**Национальный Исследовательский Ядерный Университет**

**Московский Инженерно – Физический Институт**

Кафедра Физики Элементарных Частиц

**Реферат на тему**

**«Модель горизонтального объединения – проблема решения с малой энергетической шкалой»**

Выполнил студент

группы Т9-40

Дубинин Ф. А.

Проверил профессор

Хлопов М. Ю.

Москва, 2013 г

**Общие представления о модели горизонтального объединения**

Стандартная модель, описывая три вида взаимодействия всех известных элементарных частиц, ничего не говорит о том, почему возникает иерархия масс поколений частиц, а так же не может объяснить малость углов смеши-вания. Одной из моделей, способной объяснить эти экспериментальные факты, является модель горизонтального объединения (МГО). Данная модель предполагает «горизонтальную» симметрию между поколениями частиц. Причиной для предположения о наличии горизонтальной симметрии служит тот факт, что для всех поколений частиц взаимодействия по сильным и электрослабым каналам протекают абсолютно одинаково. Таким образом, обнаруживается очевидная симметрия, нарушаемая лишь относительно гравитационного взаимодействия. Нарушение происходит на уровне

*F* > 105 ÷ 106 ГэВ.

При этом наблюдаются различные эффекты, придающие реалистичность данной теории. К таковым относятся:

1. естественное подавление нейтральных токов с изменением аромата;
2. естественное объяснение иерархии электрослабых масштабов и масштабов Великого Объединения;
3. естественная горизонтальная иерархия масс;
4. естественное решение в КХД проблемы СР-нарушения.

Однако для использования МГО требуется ввести в теорию дополнительные условия, а именно:

* Необходимо существование дополнительных сверхтяжелых ферми-онов, составляющих скрытый сектор теории. Это объясняется тем, что массы всех частиц генерируются с помощью see-saw механизма.
* Необходимо существование псевдо-голдстоуновского бозона α, названного архионом. Этот бозон возникает как следствие нарушения глобальной *U(1)* симметрии. Нарушение происходит на масштабе *F* , такой же масштаб имеет и шкала взаимодействия архиона.
* α бозон должен иметь связи как с диагональными, так и с недиаго-нальными по ароматам переходами кварков и лептонов, то есть явля-ется одновременно фамилоном синглетного типа.
* α бозон должен быть майороном синглетного типа. Таким образом, архион непосредственно связан с генерацией массы нейтрино.

Из введения в теорию новых условий неизбежно вытекает следующее:

1. появляются нейтральные токи, меняющие аромат, связанные с архи-оном и взаимодействиями горизонтальных бозонов;
2. нейтрино приобретает массу (майорановского типа), и, кроме того, наблюдается иерархия масс нейтрино различных поколений;
3. тяжелые нейтрино становятся нестабильными относительно архион-ных распадов на более легкие;
4. