желтые галактики принадлежат скоплению, а голубым показаны мнимые изображения далекой галактики, расположенной за большим скоплением). А справа дано восстановленное распределение ТМ. Видно, что оно гораздо менее «комкастое», более плавное, без ярко выраженных структур, и оно совсем не совпадает с распределением обычного вещества, в том смысле, что в галактиках гораздо меньше локальных концентраций темного вещества, по сравнению с распределением обычного вещества. ТМ распределена по скоплению галактик сравнительно равномерно, а обычное вещество сильнее локализовано в структуры. Эти измерения позволяют определить гравитационный потенциал и, соответственно, плотность массы ТМ в галактиках.

Вот один замечательный и тоже довольно известный пример – два столкнувшихся скопления галактик, то, что называется Bullet кластер (Рис. 8). Слева и справа линиями изображены эквипотенциальные поверхности гравитационных потенциалов, измеренных с помощью гравитационного линзирования, а яркими цветами на правой картинке обозначен горячий газ, который дает основную часть барионной плотности в галактиках. Видно, что основная масса, создающая гравитационный потенциал, и барионы оказались

разнесенными друг относительно друга. Интерпретация этого факта такова. Барионы взаимодействуют друг с другом, при столкновении они тормозятся и «отстают», что и выражают близко расположенные яркие цветные пятна, а ТМ практически не взаимодействует сама с собой и с обычной материей (точнее, взаимодействует только гравитационно), поэтому при столкновении двух скоплений она пролетает без задержек и далеко разлетается в разные стороны. Таким образом, барионы не привязаны к ТМ, которая «живет своей жизнью».

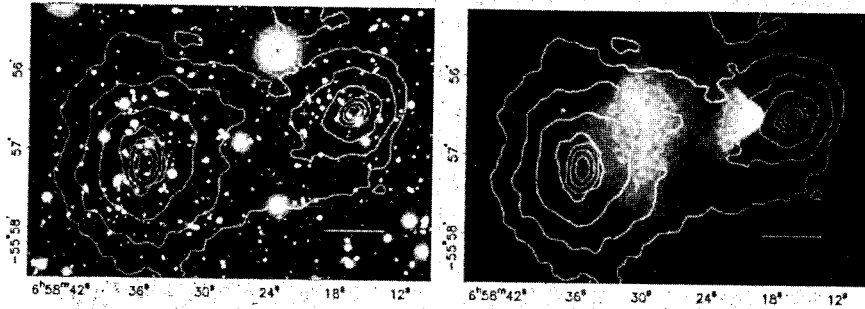


Рис. 8. Столкнувшиеся скопления галактик и распределения обычной материи и темной материи в них

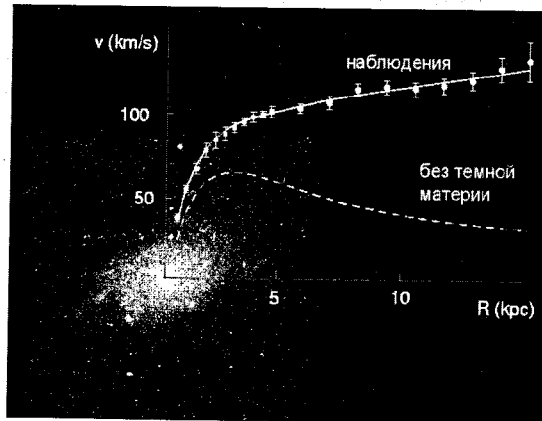


Рис. 9. Пример кривой вращения в галактике

Кроме того, есть независимые измерения для сотен или даже уже около тысячи галактик по кривым вращения на периферии галактик (Рис. 9). Скорость удаленных звезд или облаков газа держится более-менее

постоянной при увеличении расстояния от центра (хотя для каких-то галактик она слегка растет, а для других – слегка падает). Примерное постоянство скоростей вращения означает, что в темной области на периферии галактик, где нет никаких светящихся объектов, существует ТМ, обеспечивающая гравитационный потенциал и высокую скорость обращения звезд и газа вокруг галактик.

Картинок, аналогичных рис.9, существует достаточно много, они все весьма похожи друг на друга и четко показывают, что практически все галактики обладают ТМ с довольно большим гало. Таким образом, ТМ не является неким «излишеством» во Вселенной, она существенна для построения согласованного описания и объяснения экспериментальных наблюдаемых.

Кроме того, ТМ не просто важна, она в определенном смысле жизненно важна, и дело тут вот в чем. Мы знаем, какие неоднородности были в ранней Вселенной на момент рекомбинации у барионной компоненты. По величине эти неоднородности были порядка неоднородностей температуры:

$$\delta_B \equiv \left(\frac{\delta \rho_B}{\rho_B} \right)_{rec} \approx \left(\frac{\delta T}{T} \right)_{CMB} = (\text{a few}) \cdot 10^{-5} \quad (5)$$

Решая уравнения ОТО, можно убедиться, что на последующих стадиях происходит рост неоднородностей в барионной материи. И, если бы не было ТМ, этот рост был бы обратно пропорционален температуре. С расширением Вселенной более плотные области притягивают к себе остальное вещество, и этот процесс постепенно усиливается. Но происходит это, как уже говорилось, не очень быстро, всего лишь обратно пропорционально температуре, $\delta \rho / \rho(T) \propto T^{-1}$. Поэтому, если бы не было ТМ, сегодняшняя величина флуктуаций плотности во Вселенной оценивалась бы как начальное значение (5), умноженное на обратное отношение температур на сегодняшний момент и на момент рекомбинации. Сегодня температура составляет 2,7 К, на момент рекомбинации она была 3000 К, так что фактор роста – порядка 1100 К. Для флуктуаций получается

$$\left(\frac{\delta \rho}{\rho} \right)_{today} = 1100 \times (\text{a few}) \cdot 10^{-5} = (\text{a few}) \cdot 10^{-2} \quad (6)$$

Итак, если бы не ТМ, неоднородности плотности составляли бы всего несколько процентов, а это – слишком малые отклонения от среднего, при таких флуктуациях никакие нелинейные эффекты (эффекты коллапса) не возникают, и никакие структуры не смогли бы образоваться. А спасает дело ТМ, и вот почему. Неоднородности в барионной материи начинают расти

только после рекомбинации, до этого есть однородная среда с большим давлением, есть барионы и тесно с ними взаимодействующие фотоны, и «сгущивания» материи не происходит. Но для ТМ такого эффекта нет, она не взаимодействует с фотонами, давление отсутствует, и рост неоднородностей начинается гораздо раньше по времени эволюции Вселенной.

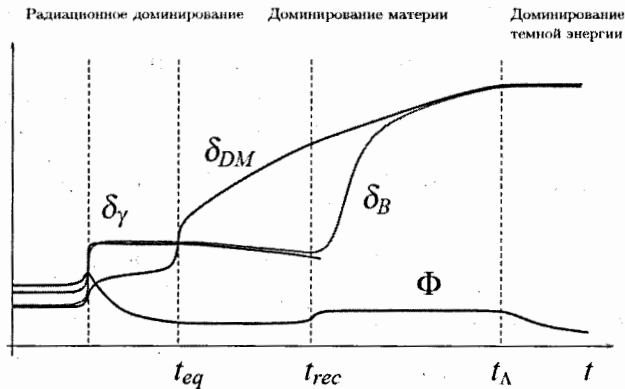


Рис. 10. Рост неоднородностей плотности для разных компонент материи

На рис.10 схематически изображено, как до момента рекомбинации флуктуации плотности барионов и фотонов держатся более-менее одинаковыми и постоянными. В отличие от них, рост относительных неоднородностей ТМ начинается еще на радиационно-доминированной стадии. Правда, в эту эпоху рост и не очень быстрый, всего лишь логарифмический, из-за весьма быстрого расширения Вселенной. Тем не менее, получается, что неоднородности ТМ успевают вырасти к моменту рекомбинации, а барионные неоднородности, грубо говоря, «падают» на эти уже образовавшиеся неоднородности ТМ и на существующие гравитационные потенциалы. Далее это эволюционирует все вместе. Таким образом, во всех галактиках есть и обычное вещество, и ТМ, но основу для формирования структур и гравитационного потенциала (к моменту рекомбинации особенно, хотя и позже тоже) создает именно ТМ. Поэтому ТМ – существенная компонента Вселенной, без нее мы не имели бы звезд и галактик.

БАРИОННАЯ АСИММЕТРИЯ ВО ВСЕЛЕННОЙ

Еще одна проблема, которая тоже у всех на слуху – асимметрия между веществом и антивеществом во Вселенной, которая тоже очень существенна и жизненно важна для нас с вами. Антивещества во Вселенной нет (если не брать в расчет некоторые экзотические сценарии, допускающие особые условия существования антиматерии), а вещество есть.

Проблема состоит в том, что это не всегда было так. На ранних стадиях эволюции Вселенной, при температурах выше примерно 300 МэВ (или $T > 3 \cdot 10^{12} \text{ К}$) кварки и антикварки активно образовывались попарно, поскольку энергии для этих процессов было достаточно. Сегодняшний факт присутствия во Вселенной только вещества говорит о том, что примерно на миллиард кварк-антикварковых пар на ранних стадиях существовал всего лишь один «лишний» нескомпенсированный кварк:

$$\frac{n_q - n_{\bar{q}}}{n_q + n_{\bar{q}}} \sim 10^{-9} \quad (7)$$

Эта малая разница и дала, после взаимной аннигиляции пар, все ныне существующее барионное вещество Вселенной. До сих пор не решен вопрос, каким образом в ходе эволюции Вселенной возникла эта асимметрия (то есть, фактически, что сделало возможным существование и «выживание» вещества). Для того чтобы асимметрия возникла, требуется нарушение закона сохранения барионного числа, что тоже требует выхода за рамки СМ. Говоря о ранних стадиях, снова необходимо вернуться к рисунку 6, суммирующему наши знания об эволюции Вселенной. То, что мы знаем, было позже 1 секунды с момента Большого взрыва, а сейчас мы говорим как раз о том, что было раньше. Именно на этих более ранних этапах и происходили взаимодействия, за счет которых стала возможной генерация барионной асимметрии (как и неизвестных пока частиц, составляющих ТМ). И на эту тему мы тоже надеемся узнать что-то новое, в ходе работы БАК.

БАК И НОВЫЕ ПЕРСПЕКТИВЫ ПО ОТКРЫТИЮ СОСТАВА ТМ И МЕХАНИЗМА ГЕНЕРАЦИИ БАРИОННОЙ АСИММЕТРИИ

Одна из наиболее распространенных гипотез насчет ТМ, которая давно на слуху, это гипотеза о WIMP – новой слабо взаимодействующей массивной частице, нейтральной, стабильной (по космологическим меркам), которая и составляет ТМ. Все слова в определении – существенные, и «новая», и «нейтральная», и «тяжелая», и «стабильная». Нейтральная – чтобы это действительно была ТМ, которая не взаимодействует с фотонами и не излучает свет, тяжелая – чтобы обеспечила нужный количественный вклад в общую плотность энергии и в плотность ТМ, стабильная – чтобы дожила до наших дней. А новая – просто потому, что таких частиц в СМ нет. Все нейтральные стабильные частицы СМ нам известны, и ни одна из них не подходит. Нейтрино тоже не подходят, потому что, даже если бы они были достаточно тяжелыми, они бы не образовывали структуры так, как этого требует согласованность с экспериментальными данными (во всяком случае, это касается стандартных «неэкзотических» нейтрино СМ).

Если говорить о правдоподобности гипотезы WIMP, то картина тут такая. Если мы утверждаем, что существует стабильная нейтральная тяжелая

частица с массой M и сечением аннигиляции σ_0 , то можно выполнить очень простое вычисление. На ранних стадиях эволюции, когда температура высокая, таких частиц много (если сечение аннигиляции сравнительно большое, то и сечение рождения тоже сравнительно большое; вследствие стабильности и некоего соответствующего закона сохранения, новой симметрии, эти частицы рождаются парами). Концентрация этих частиц при температуре выше M примерно такая же, как и остальных частиц, например, фотонов. Далее Вселенная расширяется и остывает, и, когда температура опускается ниже значения массы, $T < M$, концентрация становится меньше, а образование этих частиц в столкновениях становится подавленным (аннигиляция тоже замедляется). В конечном итоге, можно вычислить момент, когда продолжающаяся уменьшаться концентрация WIMP «замораживается» — частицы перестают находить друг друга и взаимодействовать в космической среде. Это происходит при температуре $T \sim M/30$ (численный коэффициент здесь слегка зависит от параметров модели). Можно вычислить современное значение концентрации массы WIMP во Вселенной:

$$\frac{Mn}{s} \sim \frac{\ln(MM_{\text{Pl}}\sigma_0)}{\sigma_0 M_{\text{Pl}}} \quad (8)$$

Здесь s — современное значение плотности энтропии, M — масса частиц, как и выше. Полезно заметить, что отношение плотности массы к плотности энтропии есть величина постоянная в процессе эволюции, и поэтому оно является очень удобным параметром при вычислениях. Современное его значение равно $3 \cdot 10^{-10}$ ГэВ. Зависимость отношения в формуле (8) от массы частицы — логарифмическая, также в нее входят масса Планка и сечение аннигиляции. Опущенный здесь коэффициент пропорциональности — число порядка единицы. Кроме того, формула записана в приближении s -волновой аннигиляции WIMP, что очень важно, и мы вернемся к этому чуть позже. Точные предсказания на массу M дать нельзя, она может лежать в широких пределах (от десятка ГэВ до ТэВ, хотя значения выше ТэВ уже нежелательны, поскольку сечение аннигиляции будет очень маленьким). Современная полная плотность ТМ во Вселенной слабо зависит от этой массы, и для упомянутых широких пределов получается правильное наблюдаемое значение. Важно, что если потребовать, чтобы концентрация получалась «правильной», то есть соответствующей наблюдаемому вкладу ТМ, то сечение аннигиляции должно быть $\sigma_0 = (1-2) \cdot 10^{-36} \text{ см}^2$. Это — довольно большое значение, такой порядок сечения характерен для слабых взаимодействий (почему, собственно, частица и называется WIMP). Соответственно, это сразу дает нам масштаб энергий, характерный для ТМ. Он совпадает с электрослабым масштабом порядка сотни или нескольких сотен ГэВ, который как раз и будет изучаться на БАК.

У всех также на слуху, что наиболее обсуждаемым кандидатом в WIMP является нейтралино — частица, присутствующая в суперсимметричных моделях. Но тут я должен отметить, что типичное сечение аннигиляции σ у нейтралино χ , вообще говоря, слишком мало, и, если не подгонять параметры, происходит «перепроизводство» этих частиц сверх требуемой наблюдаемой плотности. В частности, дело в том, что нейтралино попарно аннигилируют не в s -волне, а в p -волне, и из-за ненулевой скорости частиц сечение аннигиляции подавлено. Фактор этого подавления:

$$\langle \sigma v \rangle \propto v^2 \propto T/M\chi \quad (9)$$

Сама p -волновая аннигиляция возникает вот почему. Обычный канал аннигиляции идет через обмен виртуальным Z -бозоном, который в дальнейшем дает пару фермионов СМ в конечном состоянии — кварк-антикварк или лептон-антилептон, $\chi\chi \rightarrow Z^* \rightarrow q\bar{q}, l\bar{l}$. Для аксиально-векторного или векторного взаимодействия (релятивистские фермионы в конечном состоянии) полный угловой момент конечного состояния получается равным единице. Нейтралино — это идентичные фермионы, и по принципу Паули набрать полный угловой момент, равный единице, с помощью параллельных спинов нельзя. Поэтому единственный выход — это p -волновая аннигиляция, то есть ненулевой орбитальный момент. Этот p -волновой процесс довольно существенно уменьшает сечение аннигиляции, и, чтобы получить правильное значение концентрации нейтралино во Вселенной, нужно, как уже говорилось, подгонять параметры.

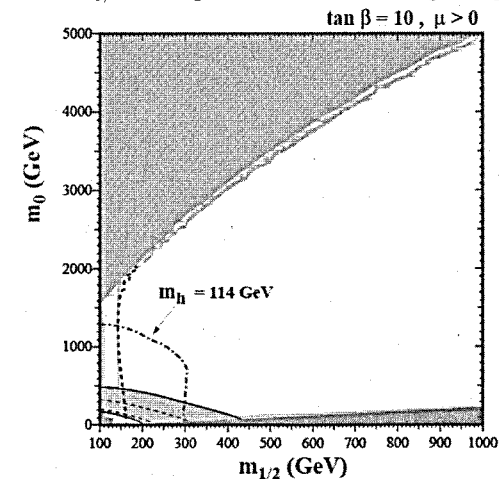


Рис. 11. mSUGRA при малых $\tan \beta$

Проиллюстрируем это. На рис.11 показан один из достаточно популярных сценариев суперсимметрии – минимальная супергравитация, при небольшом значении $\text{tg } \beta$ (отношения вакуумных средних хиггсовских полей в этой модели). Розовая и коричневая области на картинке исключены теоретически, так как здесь получаются «неправильные» (заряженные) кандидаты в ТМ, штриховые линии отвечают экспериментально закрытым областям параметров модели. В теоретически и экспериментально допустимой части пространства параметров имеются две очень узкие области, почти линии (отмеченные серым): или поверху границы нижней коричневой области, или понизу границы верхней розовой. В этих областях плотность нейтрально во Вселенной как раз равна плотности ТМ. Практически при всех остальных значениях параметров аннигиляция сильно подавлена, а в этих узких полосках она усилена, за счет того, что в среде имеются другие суперсимметричные частицы, с которыми нейтрально взаимодействуют и могут аннигилировать. Картинка нарисована для небольшого значения $\text{tg } \beta \sim 10$. Если взять это число побольше, хотя бы порядка 50, все становится не таким драматичным, и подгонка параметров уже не так сильно просматривается. Хотя все равно, в целом суперсимметричные модели выглядят не очень хорошо, с точки зрения ТМ, и тут есть некая интрига.

Разумеется, существует довольно много конкурентов сценариям с нейтрально, и об одном из них я хочу упомянуть. Это гравитино, которое отличается от нейтрально и вообще WIMP следующим. Все WIMP – это так называемая холодная ТМ, ее частицы прекращают взаимодействовать с веществом, когда они сильно нерелятивистские, их скорости на всех этапах эволюции Вселенной пренебрежимо малы (что и есть холодная ТМ по определению). В отличие от них, гравитино может быть «теплой» ТМ. Перед тем, как объяснить это различие, надо отметить, что, вообще говоря, холодная ТМ имеет свои проблемы в космологии. Возможно, они существенно ослабятся или исчезнут вовсе, так как, скорее всего, являются временными проблемами, а не кризисом. Но суть заключается в том, что численное моделирование образования структур во Вселенной с участием холодной ТМ дает слишком много карликовых галактик, по сравнению с их наблюдаемым числом. В частности, по таким вычислениям должно было бы быть несколько сотен карликовых галактик-спутников, сопровождающих нашу галактику. А по наблюдениям имеется всего около 20 подобных объектов. Это сильное расхождение, хотя его можно попытаться как-то объяснить. Есть и другие соображения, в частности, изолированных карликовых галактик, не обязательно спутников, тоже образуется слишком много. Другая особенность холодной ТМ – большая плотность вещества в центрах галактик, профиль плотности выглядит как клюв («cusp»), то есть имеется почти сингулярность, которую, вроде бы, тоже не видно. Есть разные мнения на этот счет, в частности, имеются надежды, что более

аккуратные численные расчеты покажут, что ничего такого нет. Например, может помочь учет неких дополнительных эффектов (наподобие такого, что спутниковые карликовые галактики могут разрушаться при взаимодействии с большой галактикой). Так что «железных» аргументов против холодной ТМ на самом деле нет. Тем не менее, вполне законно рассмотреть постановку вопроса, как можно было бы подавить образование структур на малых масштабах.

Здесь мы приходим к представлению о теплой ТМ, у частиц которой скорости изначально не были малы. Разумеется, в процессе расширения Вселенной относительная скорость уменьшается, но, если частица отщепляется от остальных частиц и взаимодействий, будучи релятивистской, то в течение довольно длительного времени она остается релятивистской. Это означает, что структуры в это время еще не образуются, поскольку релятивистские частицы не задерживаются в гравитационных потенциалах и разлетаются. Поэтому неоднородности малых масштабов разглаживаются, и объекты с малыми массами не формируются. Можно довольно легко оценить, какая для этого требуется масса частиц ТМ. Если предположить, что ТМ находилась в тепловом равновесии (или близко к нему) с веществом, то требуется масса от 1 до 10 кэВ, то есть легкие частицы. Подходящим кандидатом является гравитино, поскольку оно действительно может быть таким легким в моделях с низким энергетическим масштабом нарушения суперсимметрии.

И об этом нам тоже может поведать БАК. Если мы снова попытаемся вычислить концентрацию гравитино, как частиц ТМ, то надо учесть, что гравитино могут образовываться в распадах других суперпартнеров (скварков, слептонов и др.).

$$\frac{m_{3/2} n_{3/2}}{s} \propto \sum_{\tilde{s}} \frac{M_{\tilde{s}}^3}{m_{3/2} M_{\text{Pl}}} \frac{1}{s}$$

Здесь $m_{3/2}$ – масса гравитино, а $M_{\tilde{s}}$ масса более тяжелого нестабильного суперпартнера. Из формулы видно, что концентрация гравитино пропорциональна кубу массы распадающихся суперпартнеров. Если сюда подставить численные значения и потребовать, чтобы масса гравитино составляла несколько кэВ, то требуемая концентрация получается правильной, когда масса суперпартнеров не очень велика и находится в диапазоне значений $M_{\tilde{s}} \approx 100 - 300 \text{ ГэВ}$. Это – как раз область, которая может быть хорошо изучена на БАК. Так что подобный сценарий будет опровергнут или подтвержден в ходе работы этого ускорителя. Вообще-то, с космологической точки зрения, весь этот сценарий – не очень правдоподобный. В частности, требуется, чтобы максимальная температура Вселенной была низкой, $T_{\text{max}} \leq 1 \text{ ТэВ}$, иначе будет переизбыток гравитино.

Но все варианты с теплой ТМ требуют несколько экзотических космологических сценариев.

Еще одно замечание – в моделях с легким гравитино время жизни следующей по массе суперсимметричной частицы (NLSP) довольно большое, оно соответствует пробегу от миллиметров до сотен метров. То есть в таких моделях, если повезет, на БАК можно будет зарегистрировать новые долгоживущие частицы, которые распадаются, пролетев достаточное расстояние. В любом случае, наиболее вероятно, что ТМ связана с новой физикой на характерном масштабе порядка ТэВ или ниже, и это дает надежду на то, что БАК прольет свет на эту проблему. Это, конечно, не гарантировано, и существуют кандидаты в ТМ, относительно которых ускорительная физика ничем не сможет нам помочь. В первую очередь, это – аксион, а также стерильное нейтрино, хотя есть и другая экзотика. Тем не менее, достаточно обоснованные надежды узнать что-то новое в этом направлении с помощью БАК имеются.

Теперь несколько слов о барионной асимметрии. Для генерации БА требуется выполнение условий, которые называют условиями Сахарова (сформулированными им в 1967 г). Если изначально Вселенная была барион-симметричная, как следует, в частности, из инфляционных моделей, то на некотором этапе эволюции должно произойти нарушение барионного числа. Также нужно различие между частицами и античастицами, то есть С- и CP-нарушение, и, наконец, требуется нарушение теплового равновесия среды (иначе не будут генерироваться химические потенциалы). Ну и вопрос, который законно тут задать – может ли барионная асимметрия генерироваться при низких энергиях, порядка нескольких сотен ГэВ или ТэВ? На первый взгляд, ответ отрицательный, по следующей причине. Нам известно, что протон обладает гигантским временем жизни – более 10^{33} лет. Если пересчитать это в масштаб энергий, на котором происходит нарушение барионного числа, это получается величина порядка 10^{16} ГэВ – масштаб Великого объединения взаимодействий.

Однако на самом деле это не так, и даже в электрослабой теории барионное число уже нарушается. Хотя этого и не видно на уровне фейнмановских диаграмм (на уровне теории возмущений), но это происходит непертурбативно. Причем происходит по-разному в вакууме и при высоких температурах. В вакууме вероятность таких процессов колоссально подавлена, как $e^{-16\pi^2/g_w^2} \sim 10^{-165}$. А при высоких температурах экспоненциального подавления нет, а есть большие тепловые флуктуации (сфалероны), которые приводят к нарушению барионного числа. Это нарушение происходит быстро, по сравнению с космологическими временами и с темпом космологического расширения, если температура превышает примерно сотню ГэВ. Так что необходимая для генерации барионной асимметрии физика содержится отчасти прямо внутри

электрослабой теории. Можно ли этим воспользоваться, чтобы сгенерировать барионную асимметрию на электрослабом масштабе?

Тут есть проблема, связанная с медленным расширением Вселенной. «Медленное» расширение означает, что интересующим нас температурам, порядка сотни ГэВ, соответствует время жизни Вселенной на уровне 10^{-10} с. С точки зрения микроскопической физики, в частности, с точки зрения скорости протекания электрослабых процессов, это очень большое число, на много порядков превышающее характерные времена электрослабых взаимодействий. Поэтому темп расширения Вселенной относительно скорости процессов, протекавших в ней в то время, действительно очень медленный, и довольно трудно достичь отклонения от теплового равновесия. Единственная возможность тут, по-видимому, связана с фазовым переходом первого рода во Вселенной. Фазовый переход – сильно неравновесный процесс, который может быть связан с электрослабой физикой. Мы знаем, что электрослабая симметрия нарушена в вакууме, возможно – за счет механизма Хиггса, но при высоких температурах $T \geq 100$ ГэВ она не нарушена. Так что, в принципе, возможен фазовый переход из состояния с ненарушенной симметрией в состояние с нарушенной (по аналогии с переходом металла из сверхпроводящего состояния в нормальное, при повышении температуры). В принципе, этот переход мог бы быть переходом первого рода. Тогда Вселенная переохладилась бы, и это переохлажденное состояние превращалось бы в состояние с хиггсовской фазой так, как показано на рис.12.

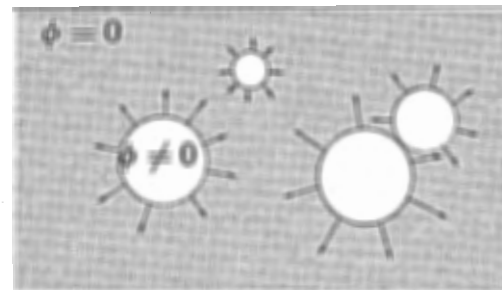


Рис. 12. «Кипящая» Вселенная, далекая от теплового равновесия

Пузырьки новой фазы с нарушенной симметрией с характерным размером 10^{-16} см (отвечающим электрослабой физике), начали бы расширяться и сталкиваться своими стенками. При этом в момент столкновения они могли бы расширяться до больших размеров, сравнимых с тогдашним горизонтом ($r \sim 0.1 H^{-1} \sim 1$ мм). То есть макроскопические пузыри с нарушенной фазой формировали бы «бурлящую» Вселенную и обеспечивали сильно неравновесный процесс. В таком сценарии барионная асимметрия могла бы

генерироваться на электрослабом масштабе, и насчет этого имеются вполне конкретные механизмы.

Поскольку мы все знаем про СМ, то, оставаясь в ее рамках, можно рассчитать любой процесс и выяснить, есть такой переход или же нет. Ответ получается обескураживающим, а именно: фазового перехода в СМ нет. Потому что, в соответствии со всем, что мы знаем про константу самодействия хиггсовского бозона (если верить в СМ) – она большая, что и обеспечивает гладкую сшивку без фазового перехода. Это первый отрицательный момент. Второй заключается в том, что нарушение СР в СМ, в рамках механизма Кобаяши-Маскавы, очень слабое, слишком малое, чтобы обеспечить наблюдаемую барионную асимметрию. Можно ли выйти из этого положения, за счет расширения СМ? Ответ положительный, и для того, чтобы обеспечить фазовый переход первого рода, нужны новые поля и новые частицы, которые интенсивно взаимодействуют с хиггсовским полем и задерживают скатывание хиггсовского поля в минимум с нарушенной фазой. Эти частицы должны присутствовать в космической плазме при температуре 100 ГэВ. Это значит, что масса этих частиц не должна превышать нескольких сотен ГэВ (300 ГэВ, если более точно). Так что должны существовать не очень тяжелые частицы, хорошо взаимодействующие с хиггсовским бозоном. В суперсимметричных моделях роль таких частиц могут выполнять суперсимметричные партнеры топ-кварка. Их много из-за триплетности по цвету, они могут быть достаточно легкими и сильно взаимодействуют с хиггсовским бозоном. Поэтому, если их масса заметно меньше 300 ГэВ, они смогут обеспечить фазовый переход первого рода. Опять-таки, такие массы и частицы вполне находятся в зоне обнаружимости БАК. Кроме того, нужен дополнительный источник нарушения СР, и его хорошо было бы иметь в хиггсовском секторе, поскольку вся динамика фазового перехода определяется хиггсовским сектором. И это можно сделать, добавив дополнительные хиггсовские поля и реализовав СР-нарушение во взаимодействиях между ними. И снова, наличие нескольких хиггсовских полей – вполне проверяемая вещь, с точки зрения программы БАК.

В качестве общего вывода по проблеме барионной асимметрии можно сказать следующее. В теории можно придумать и более сложные модели, чем обсуждавшаяся выше, но, в любом случае, бариогенезис при температуре $T \sim 100$ ГэВ, то есть за счет электрослабых взаимодействий, требует сложной динамики в секторе, нарушающем электрослабую симметрию. В этом пункте космология и физика элементарных частиц, проверяемая на БАК, очень тесно связаны и замкнуты друг на друга. Опять-таки, нет никаких гарантий, что БАК даст точный ответ о том, как была сгенерирована барионная асимметрия. Ее генерация возможна самыми разными способами, и один из очень успешных конкурентов – лептогенезис, связывающий барионную асимметрию с массами нейтрино. Если это так, то ускорительная физика тут

«ни при чем» и ничего не сможет прояснить. Есть и другие варианты, также не связанные с ускорителями частиц. Но я хочу повторить, что БАК в любом варианте поможет нам продвинуться в раннюю Вселенную, поскольку он будет проводить измерения физики на масштабе сотен ГэВ, а такой масштабе температур соответствует временам жизни Вселенной от 10^{-8} до 10^{-10} секунд. Вполне вероятно, что генерация барионной асимметрии, как и формирование частиц ТМ, произошли именно в этом временном промежутке.

Есть и еще более радикальная возможность, которая может дать совершенно иное понимание Вселенной и ее эволюции. Эта возможность связана с одним из вариантов решения проблемы иерархий. Проблема иерархий заключается в том, что характерный электрослабый масштаб порядка 10^2 ГэВ безумно мал, по сравнению с гравитационным масштабом 10^{19} ГэВ. Один из способов решить проблему – суперсимметрия, спасающая различие между масштабами от разрушения радиационными поправками и объясняющая сам низкий электрослабый масштаб логарифмической эволюцией констант взаимодействий с энергией. Но есть и другой вариант – сказать, что на самом деле гравитационный масштаб – вовсе не 10^{19} ГэВ, а всего лишь ТэВ или порядка нескольких сотен ГэВ. Такая возможность, хотя и выглядит очень экзотической, тем не менее существует, хотя, скорее всего, этот подход требует присутствия дополнительных пространственных измерений. Тогда можно сказать, что в физике существует всего один фундаментальный энергетический масштаб, и этот масштаб как раз совпадает с характерным электрослабым масштабом порядка ТэВ. При этом вся космология претерпевает изменения. Например, говоря о температуре Вселенной, придется рассматривать значения порядка ТэВ или ниже, но никак не выше. Опять-таки, говоря об инфляции, ее тоже нужно будет рассматривать при плотности энергии порядка (ТэВ)⁴. Это же относится и к температурам, при которых генерировалась барионная асимметрия. Либо есть совсем радикальная возможность, весьма интересная не только для теоретиков: выше масштаба ТэВ начинается непосредственно квантовая гравитация, что бы ни значило это словосочетание. Тогда все, что мы видим во Вселенной, – темная материя, барионная асимметрия, источник неоднородностей плотности во Вселенной – все это «дело рук» квантовой гравитации. Это было бы совсем интересно и замечательно, поскольку открыло бы нам совершенно новую область исследований. Мы смогли бы изучать квантовую гравитацию и самую раннюю Вселенную на коллайдерах, что очень похоже на хорошую мечту. Такая возможность есть. Хотя она и очень экзотическая, но достаточно возбуждающая воображение.

Суммируя, скажу, что БАК вполне может открыть то, что является для нас жизненно важным – состав и происхождение ТМ и механизм генерации барионной асимметрии. Вполне возможно, однако, что механизмы, стоящие за этими двумя явлениями, совсем не те, что обсуждались в этом докладе и сейчас изучаются теоретиками. Это было бы даже еще более интересно.

Может случиться так, что мы обнаружим и более экзотические и выдающиеся вещи, наподобие низкоэнергетической гравитации на масштабе ТэВ и дополнительных измерений. Мое личное мнение – БАК вполне может выдать даже такое, о чем теоретики сейчас и не подозревают. В любом случае, в результате работы БАК физическая картина мира будет иной, и космология – в том числе.

ДИСКУССИЯ ПОСЛЕ ДОКЛАДА

ИЯИ РАН:

Вопрос: «Может ли БАК быть полезным для прояснения вопроса с темной энергией?»

В.А.: Вряд ли, потому что сейчас нет никаких моделей или соображений, говорящих нам о том, что свойства ТЭ, что бы она из себя ни представляла, могут быть изучены на ускорителях.

Вопрос: «Вы упомянули о двух возможных объяснениях ТМ – холодной ТМ из нейтрально и теплой ТМ из гравитино. А есть ли смешанные варианты, в которых рассматриваются вклады первого и второго типов одновременно? Поскольку, как я понимаю, проблемы есть и там, и там, не позволит ли комбинация сценариев решить или ослабить эти проблемы?»

В.А.: Да, есть такие модели, с собственно смешиванием типов. Но так, чтобы можно было решить «проблемы» холодной и теплой ТМ одновременно – такого пока не видно. Вообще говоря, введение двух типов ТМ кажется некоторым перебором.

Вопрос: «Какую роль в проблеме ТМ могут играть стерильные нейтрино?»

В.А.: Стерильные нейтрино – это один из кандидатов в ТМ, причем в обеих версиях – и в холодной, и в теплой. Я не стану останавливаться сейчас на этом подробно, но скажу, что такая возможность обсуждается совершенно серьезно. Хотя это трудно для эксперимента, с точки зрения наблюдения взаимодействий частиц ТМ в детекторах.

Вопрос: «В Италии, в Гран-Сассо, где стоит один из детекторов слабовзаимодействующих частиц, или еще в каких-то аналогичных экспериментах есть ли какие-то новые результаты, связанные с сегодняшней темой?»

В.А.: Есть, конечно. Во-первых, получено множество ограничений на свойства частиц ТМ, точнее, на массы и сечения взаимодействия с обычным веществом. Имеются в виду не те сечения, о которых шла речь сегодня, мы обсуждали сечения аннигиляции, которые есть вещь вполне фиксированная. А сечения упругого рассеяния, в отличие от них, есть вещь довольно произвольная. И сейчас подобные эксперименты и измерения активно проводятся, и не только в Гран-Сассо, а также и у нас, в Баксанской обсерватории. В течение ближайших десяти лет, наверное, можно рассчитывать на какие-то определенные результаты.

ОИЯИ

Вопрос: «Я хотел спросить о фотонах. Они отделились в момент рекомбинации с определенной высокой температурой, а теперь мы их

наблюдаем при температуре около 3 К и измеряем анизотропию этого излучения. При этом считается, что фотоны, раз уж они отделились, пролетают свободно и ни с чем не взаимодействуют. Почему же тогда так упала их температура?»

В.А.: ответ очень простой – пространство растягивается, длина волны фотона увеличивается вместе с этим расширением, частота падает. Соответственно, падает и температура. О сохранении энергии тут, вообще-то, говорить не приходится, потому что наша Вселенная – не статическая система, ее состояние меняется со временем. А в зависящих от времени внешних полях (в данном случае – в гравитационном) энергия, конечно, не сохраняется. В целом, по отношению ко всей Вселенной говорить о сохранении или несохранении энергии довольно бессмысленно. Лучшее, что тут можно сделать – это сказать, что полная энергия Вселенной, вместе с гравитационным дефектом масс, равна нулю. Это – единственное сколько-нибудь осмысленное утверждение.

ПИЯФ, Гатчина

Вопрос: «Когда должны были открыть W и Z бозоны, все понимали, что обязательно должно произойти что-то на масштабе сотни ГэВ – иначе нарушалась унитарность в слабых взаимодействиях. А вот сейчас насколько вероятен пессимистический сценарий? Допустим, откроют только один хиггсовский бозон и больше ничего. И что тогда – будет одна СМ, и никаких выходов за нее мы не увидим?»

В.А.: Мне хотелось бы дать развернутый ответ на этот вопрос. Давайте сейчас вернемся к космологии и посмотрим, какие уроки мы можем отсюда извлечь. В космологии есть большое количество экспериментально измеренных чисел, которые выглядят как случайные «дружественные» нам совпадения. Например, плотность ТЭ – ее сегодняшнее значение безумно маленькое, 10^{-3} (эВ)⁴. Если бы характерный энергетический масштаб ТЭ был бы другим, скажем, большим всего на два порядка, то нас с вами не существовало бы. Потому что слишком большая плотность ТЭ привела бы к очень быстрому расширению Вселенной, и никакие галактики не успели бы сформироваться. Есть и другие числа, скажем, исходная величина флуктуаций плотности на уровне 10^{-5} . Тоже в точности соответствует требуемому, потому что именно при таких значениях формируются звезды, но не сверхмассивные галактики без планет. И так далее. Так же и в физике частиц, если совсем чуть-чуть сместить значения масс легких кварков или электромагнитную константу, то легко добиться нарушения соотношения масс нейтрона и протона. Для существования атома водорода нам требуется, чтобы нейтрон был чуть тяжелее протона, но он не должен быть намного тяжелее, иначе будут отсутствовать стабильные ядра. Таким образом, для нашего существования чрезвычайно существенна эта тонкая подстройка значений масс нейтрона и протона. Есть и другие «случайные» важные

числа. Тут закономерно поставить вопрос – не является ли электрослабый масштаб таким же «случайным дружественным» параметром? Подобная постановка приводит к тому, что называется антропный принцип. Он говорит нам о том, что значения параметров могут быть очень «странными» (например, нетипично маленькими). Для этого достаточно предположить, что фундаментальные параметры могут иметь самые разные значения в разных частях Вселенной. Мы же живем именно в той части, где все значения параметров таковы, что допускают возможность существования жизни. Если это так, то Вселенная становится совершенно другой, из единственной она превращается во множественную, каждая часть – со своими значениями фундаментальных параметров. В большинстве своих областей она будет непригодна для существования устойчивых структур и, в конечном счете, жизни. И только в очень малом количестве своих областей она будет «дружелюбной» к нам. Так что, если будет обнаружен только хиггсовский бозон и больше ничего, с одной стороны, это будет грустно. С другой – это послужит прямым указанием на антропную картину множественных вселенных. То есть это будет означать, что мы добрались до того предела, где параметры и основные константы физики определяются из антропных соображений. Это тоже очень интересно, так что даже подобный отрицательный результат будет познавательным.

ОмГУ, Омск

Вопрос: «Известно, что одно время достаточно большие надежды возлагались на ненулевую массу нейтрино, в частности, по вопросу замкнутости или открытости Вселенной. А что сейчас имеется по этому поводу?»

В.А.: Да, действительно. В 70-е годы прошлого века был такой момент, когда группой ИТЭФ был объявлен результат по массе электронного нейтрино порядка 30 эВ. Это – достаточно большая масса, и казалось, что подобное нейтрино было бы очень подходящим кандидатом на ТМ (как, собственно говоря, тогда и подумали). Но сейчас ясно, что такое нейтрино, даже если бы оно существовало, не подходит на роль ТМ, и даже наоборот – подобное значение массы нейтрино космологически запрещено. Потому что формирование структур в такой модели происходит совершенно по-другому. Это – горячая, а не теплая ТМ, она довольно долго остается ультрарелятивистской, и структуры типа галактик просто не образуются, потому что не успевают. Если ТМ – это нейтрино, то вначале образуются гигантские структуры размером больше нескольких мегапарсек, и раньше считалось, что потом они могут развалиться на более мелкие структуры, отвечающие галактикам. Однако сейчас известно, что такого в реальности не происходит, и в сценариях с горячей ТМ получается неправильный спектр структур, не совпадающий с наблюдениями. Поэтому сейчас, наоборот, космология дает нам ограничения на массы обычных неэкзотических

нейтрино, и эти космологические ограничения лучше, чем существующие экспериментальные ограничения из прямого измерения массы нейтрино. Они находятся на уровне примерно 0,3 эВ для нейтрино каждого типа (я привожу очень консервативное ограничение; в космологическом сообществе есть мнения, что ограничения должны быть еще жестче). Поэтому, по-видимому, нейтрино играло небольшую роль в формировании структур, и подключилось только на самых последних стадиях.

Вопрос: «По поводу реликтовых нейтрино – когда они отделились после Большого взрыва, они должны были бы обладать гигантскими энергиями и, соответственно, дойти до нас практически в неизменном виде. И концентрация их должна была бы быть гигантской. Это как-то учитывается в современной космологической картине?»

В.А.: Тут не совсем верно. Во-первых, нейтрино отщепились не на самых ранних стадиях, а при температуре примерно 2-3 МэВ, и это – не очень высокая температура. По мере расширения Вселенной длины волн тоже растут, импульсы уменьшаются, в полной аналогии с фотонами. И сегодня температура нейтрино должна быть несколько ниже температуры фотонов, примерно 2 К, а концентрация нейтрино каждого типа – примерно 100 штук на кубический сантиметр (фотонов, при этом, – 400 штук). То есть никаких гигантских концентраций нет, реликтовых нейтрино во Вселенной довольно мало. Несмотря на это, они все же могли бы влиять на формирование структур. Собственно, ограничения на массы нейтрино, о которых я говорил выше, как раз и получаются с учетом этих реликтовых нейтрино.

Алтайский ГУ, Барнаул

Вопрос: «Если на БАК совсем ничего не откроют, даже хиггсовский бозон, как это повлияет на развитие фундаментальных теорий?»

В.А.: Даже если собственно хиггсовский бозон и не откроют, то все равно останется необходимость в каком-то механизме генерации масс и нарушения электрослабой симметрии. Есть много моделей, в которых существуют новые частицы, более или менее похожие на бозон Хиггса. Если же вообще ничего не найдут, ни хиггсовский бозон, ни что-то иное из известных сейчас альтернативных сценариев и «замещающих» частиц, то вот тогда у всех теоретиков настанет шоковое состояние.

ЯрГУ, Ярославль

Вопрос: «С Вашей точки зрения, какие наиболее интересные эксперименты в астрофизике в ближайшем будущем, параллельно с БАК, будут прояснять те две проблемы, о которых Вы сегодня рассказывали?»

В.А.: Относительно барионной асимметрии – по-видимому, больше, чем мы о ней знаем, мы и не узнаем с помощью космологических наблюдений. Что

же касается ТМ, то здесь требуется понять, есть ли действительно необходимость подавлять формирование объектов малых масштабов и масс (карликовых галактик). Для этого необходимы, с одной стороны, наблюдения нашей ближней Вселенной, а с другой – теоретические расчеты и численное моделирование формирования структур. Вообще, если говорить о космологических наблюдениях, то тут, конечно, важно продвинуться дальше в изучении реликтового микроволнового излучения, и, в особенности, измерить его поляризацию, которая свидетельствовала бы о присутствии реликтовых гравитационных волн. Это стало бы следующим по-настоящему крупным открытием в космологии.



Вступительное слово проф. И.А. Голутвина (ОИЯИ)



Аудитория ИЯИ РАН (Москва)



На связи аудитории ИЯИ (Москва), ОИЯИ (Дубна), ПИЯФ (Гатчина), ЦЕРН (Женева), университетов Барнаула, Кемерово, Новосибирска, Омска, Томска, Ярославля.



Аудитория ИЯИ РАН (Москва)



Академик РАН В.А. Матвеев (ИЯИ РАН) и проф. И.А. Голутвин (ОИЯИ)



Проф. С.В. Русаков (ФИАН) и проф. И.М. Дремин (ФИАН)



Академик РАН В.А. Матвеев (ИЯИ РАН) и академик РАН Д.В. Ширков (ОИЯИ)



Проф. И.П. Лохтин (НИИЯФ МГУ)

СТАНДАРТНАЯ МОДЕЛЬ И ЛНС

Объединённый семинар коллаборации RDMS CMS

Руководитель И. А. Голутвин

Физика на Большом адронном коллайдере

Очередное заседание Семинара состоится 30 июня 2010 г. в 15:00 в Конференц-зале Учебно-научного центра Объединенного института ядерных исследований (ауд.437 здания ЛИТ), Дубна

ПРОГРАММА

«Стандартная Модель и LHC»

Докладчик М.И. Высоцкий (ИТЭФ, Москва)

Все известные на сегодняшний день свойства элементарных частиц описываются Стандартной Моделью (СМ), основанной на локальной $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ симметрии. Важную роль в СМ играет механизм спонтанного нарушения $SU(2) \times U(1)$ симметрии, дающий массы всем элементарным частицам. Последняя не открытая на сегодняшний день элементарная частица – бозон Хиггса – возникает в механизме спонтанного нарушения. Данные, полученные на предыдущих рекордных по энергии ускорителях, позволяют в рамках СМ найти значение M_H . Расширение СМ за счет введения новых элементарных частиц позволяет изменить предсказание для массы бозона Хиггса. Однако в любом случае энергия LHC достаточна для обнаружения хиггсовского бозона. Тем самым будет найдена последняя недостающая частица Стандартной Модели.

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

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



Член-корреспондент РАН Михаил Иосифович Высоцкий,
заведующий лабораторией теории элементарных частиц
ИТЭФ (Москва)

СТАНДАРТНАЯ МОДЕЛЬ И ЛНС

М.И. Высоцкий

Институт теоретической и экспериментальной физики, Москва

Все известные на сегодняшний день свойства элементарных частиц описываются Стандартной моделью, основанной на локальной $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ симметрии. Важную роль в СМ играет механизм спонтанного нарушения $SU(2) \times U(1)$ симметрии, дающий массы всем элементарным частицам. Последняя не открытая на сегодняшний день элементарная частица – бозон Хиггса – возникает в механизме спонтанного нарушения. Данные, полученные на предыдущих рекордных по энергии ускорителях, позволяют в рамках СМ найти значение M_H . Расширение СМ за счет введения четвертого кварк-лептонного поколения позволяет изменить предсказание для массы бозона Хиггса. Однако в любом случае энергия ЛНС достаточна для обнаружения хиггсовского бозона. Тем самым будет найдена последняя недостающая частица Стандартной Модели.

ПЛАН

1. Происхождение Стандартной Модели. Ее недостатки.
2. Значение M_H , следующее из точных измерений.
3. Влияние новой физики на величину M_H .
4. Верхнее ограничение на M_H .
5. Заключение

ПРОИСХОЖДЕНИЕ СТАНДАРТНОЙ МОДЕЛИ. ЕЕ НЕДОСТАТКИ.

Что представляет из себя Стандартная модель физики элементарных частиц (в дальнейшем СМ), можно сформулировать в двух словах: это перенормируемая теория взаимодействующих безмассовых и массивных векторных частиц и частиц материи со спинами $1/2$ и 0 . Теория рождалась в муках: 4-х фермионная теория слабого взаимодействия перенормируема, в то время как наблюдаемое на эксперименте слабое взаимодействие универсально, что указывало на перенормируемость исходной теории. Прямое следование квантовой электродинамике, состоящее в введении массивных векторных промежуточных W^\pm бозонов, также приводит к перенормируемой теории. Перенормируемой является только инвариантная относительно локальных калибровочных преобразований теория; при этом для генерации масс W и Z бозонов в СМ используется механизм Хиггса. Теория подтверждена экспериментом: W и Z бозоны рождаются на коллайдерах, их параметры совпадают с предсказанием $SU(2)_L \times U(1)$ теории. Для окончательной формулировки СМ следует указать,

что кварки и лептоны входят в спинорные и синглетные представления $SU(2)_L$, имеется один дублет хиггсовских бозонов, кварки преобразуются по спинорному представлению описывающей сильные взаимодействия цветовой группы $SU(3)$, и лагранжиан СМ содержит все $SU(3) \times SU(2)_L \times U(1)$ симметричные члены, не нарушающие перенормируемость.

Возникает естественный вопрос: почему теория должна быть перенормируемой? Только в перенормируемых теориях возможно вычисление амплитуд вероятностей различных процессов по теории возмущений. С перенормируемыми теориями теоретики остаются без работы. Но почему Природа заботится о теоретиках? Более того: первая теория, с которой сталкивается человек, – теория гравитации, перенормируема. Константа связи в теории гравитации $1/M_{Pl}^2$ (масса Планка $M_{Pl} = 10^{19}$ ГэВ) имеет ту же размерность, что и константа связи G_F четырехфермионной теории.

Мы описали путь к построению СМ “снизу”, исходя из результатов экспериментов при низких энергиях. Но возможен и путь “сверху”: фундаментальная теория задается на планковской шкале, это перенормируемая теория большого числа частиц с массами порядка M_{Pl} , имеющих различные спины. Ясно, что LHC ни с современной инвариантной энергией сталкивающихся протонов 7 ТэВ, ни с энергией 14 ТэВ для изучения таких частиц не приспособлен.

Откуда в этой схеме берутся частицы СМ, безмассовые на планковском масштабе масс $m_i^{CM} \ll M_{Pl}$? Их происхождение связано с симметриями фундаментальной теории. Локальная $SU(3)$ обеспечивает существование восьми безмассовых глюонов G_i . Локальная киральная $SU(2)_L$ наряду с триплетом безмассовых векторных бозонов A , гарантирует отсутствие дираковских масс кварков и лептонов, майорановские массы которых запрещены локальной $U(1)$ с ее безмассовым абелевым векторным бозоном V . Инвариантность теории относительно общеквариантных преобразований обеспечивает безмассовость гравитона. Так возникает гравитация. К лагранжиану получившейся таким образом перенормируемой СМ добавляются перенормируемые члены высших размерностей, подавленные как степени $1/M_{Pl}^2$, что приводит к поправкам $\sim (M_W/M_{Pl})^2 \sim 10^{-34}$ к предсказаниям СМ. Малость этих поправок оборачивается проблемой “пустыни” – отсутствием новой физики на промежуточных масштабах $M_{W,Z} \sim 100$ ГэВ и $M_{Pl} = 10^{19}$ ГэВ масштабах масс¹. Здесь мы сталкиваемся с Главной Проблемой СМ – хиггсовским сектором. Перечисленные выше симметрии СМ не запрещают массовый член хиггсовского дублета:

$$\Delta L = M_H^2 H^+ H \quad (1)$$

При естественном значении $M_H \sim M_{Pl}$ вакуумное среднее хиггсовского поля, а вместе с ним и массы W и Z бозонов, лептонов и кварков, оказываются порядка массы Планка. Отсутствие массового члена могло бы гарантировать спонтанное нарушение на масштабе M_{Pl} имеющейся у фундаментальной теории глобальной симметрии, приводящее к получению $SU(2)$ дублета голдстоунов [1]. Но учет радиационных поправок (Рис. 1) разрушает глобальную симметрию: индуцируется квадратично расходящийся массовый член с естественным масштабом обрезания $\Lambda \sim M_{Pl}$.

Восстановить иерархию $M_H \ll M_{Pl}$ помогает низкоэнергетическая суперсимметрия. Масштаб вакуумного среднего хиггсовского поля $\eta \geq M_{SUSY}$, и из значения $\eta = 246$ ГэВ следует, что массы суперпартнеров находятся в ТэВ-ном диапазоне – LHC обладает достаточной энергией для обнаружения новых частиц.

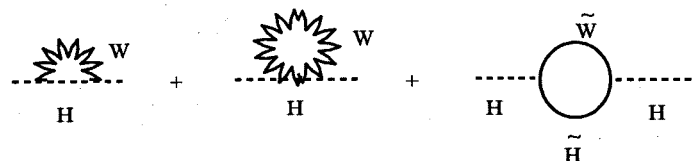


Рис.1

Итак, проблема иерархий будет разрешена, если суперпартнеры будут найдены на LHC. Другая проблема СМ – наличие большого количества элементарных частиц и параметров, описывающих их взаимодействия. Действительно, каждое из трех кварк-лептонных поколений содержит 15 вейлевских фермионов (16 при наличии правого нейтрино), плюс 12 векторных бозонов, один бозон Хиггса и гравитон – итого 59 (или 62) элементарных частиц. Это число близко к количеству химических элементов, известных к середине XIX века. Менделеев обнаружил определенные закономерности свойств различных элементов, что позволило ему предсказать существование галлия, скандия, германия, полония и ряда других химических элементов. Квантовая механика позволила объяснить всё наблюдаемое разнообразие химических элементов кулоновским притяжением электронов к протонам атомного ядра. Возможно, открытия, сделанные на LHC, позволят понять, что стоит за таблицей Менделеева XXI века, включающей около 60 элементарных частиц. При этом может проясниться и происхождение большого числа параметров, описывающих их свойства: массы 6 кварков и 6 лептонов, три калибровочные константы связи, 4 параметра СКМ матрицы смешивания кварков и 4 или 6 параметров PMNS матрицы смешивания лептонов, масса бозона Хиггса и его вакуумное среднее – итого около 25 параметров.

¹ Я благодарен за это замечание Д.В. Ширкову.

ЗНАЧЕНИЕ M_H , СЛЕДУЮЩЕЕ ИЗ ТОЧНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Измеренные с высокой точностью на ускорителях SLC и LEP I параметры Z бозона наряду с точным измерением массы W бозона на LEP II и Тэватроне и массы t кварка на Тэватроне позволяют определить значение M_H в рамках СМ. В Таблице приведены результаты фита экспериментальных данных [2].

Среднее значение $M_H = 84$ ГэВ исключено поисками бозона Хиггса на LEP II: $M_H > 114$ ГэВ. Тем не менее, прямого противоречия здесь нет, и, учитывая ошибку в определении M_H , можно лишь сказать, что в рамках СМ хиггс должен весить меньше 200 ГэВ.

Табл. Фит Стандартной модели

Наблюдаемая	Эксп. значение	Результат фита	"Тяга"
Γ_Z , ГэВ	2,4952(23)	2,4963(15)	-0,5
σ_h , нб	41,540(37)	41,476(14)	1,8
R_l	20,771(25)	20,743(18)	1,1
A_{FB}	0,0171(10)	0,0164(2)	0,8
A_r	0,1439(43)	0,1480(11)	-0,9
R_b	0,2163(7)	0,2158(1)	0,7
R_c	0,172(3)	0,1722(1)	-0,0
A_{FB}^b	0,0992(16)	0,1037(7)	-2,8
A_{FB}^c	0,0707(35)	0,0741(6)	-1,0
$s_f^2(Q_{FB})$	0,2324(12)	0,2314(1)	0,8
A_{LR}	0,1513(21)	0,1479(11)	1,6
A_b	0,923(20)	0,9349(1)	-0,6
A_c	0,670(27)	0,6682(5)	0,1
M_W , ГэВ	80,398(25)	80,377(17)	0,9
m_t , ГэВ	172,6(1.4)	172,7(1.4)	-0,1
M_H , ГэВ		84_{-24}^{+32}	
$\hat{\alpha}_s$		0,1184(27)	
$1/\bar{\alpha}$	128,954(48)	128,940(46)	0,3
$\chi^2/n_{d.o.f.}$		18,1/12	

В конце этого раздела заметим, что теоретическая неопределенность значения M_W значительно меньше современной экспериментальной ошибки, равной 25 МэВ. Уточнение значения M_W вместе с измерением M_H на LHC очень важно для дальнейших проверок СМ на петлевом уровне.

ВЛИЯНИЕ НОВОЙ ФИЗИКИ НА ВЕЛИЧИНУ M_H

Наличие новых частиц, участвующих в электрослабых взаимодействиях, изменяет предсказание для M_H . В отличие от квантовой электродинамики, где вклад новых тяжелых частиц подавлен, киральность электрослабой теории приводит к отсутствию декаплинга: вклад новых частиц может быть усилен. Примером влияния новой физики на величину M_H служит четвертое кварк-лептонное поколение. Поиск на Тэватроне привел к нижнему ограничению на массы новых кварков: $m_{t'}, m_{b'} > 330$ ГэВ. На рис.2 показаны результаты фита прецизионных данных с учетом дополнительного поколения для $M_H = 120$ ГэВ (слева) и $M_H = 600$ ГэВ (справа), соответственно. В обоих случаях величина $\chi^2/n_{d.o.f.}$ близка к имеющемуся в СМ – расширение СМ новыми частицами позволяет иметь тяжелый бозон Хиггса. Если кварки четвертого поколения имеются в природе, то они могут быть обнаружены на первой фазе работы LHC, т.к. их масса не может превышать 1 ТэВ.

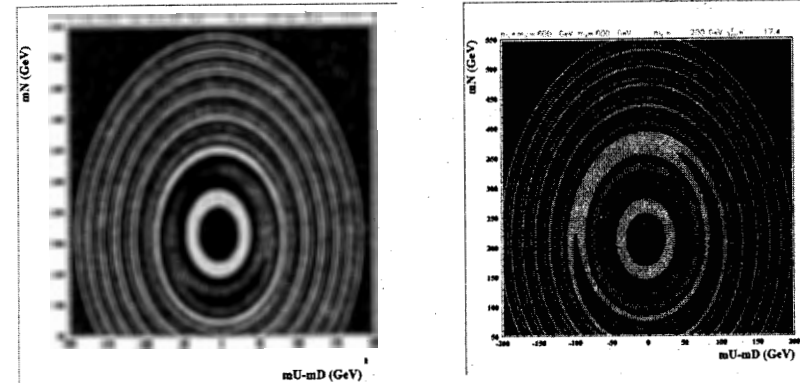


Рис. 2. $M_H = 120$ ГэВ, $m_{t'} + m_{b'} = 600$ ГэВ, $m_E = 200$ ГэВ, $\chi^2/n_{d.o.f.} = 17,7/11$ (слева)
 $M_H = 600$ ГэВ, $m_{t'} + m_{b'} = 600$ ГэВ, $m_E = 200$ ГэВ, $\chi^2/n_{d.o.f.} = 17,4/11$ (справа)

ВЕРХНЕЕ ОГРАНИЧЕНИЕ НА M_H

Поиски бозона Хиггса до сих пор приводили к увеличению нижней границы его массы. Согласно данным LEP II $M_H > 114$ ГэВ. Тэватрон исключил значение массы, близкое к 160 ГэВ. В СМ имеется теоретическое верхнее ограничение на M_H [3]. Оно следует из вычисления амплитуды рассеяния $2 \rightarrow 2$ продольно поляризованных векторных бозонов. Фейнмановские диаграммы для $ZZ \rightarrow ZZ$ рассеяния показаны на рис.3. Рассматривается рассеяние при высоких энергиях $s \gg M_H^2 \gg M_Z^2$ и выделяется s -волновая амплитуда рассеяния. Она оказывается равной $A_0 = 3\sqrt{2}G_F M_H^2$. С другой стороны, согласно соотношению унитарности, $A_0 \leq 8\pi$, откуда следует ограничение $M_H < 730$ ГэВ.

При приближении M_H к верхнему пределу унитаризация амплитуды рассеяния происходит за счет учета вклада петлевых диаграмм, которые по величине сравниваются с древесной амплитудой. Теория возмущений перестает работать – взаимодействие векторных бозонов на ТэВ-ной энергии приобретает черты, характеризующие сильные взаимодействия при ГэВ-ных энергиях. Ширина хиггсовского бозона становится порядка его массы.

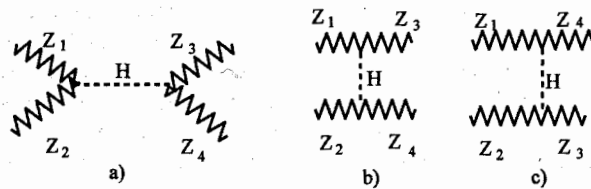


Рис. 3

Таким образом, LHC откроет бозон Хиггса, даже если его масса находится вблизи верхнего теоретического предела – энергии 14 ТэВ в с.ц.м. для этого хватает с избытком.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

LHC способен обнаружить бозон Хиггса для всех доступных значений его массы. Измерение ее значения и уточнение величины M_H позволит проверить справедливость СМ и косвенно установить наличие или отсутствие новых частиц, участвующих в электрослабых взаимодействиях. Будет окончательно установлено, имеется ли четвертое кварк-лептонное поколение. Возможно, мы узнаем, как решается проблема иерархий и что стоит за большим количеством элементарных частиц и параметров, описывающих их свойства, в Стандартной Модели.

Я благодарен В.Б. Гаврилову и И.А. Голутвину за приглашение выступить с докладом на семинаре сотрудничества CMS-RDMS и А.И. Голутвину и участникам семинара за полезные обсуждения.

Работа частично поддержана грантами РФФИ 08-02-00494, НШ-4172.2010.2 и контрактом № 02.740.11.5158 Министерства образования и науки РФ.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] А.А. Ансельм, А.А. Иогансен, Письма в ЖЭТФ **44**, 488 (1986).
- [2] V.A. Novikov et al., Yadernaya Fizika **73**, 662 (2010).
- [3] B.W. Lee et al., Phys. Rev. **D16**, 1519 (1977);
M. Veltman, Acta Phys. Polon. **B8**, 475 (1977).

ДИСКУССИЯ ПОСЛЕ ДОКЛАДА

ЦЕРН, Женева:

Вопрос: «Насколько принципиально для Стандартной модели, что нейтрино СМ возможно имеет массу, отличную от нуля? Как Вы можете прокомментировать то, что бозон Хиггса задает уж слишком маленькую по сравнению с другими элементарными частицами массу нейтрино?»

М.И.: Стандартная модель описывает все, что мы знаем про физику элементарных частиц. В начальном варианте СМ массы у нейтрино нет. Но дело в том, что Вы можете ввести массу для нейтрино с минимальной модификацией СМ, ничего не меняя принципиально. Вы можете задать массу нейтрино с помощью "see-saw" механизма путем добавления в СМ синглета "правых" частиц с тяжелым нейтрино с массой (допустим порядка массы Планка). Масса наблюдаемого "левого" нейтрино является отношением квадрата массы "левого" истинного дираковского нейтрино (с массой порядка МэВ или даже ГэВ) и массы "правого" нейтрино. По другому механизму возможно усложнение хиггсовского сектора. В этом случае мы ограничиваемся только "левыми" дублетами частиц ("правые" синглеты не вводятся), зато вводим триплет бозонов Хиггса. При этом нейтрино получает маленькую массу также по механизму "see-saw". Все это ничего принципиально не меняет в стандартной модели.

ПИЯФ, Гатчина:

Вопрос: «Я хотел бы спросить про проблему иерархий, проблему натуральности. Насколько элегантно можно решить проблему квадратичной расходимости массы Хиггса в рамках СМ?»

М.И.: Стандартная модель – перенормируемая квантовая теория. В отличие от 4х-фермионной теории, вы можете сделать перенормировку, положив массу Хиггса достаточно малой, скажем 100 ГэВ. В этой схеме Вы можете все вычислять. Но эстетически она не красива. Естественного решения проблемы иерархий в СМ нет. Но теория перенормируема, считать в ней можно.

ИЯИ РАН:

Вопрос: «Предположим, что LHC не откроет ничего, кроме бозона Хиггса стандартной модели. Можно ли в этом случае утверждать, что LHC открыл антропный принцип?»

М.И.: Антропный принцип – это некоторая философия. Зачем вообще строить ускорители, чтобы подтверждать это принцип? Если LHC найдет бозон Хиггса с массой около 120 ГэВ и больше ничего, то он поставит последнюю точку в СМ.

Вопрос: «Предположим, что у нас масштаб ультрафиолетового обрезания не масса Планка, а 10 ТэВ. Это обеспечит нам массу бозона Хиггса меньше ТэВ. Но в этом случае возникает вопрос, почему массы Планка много больше фундаментального масштаба?»

М.И.: Масштаб гравитации 10^{19} ГэВ, откуда он берется? Если масштаб всех взаимодействий оказывается 10 ТэВ, то все равно остается вопрос, что делать с гравитацией?

Алтайский ГУ, Барнаул

Вопрос: «Вы назвали таблицу с параметрами СМ периодической таблицей Менделеева XX века. Стоит ли ожидать, что физика найдет объяснение, почему эти параметры имеют именно такие величины, как в случае с атомными массами химических элементов?»

М.И.: Я бы сказал, что сейчас нужен какой-то экспериментальный толчок. Да, существует теории составных фермионов, теория преонов. Но уже прошли десятки лет, как мы знаем структуру СМ, но подтвержденных объяснений пока не видно.

ОИЯИ

Вопрос: «Введение четвертого поколения должно давать большие поправки, изменения в предсказания, например, магнитного момента мюона, для которого существуют прецизионные измерения?»

М.И.: В Стандартной модели есть такое важное понятие как "декаплинг" – отцепление или неотцепление. В КЭД в магнитном моменте мюона вклад тяжелых частиц подавлен степенным образом – как масса мюона, поделенная на массу частицу в квадрате. Когда частица очень тяжелая, то вклад получается малым, как раз порядка достигнутой точности наблюдения. В СМ есть аксиальный и несохраняющиеся векторные токи (недиагональные)



Аудитория ОИЯИ (Дубна)



Аудитория ОИЯИ (Дубна)



М.И. Высоцкий и Д.В. Ширков



А.В. Зарубин и И.А. Голутвин



На связи аудитории ИЯИ (Москва), ОИЯИ (Дубна), ПИЯФ (Гатчина), ЦЕРН (Женева), университетов Барнаула, Омска, Томска.

**БОЗОН ХИГГСА И ПЕРСПЕКТИВЫ ЕГО
ОТКРЫТИЯ НА LHC**

Объединённый семинар коллаборации RDMS CMS

Руководитель И. А. Голутвин

Физика на Большом адронном коллайдере

Очередное заседание Семинара состоится 22 сентября 2010 г. в 11:00 в конференц-зале Учебно-научного центра Объединенного института ядерных исследований (ауд.437 здания ЛИТ), Дубна

ПРОГРАММА

«Подготовка и перспективы открытия бозона Хиггса на LHC»

Докладчик А.Н. Никитенко
(ИТЭФ, Москва/Imperial College, Лондон)

Лекция посвящена "бозону Хиггса" - частице предсказанной в 70-х годах прошлого века, но не открытой до сих пор. Бозон Хиггса является причиной возникновения массы у всех остальных известных, элементарных частиц. Одной из основных целей Большого Адронного Коллайдера является открытие этой частицы, которое подтвердило бы наше понимание механизма образования массы. Будет дан обзор перспективам открытия и изучения свойства бозона Хиггса на LHC. Будет обсуждено, как данные, накопленные к концу 2011 года при энергии 7 TeV, могут быть использованы для подготовки открытия бозона Хиггса в 2013-2014 годах, когда LHC достигнет плановой энергии 14 TeV

Принять участие в заседании, задать вопросы и выступить в дискуссии можно в точках двустороннего видеодоступа в ОИЯИ (Дубна), ИЯИ ("Гвитомник", 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.inr.ru/webcast>



К.ф.м.н, Александр Николаевич Никитенко,
старший научный сотрудник ИТЭФ (Москва),
научный сотрудник Imperial College (Лондон, Великобритания)

БОЗОН ХИГГСА И ПЕРСПЕКТИВЫ ЕГО ОТКРЫТИЯ НА LHC

А.Н. Никитенко

Институт теоретической и экспериментальной физики, Москва

Imperial College, London

Статья посвящена "бозону Хиггса" - частице предсказанной в 70-х годах прошлого века, но не открытой до сих пор. Бозон Хиггса является причиной возникновения массы у всех остальных известных, элементарных частиц. Одной из основных целей Большого адронного коллайдера является открытие этой частицы, которое подтвердило бы наше понимание механизма образования массы. Представлен обзор перспективам открытия и изучения свойств бозона Хиггса на LHC.

Историю бозона Хиггса можно начать с 1960 года, когда Шелдон Глэшоу объединил электромагнитное и слабое взаимодействия в рамках одной модели используя математический аппарат теории калибровочных полей Янга-Миллса основанной на определённой группе симметрии $SU(2) \times U(1)$. Теорией калибровочных полей в физике частиц называется теория описывающая взаимодействие частиц, в которой переносчиками взаимодействия являются калибровочные поля или соответствующие им частицы. Простейшим примером такой теории является квантовая электродинамика, где калибровочной частицей является безмассовый фотон. Недостатком модели Глэшоу было то, что калибровочные поля (да и сами частицы) были безмассовые. Если фотон действительно безмассовая частица то калибровочное поле отвечающее за слабое взаимодействие должно иметь массу, как было осознанно уже тогда, поскольку слабое взаимодействие действует на коротких расстояниях. Решение проблемы безмассовых частиц в калибровочных теориях было предложено в 1964 году одновременно в трех статьях и автором одной из статей был британский физик-теоретик Петер Хиггс. Было введено новое поле (так называемое "поле Хиггса") которое имеет не нулевое вакуумное ожидаемое значение и потенциал не симметричный относительно положения в вакууме хотя и симметричный относительно нулевого значения поля. Такой специальный выбор потенциала поля Хиггса называют спонтанным нарушением симметрии. Калибровочные поля и все остальные частицы взаимодействуя с полем Хиггса приобретают массы. В 1967 году Вайнберг и Салам ввели этот механизм генерации масс в электрослабую модель Глэшоу. Массивные калибровочные бозоны были открыты в 1983 году в CERN'e подтвердив таким образом предсказания электрослабой модели, которая вместе с квантовой хромодинамикой (теории сильных взаимодействий) образует так называемую стандартную модель.

Единственной частицей, не открытой до сих пор в стандартной модели является бозон Хиггса, соответствующий полю Хиггса. Для открытия этой частицы был построен Большой адронный коллайдер (LHC) и два детектора ATLAS и CMS. Коллайдер и детекторы были спроектированы так, что бы открыть бозон Хиггса во всем возможном диапазоне его массы он 100 до 1000 ГэВ.

Масса бозона является свободным параметром модели. На сегодняшний день есть ограничения на массу бозона Хиггса в стандартной модели из экспериментов на LEP и Tevatron, где велись поиски этой частицы и она не была пока найдена: масса должна превышать 115 ГэВ и не быть в интервале 158–175 ГэВ. Из точных измерений параметров стандартной модели, массы W бозона и массы t кварка следует, что масса бозона Хиггса должна быть меньше чем 160 ГэВ. Бозон Хиггса будет рождаться на LHC в основном при взаимодействии глюонов. На рис.1 (слева) показано сечение рождения бозона Хиггса на LHC как функция его массы для различных механизмов рождения: при взаимодействии глюонов, векторных бозонов W , Z , при совместном рождении бозона Хиггса с векторными бозонами и с парами b и t кварков. Немедленно после рождения, бозон Хиггса распадается на другие частицы по которым его можно зарегистрировать в детекторе. На рис.1 (справа) показаны вероятности распада бозона Хиггса на разные частицы как функция его массы. Если бозона Хиггса существует, т.е. механизм генерации масс предложенный Петером Хиггсом справедлив, то он будет открыт на LHC в 2013–2014 годах в двух модах его распада, на два бозона два и фотона: $H \rightarrow WW \rightarrow l\nu l\nu$, $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$, $H \rightarrow \gamma\gamma$.

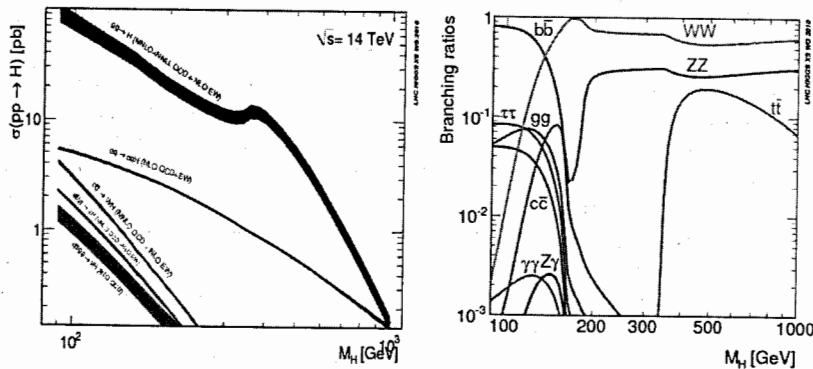


Рис. 1. Сечение рождения бозона Хиггса на LHC для различных механизмов рождения (слева) и вероятности распада бозона Хиггса на разные частицы (справа) как функция его массы.

На рис.2 (слева) показана интегральная светимость, которую необходимо набрать, что бы сделать открытие бозона Хиггса для различных значений его

массы в модах $H \rightarrow WW \rightarrow l\nu l\nu$, $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$, $H \rightarrow \gamma\gamma$. Масса бозона Хиггса может быть померена по его продуктам распада, фотонам и лептонам, зарегистрированным в детекторе. Точность измерения массы используя распады $H \rightarrow \gamma\gamma$, $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ может быть на уровне 0,1–0,3 % для масс меньше 200 ГэВ, как показано на рис.2 (справа).

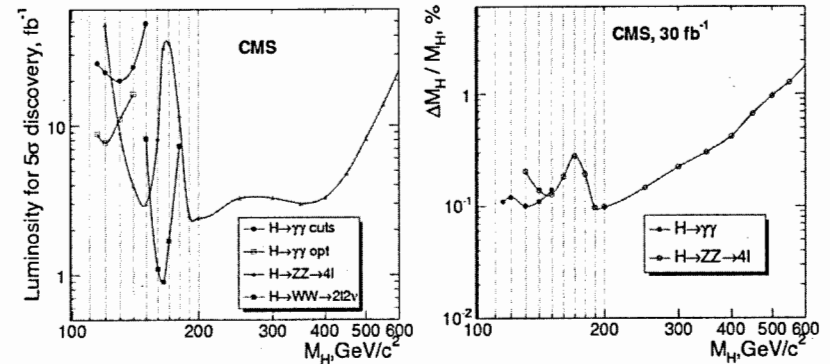


Рис. 2. Интегральная светимость, которую необходимо набрать, что бы сделать открытие бозона Хиггса для различных значений его массы (слева) и точность измерения массы бозона Хиггса, как функция массы (справа).

По современным представлениям стандартная модель является не совсем удовлетворительной теорией. Она не предсказывает, например, тёмное вещество обнаруженное во вселенной.

В наиболее популярном расширении стандартной модели – суперсимметрии работает такой же механизм Хиггса для генерации масс, только число бозонов Хиггса больше – уже не один, а четыре бозона – три нейтральных (h , H , A) и один заряженный (H^\pm). Измеренные значения масс W и t кварка согласуются лучше со значениями, предсказанными в суперсимметрии, чем со стандартной моделью, как показано на рис.3 (слева). Массы бозонов Хиггса и их константы связи с другими частицами зависят в первом приближении только от двух параметров модели, массы бозона Хиггса, A (M_A) и тангенса β ($\tan \beta$ – отношение вакуумных ожидаемых величин двух дублетов Хиггса). Масса самого легкого нейтрального бозона Хиггса, h не превышает 140 ГэВ, как показано на рис.3 (справа). На рис.4 показаны области в плоскости параметров M_A и $\tan \beta$, где возможно открытие бозонов h и H в модах распада h , $H \rightarrow \gamma\gamma$, $\tau\tau$ (рис.4, слева) и бозонов A и H в модах распада A , $H \rightarrow \tau\tau$. На рис.4 (левый) это области пунктирной линии и правее вертикальных кривых. На рис.4 (справа) это области выше кривых.

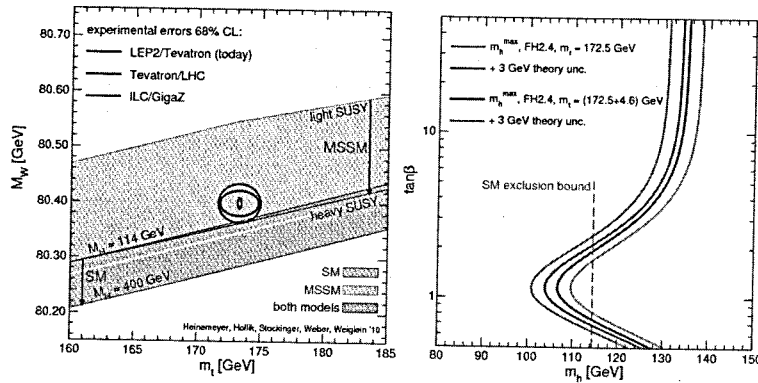


Рис. 3. Измеренные значения масс W и t кварка и области, предсказанные в суперсимметрии и Стандартной Модели (слева). Масса самого легкого нейтрального бозона Хиггса, h как функция $\tan\beta$ (справа).

По крайней мере один из четырёх бозонов Хиггса, а именно самый легкий бозон h будет обнаружен на Большом адронном коллайдере. Если в природе реализован определённый набор параметров модели, то только h может быть открыт и будет обладать теми же свойствами, как и бозон Хиггса в стандартной модели. Таким образом, будет невозможно понять какая модель правильная (если суперсимметричные частицы слишком тяжелые и не будут открыты на коллайдере). В этом случае потребуется линейный коллайдер и такой проект уже рассматривается.

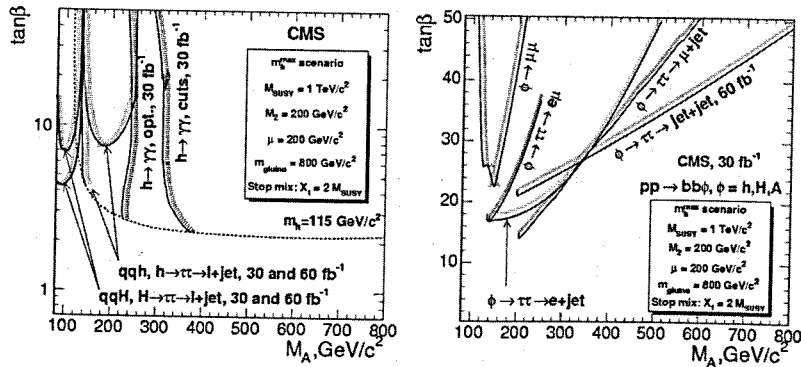


Рис. 4. Области в плоскости параметров M_A и $\tan\beta$, где возможно открытие бозонов h и H в модах распада $h, H \rightarrow \gamma\gamma, \tau\tau$ (слева). Области (смотри текст) в плоскости параметров M_A и $\tan\beta$, где возможно открытие бозонов A и H в модах распада $A, H \rightarrow \tau\tau$ (справа).

Открытие бозонов Хиггса – это только начало. Необходимо измерить его массу, такие квантовые числа как спин и четность, константы связи с

обычными частицами и друг с другом и сравнить с предсказанными значениями в разных моделях. Это работа как минимум на 5 лет после самого открытия, требующая упорного труда многих учёных экспериментаторов и теоретиков что бы сделать достоверное заключение о механизме происхождения масс. Завершением программы исследования свойств бозона Хиггса было бы прямое измерение констант Хиггсовского потенциала, используя моду распада $H \rightarrow HH$. Однако это не под силу LHC (для этого потребуется больше 50 лет набора данных), но это можно сделать на планирующемся линейном коллайдере.

ДИСКУССИЯ ПОСЛЕ ДОКЛАДА

ОИЯИ, Дубна:

Вопрос: «У нас сейчас 12 фундаментальных частиц – 6 кварков и 6 лептонов. Им всем нужно дать массу. Хватает ли той идеологии, о которой Вы сейчас рассказали, чтобы это сделать для всех этих частиц? И даже если на это будет положительный ответ, то нужно 12 разных констант взаимодействия. В чем тогда прогресс теории и прогресс знания, если теория не сокращает число параметров?»

А.Н.: Механизм Хиггса дает массы всем существующим частицам. И лептоны, кварки и калибровочные бозоны получают массу автоматически из взаимодействия с полем Хиггса. Я не знаю по сравнению с чем считать прогресс – Стандартная модель содержит 19 параметров, а например суперсимметричные модели имеет 124 параметра.

Вопрос: «Чем объясняется огромная разница масс t кварка и, например, u или d кварка? Как это возможно с одним полем Хиггса? В то время как в КХД глюон взаимодействует со всеми кварками одинаково.»

А.Н.: А в электрослабой модели неодинаково. Это определяются юкавскими константами связи, которые присутствуют в лагранжиане теории. Так получается по Природе электрослабых взаимодействий. Эти константы определяются из эксперимента. Почему, например, число планет Солнечной системы определенное? Вы можете объяснить? Это такого типа вопрос.

ТГУ, Томск:

Вопрос: «Есть ли уверенность в том, что число поколений частиц ограничиться тремя? Есть ли жесткие ограничения на это число?»

А.Н.: Насколько я знаю, есть ограничения из экспериментальных данных LEP, что число поколений три. Но на самом деле это ограничение обходится – есть модели, где существует четыре поколения. И там нет уже ограничений на массу бозона Хиггса, как в случае SM.

Вопрос: «Если масса бозона Хиггса большая и константа связи велика, то как проводить теоретические расчеты по теории возмущений?»

А.Н.: Ничего страшного. Масса может быть большая. Поскольку сами константы не большие, поэтому ничего страшного для теории не происходит. В SM теория возмущений применима для легкого бозона Хиггса. Если масса меньше 500 ГэВ, то теория возмущений работает хорошо. Если больше, то теория входит в так называемый непертурбативный режим – это как раз область, где мы ожидаем тяжелые резонансы. В этом случае теория становится подобна теории сильных взаимодействий, как это произошло в 60е годы, когда были наблюдаены резонансы.

Вопрос: «Есть ли уверенность в том, что число поколений частиц ограничиться тремя? Есть ли жесткие ограничения на это число?»

А.Н.: Насколько я знаю, есть ограничения из экспериментальных данных LEP, что число поколений три. Но на самом деле это ограничение обходится – есть модели, где существует четыре поколения. И там нет уже ограничений на массу бозона Хиггса, как в случае SM.

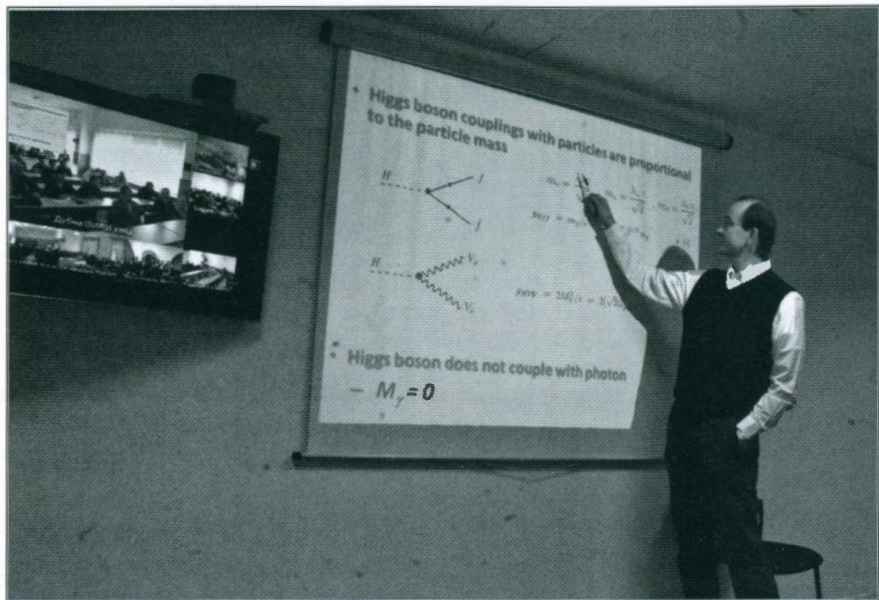
ЯрГУ, Ярославль

Вопрос: «Вы сказали, что в 2013-2014 г.г. можно ожидать экспериментальных данных LHC об открытии бозона Хиггса Стандартной модели. Другой ускоритель, Тэватрон, продолжает работать и исключать бозон Хиггса в районе 17-180 ГэВ. Какой диапазон масс будет исключен к этому времени этим ускорителем?»

А.Н.: Все массы в указанном диапазоне будут исключены, за исключением небольших промежутков для легкого бозона Хиггса.

Вопрос: «Последние год-два активно обсуждаются результаты Тэватрона, которые показывают расхождения измеряемых величин с предсказаниями Стандартной модели. Величина известной асимметрии "вперед-назад" в рождении пары топ-кварк и топ-антикварк по результатам эксперимента D0 составляет 15%, а в SM эта величина около 5 %. Расхождение немного превышает 2σ . И второе – это разница в зарядовой асимметрии для пары лептонов одного знака в распаде B-адронов, которая составляет 3σ . Как на Ваш взгляд это оценивать? Это – случайные флуктуации эксперимента, недостаточная точность вычислений в SM или это могут быть какие знаки о новой физике? Можно ли это проверить на LHC?»

А.Н.: Конечно же на LHC это можно проверить, и мы все это проверим еще раз. А насчет открытий, 2σ или 3σ – это не очень пока еще серьезно, это могут быть статистические флуктуации фона. Поэтому я бы не слишком серьезно воспринимал это сейчас. Вот когда наберется 4-5 σ , тогда мы поговорим об этом.



Рассказывает А.Н. Никитенко

КВАРК-ГЛЮОННАЯ СРЕДА

Объединённый семинар коллаборации RDMS CMS

Руководитель И. А. Голутвин

Физика на Большом адронном коллайдере

Очередное заседание Семинара состоится 17 ноября 2010 г. в 15:00 в конференц-зале Учебно-научного центра Объединенного института ядерных исследований (ауд.437 здания ЛИТ), Дубна

ПРОГРАММА

«Кварк-глюонная среда»

Докладчик проф. И.М. Дрёмин

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

Обсуждаются экспериментальные данные и теоретические представления о свойствах кварк-глюонной среды, образующейся в результате взаимодействий адронов и ядер при высоких энергиях на ускорителях RHIC и LHC. Необычность этих свойств и их неожиданные новые проявления вызывают повышенный интерес и горячие дискуссии вокруг предлагаемых гипотез об их природе. Изучение соударений ядер свинца на LHC, начинающееся в ноябре 2010 года, привлекает к себе особое внимание.

Принять участие в заседании, задать вопросы и выступить в дискуссии можно в точках двустороннего видеодоступа в ОИЯИ (Дубна), ФИАН (Москва), ИЯИ (Тытомяк, Москва), ГИЯФ (Гатчина), ЦЕРН (354-1-AD19), ТГУ (Томск), АГУ (Барнаул), КГУ (Кемерово), ОГУ (Омск), НГТУ (Новосибирск), ЯргУ (Ярославль).

Видеотрансляция семинара осуществляется через систему управления видеоконференц-вязи Томского государственного университета.

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

По вопросам участия в Семинаре обращаться к техническому секретарю Семинара С.В. Давыдовой
тел. +7 495 21 63 445, +7 916 353 52 21, e-mail: svd@rdms.inr.ru Сайт: rdms.inr.ru



Профессор, д.ф.м.н, Игорь Михайлович Дрёмин,
главный научный сотрудник ФИАН (Москва)

КВАРК-ГЛЮОННАЯ СРЕДА

И.М. Дрёмин

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН (Москва)

В работе обсуждаются экспериментальные данные и теоретические представления о свойствах кварк-глюонной среды, образующейся в результате взаимодействий адронов и ядер при высоких энергиях на ускорителях RHIC и LHC. Необычность этих свойств и их неожиданные новые проявления вызывают повышенный интерес и горячие дискуссии вокруг предлагаемых гипотез об их природе. Изучение соударений ядер свинца на LHC, начинающееся в ноябре 2010 года, притягивает к себе особое внимание.

Главная цель доклада состояла в том, чтобы сопоставить экспериментальные данные и теоретические представления о свойствах кварк-глюонной среды, образующейся при соударениях адронов и ядер с высокими энергиями.

Основные экспериментальные сведения мы получаем сейчас с таких ускорителей, как Tevatron, RHIC и LHC. Достижимые на LHC энергии соударения пары протонов в системе центра масс возросли до 7 ТэВ в протонных столкновениях и до 2,76 ТэВ для пары нуклонов в столкновениях ионов (рис.1).

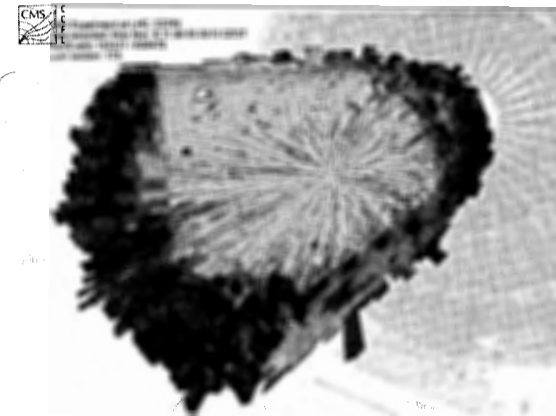


Рис. 1. Результат соударения ионов свинца при энергии 2.76 ТэВ/нуклон в детекторе CMS.

Основная теоретическая идея состоит в том, что адроны состоят из кварков и связующих их глюонов. С ростом энергии их число (особенно, глюонов) в соударяющихся адронах заметно возрастает. В связи с этим возникает вопрос о свойствах системы, состоящей из большого числа

кварков и глюонов (партонов), и, в частности, о возможном проявлении коллективных свойств в такой системе (среде).

В рамках теоретических интерпретаций установилось общее "согласие" по протон-протонным (pp) взаимодействиям. Мягкие процессы с малыми переданными импульсами описываются с помощью феноменологических подходов, представлений о рождении небольших коррелированных групп частиц – кластеров, решений уравнений мультипериферических моделей с малыми передачами импульса. В то же время жесткие процессы, в которых происходит большой обмен импульсов, описываются в рамках пертурбативной квантовой хромодинамики (КХД) с рождением кварков и глюонов, приводящим к образованию струй и их эволюции, заканчивающейся множественным рождением адронов.

Эксперименты RHIC по соударениям тяжелых ионов показали отличия от pp в спектрах частиц, корреляциях (двух-, трех-частичные корреляции; струи; Бозе-Эйнштейновские корреляции; хребет; двугорбые распределения...), коллективных потоках частиц, химсоставе (доля странных частиц, протонов и т.д.). Были сделаны выводы о том, что свойства соударений ионов не сводятся к простому пересчету на независимые соударения нуклонов, а в результате образуется некая кварк-глюонная среда (плазма, жидкость).

Вместе с тем, появление хребта (специфической корреляции, когда частицы рождаются с малыми разностями азимутальных углов и широко распределены по полярным углам) в Au+Au-соударениях при энергиях RHIC интерпретировалось вначале как типично ядерный эффект (рис.2, слева), но наблюдение CMS коллаборацией аналогичных черт в pp-соударениях с энергией 7 ТэВ при больших множественностях (рис.2, справа) требует другого описания. В частности, возникает естественный вопрос о том, каково состояние возбужденных кварков и глюонов при этих энергиях и могут ли проявляться его коллективные свойства даже в нуклонных столкновениях. Обсуждению этой проблемы будет посвящено специальное заседание видео-семинара RDMS-CMS 20 января 2011 года.

Теоретические подходы можно разбить на три группы - микроскопическая КХД (процессы в вакууме и внешних полях), макроскопическая КХД (коллективный отклик среды) и гидродинамика (термодинамические и механические свойства кварк-глюонной среды). КХД является основой всех подходов.

В соударениях ионов различают начальный этап – конденсат цветного стекла (КЦС) и глазма, промежуточный этап - неустойчивости, приводящие к

КГП (среда! - кварк-глюонная плазма) с ее термализацией и заключительный этап - адронизация.

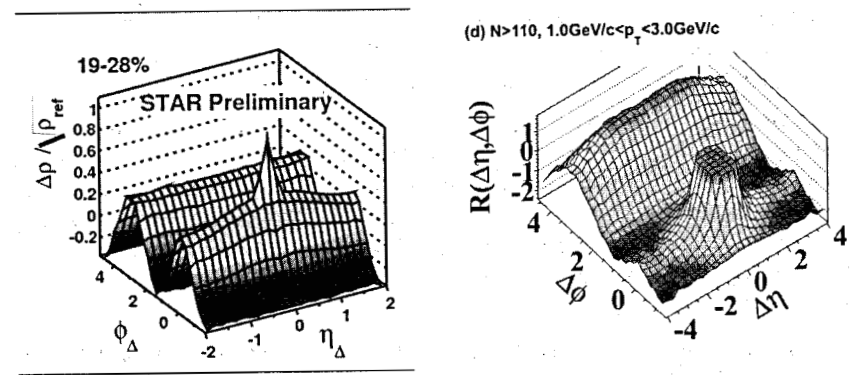


Рис. 2. Хребты, наблюдаемые в соударениях ионов золота при энергии 200 ГэВ на RHIC (слева) и в pp-соударениях при энергии 7 ТэВ на LHC (справа) - коллаборация CMS.

Начальные этапы (КЦС + Глазма) рассматриваются в рамках микро-подхода КХД. Наиболее интересный результат состоит в предсказании перестройки вначале поперечных хромозлектрических и хромоманнитных полей в КЦС в соответствующие продольные поля в Глазме. Дальнейшая эволюция Глазмы в плазму не ясна и, видимо, происходит за счет быстро развивающихся неустойчивостей. Вызывает дискуссии и проблема установления термодинамического равновесия - термализации плазмы.

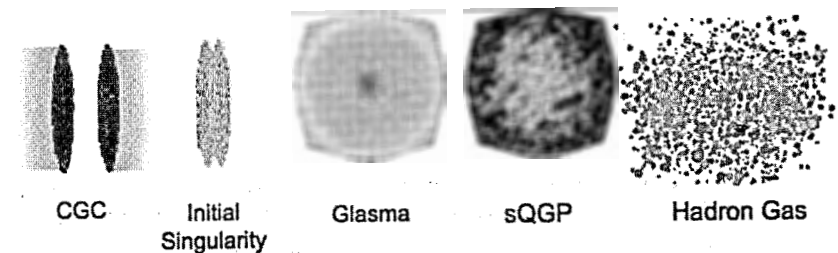


Рис. 3. Этапы эволюции в процессе соударения ионов.

Гидродинамика кварк-глюонной среды применяется на этапе КГП и использует законы сохранения + уравнение состояния + начальные условия + адронизация (рис.3). Несмотря на большое число возникающих проблем и параметров удается связать делаемые выводы с экспериментальными

данными по взаимодействиям ядер. В результате решения уравнений гидродинамики получают сведения о временной эволюции температуры и плотности энергии, азимутальном потоке, химическом составе, вязкости, свойствах переноса энергии, времени жизни КГП, плотности барионов. Основной вывод: КГП представляет собой сильно взаимодействующую почти идеальную жидкость с малой вязкостью.

Экспериментальная проверка хромодинамики кварк-глюонной среды состоит в изучении потерь энергии заряженными пробниками (партонами) в среде. В микро-подходе изучают воздействие среды на пробник, т.е. реакцию движущегося в среде партона на содержащиеся в ней цветные поля. В макро-подходе исследуют коллективные возбуждения самой среды, вызванные пробником, т.е. эффекты, связанные с ее поляризацией, описываемой проницаемостью среды.

Микро-подход рассматривает такие явления как гашение струй, коэффициент переноса энергии с учетом эффектов среды, характер эволюции струй, роль углового упорядочения в них, цвета и размеров среды при последовательных распадах партонов.

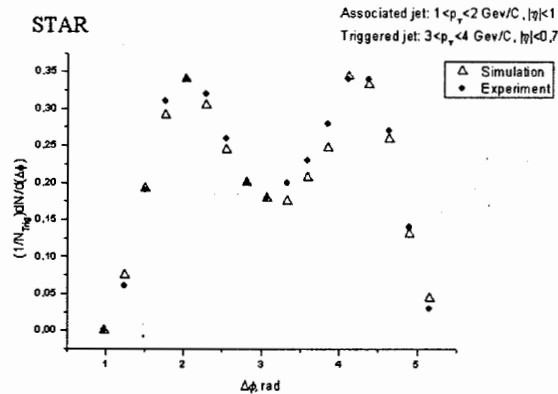


Рис. 4. Описание двугорбых распределений частиц в соударениях ионов золота при энергии 200 ГэВ на RHIC в рамках макро-подхода (черенковские глюоны).

Макро-подход использует понятие хромопроницаемости кварк-глюонной среды, аналогичное диэлектрической проницаемости обычной среды, и дает сведения о плотности партонов в среде, потерях энергии на предсказываемые в этом подходе черенковские глюоны, о длине свободного пробега партона, необычном поведении резонансов в среде, роли

кильватерной струи, образующейся в среде позади движущегося в ней партона, возможном переходном глюонном излучении. В рамках данного подхода удастся с хорошей точностью описать двугорбых распределений частиц в соударениях ионов золота при энергии 200 ГэВ на RHIC (рис.4).

Успешная работа LHC в режиме столкновения ядер свинца с энергией 2,76 ТэВ на пару соударяющихся нуклонов в системе центра масс, начатая всего лишь 7 ноября 2010 г., уже привела к публикации первых экспериментальных результатов. Обнаружены заметные отличия от большинства теоретических предсказаний. Видно, что требуется дальнейшая интенсивная работа по их осмыслению и коррекции. Конечно, ввиду сложности подхода к проблеме сильных взаимодействий в процессе этой работы придется модифицировать некоторые используемые формулы и фитируемые параметры. Несмотря на множество остающихся неопределенностей делаются новые теоретические предсказания, которые активно сопоставляются с получаемыми экспериментальными данными. На повестку дня вновь все острее выдвигается вопрос о коллективных свойствах кварк-глюонной среды, образующейся в соударениях адронов и ядер с высокими энергиями.

ДИСКУССИЯ ПОСЛЕ ДОКЛАДА

НГТУ, Новосибирск:

Вопрос: «Как известно кварки и глюоны не вылетают из адронов. Тем не менее к описанию свойств кварк-глюонной жидкости применяется гидродинамика - наука созданная для описания макро-мира. Как вы можете прокомментировать ее применимость к "запертым" микро-объектам?»

И.М.: «Конфаймент, удержание, кварков проявляется на конечном этапе. Весь процесс оценивается во времена от 1 до 10 ферми и соответственно времена эволюции очень маленькие. Тем не менее, когда стали применять гидродинамику, оказалось, что возможно проследить как этапы проходит кварк-глюонная плазма вовремя эволюции. Температура, плотность энергии, все эти величины меняются и описываются законами термодинамики. А уж адронизация происходит позже и ясно, что это не понятый до конца эффект, с конфайментом пока справиться никто не может.»

Вопрос: «Вы рассматриваете корреляции, предполагая, что модели линейные. Насколько это соответствует истине? Насколько это соответствует экспериментам?»

И.М.: «Что Вы имеете в виду по словом "линейная"? Если посмотреть на это "хребет", то он действительно вытянут вдоль разницы псевдобыстрот, частицы практически нескоррелированы, а вот по разнице азимутальных углов они оказываются очень "зажатыми" - это то, о чем я говорил - условие "выстроенности" в космических лучах и наблюдаемы в экспериментах "хребет". Т.е. такие корреляции имеют место быть, а их объяснение - вопрос будущего.»

ТГУ, Томск:

Вопрос: «Есть ли аналогия между гидродинамикой плазмы и гидродинамикой ядерной жидкости? Им имеется в виду гидродинамическая модель ядра.»

И.М.: «Эти процессы протекают при разных условиях. Кварк-глюонная плазма при очень высоких энергиях, а гидродинамическая модель ядра - статическая модель. Это совсем разные вещи.»

Вопрос: «Для описания кварк-глюонной плазмы используются уравнения состояния. Но уравнения состояния применимы, когда система находится в термодинамическом равновесии. Насколько оправдано такое приближение?»

И.М.: «В результате расчетом времена термализации оказываются не очень большими, что позволяет применять уравнения состояния.»

ПИЯФ, Гатчина

Вопрос: «Какие основные ключевые пункты Вы можете выделить при сравнении двух описаний - макроскопического и локального в рамках пертурбативной КХД? На что следует обратить внимание в ближайших экспериментах на LHC?»

И.М.: «Неясным вопросом является, как из микро подхода получить такую характеристику, как хромопроницаемость. Реалистичных моделей, которые позволяют получить такую хромопроницаемость, какую показывает эксперимент, нет. А что касается экспериментальных эффектов, то они немного разделены - одни касаются того, как среда влияет на партон, а другие - как эта среда возбуждается и высвечивается. Поэтому эти подходы дополнительные.»

ЦЕРН, Женева:

Вопрос: «При столкновении ядер, начиная с определенных энергий, начинают проявляться внутренние степени свободы - кварки и глюоны. Но аналогичную картину можно представить и при ускорении адронов. Можно ли ожидать, что при достаточно больших энергиях можно говорить об образовании системы с кварк-глюонными степенями свободы в таких столкновениях?»

И.М.: «Действительно и в протон-протонных столкновениях возможно образование чего-то похожее на кварк-глюонную среду. Что это за среда - кварк-глюонная плазма, среда или что-то другое - это и есть предмет дальнейших исследований. Особенно в новой области энергий.»

ИЯИ, Москва:

Вопрос: «Какое минимальное количество нуклонов необходимо сталкивать, чтобы говорить об образовании кварк-глюонной плазмы? И какое отношение времени термализации ко времени всего взаимодействия?»

И.М.: «Я начну с последнего вопроса. Это отношение исключительно мало. В термодинамических расчетах время термализации порядка 0.6 ферми, а полное время эволюции - где-то 7 ферми. Насчет числа сталкивающихся частиц я бы сказал, что лучше говорить о плотности энергии, плотности числа частиц на единицу псевдобыстроты. Важно что эта величина в протон-протонных столкновениях на LHC, становится такой же, как в столкновении ядер золота на RHIC. Также и размеры области соударения становятся почти такими же, как я до этого в экспериментах по столкновению ядер. Поэтому весь вопрос заключается в том, какова плотность энергий, которую удается

собрать в данном объеме. А раз мы перешли от 200 ГэВ на RHIC к 7 ТэВ на LHC, то плотность энергии естественно возрастает.»

ОИЯИ, Дубна:

Вопрос: «Когда впервые наблюдали поглощение быстрых партонов, то предсказывали, что коэффициент поглощения довольно большой для легких кварков и должен быть малым для тяжелых. Но в последствии оказалось, что он такой маленький. Как Вы можете это прокомментировать?»

И.М.: «В вопросе "гашения струй" еще далеко не все ясно. Этот параметр сильно меняется в зависимости от разных подходов. Единогласия в этом вопросе до сих пор нет.»

Вопрос: «Кварк-глюонную плазмы искали много лет. Все наблюдаемые данные по подавлению рождения чармониев, повышенного выхода "странных" частиц и т.д. пытались объяснить и с других точек зрения. В настоящее время Вы считаете, что кварк-глюонная плазма найдена и с необходимостью есть?»

И.М.: «Я люблю термин "кварк-глюонная среда". А вот что это - плазма, жидкость или какая-то другая среда, в которой есть необычные коллективные возбуждения - пока это еще недостаточно ясно. Само понятие кварк-глюонная плазма достаточно сильно модифицировалось. Сначала считалось, что это - газ из свободных невзаимодействующих кварков и глюонов. Потом стало понятно, что это - сильновзаимодействующая кварк-глюонная плазма, что, поскольку вязкость мала, это - жидкость. Сейчас ясно, что описание требует квантового подхода - "квантовая гидродинамика". А что это такое никто, как следует не знает.»

Научное издание

ФИЗИКА НА LHC

*Труды объединенного семинара
сотрудничества RDMS CMS*

Выпуск 2

2011-78

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

Сборник отпечатан методом прямого репродуцирования с оригиналов,
предоставленных оргкомитетом.

Подписано в печать 25.07.2011.

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

Усл. печ. л. 5,88. Уч.-изд. л. 6,58. Тираж 300. Заказ № 57377.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/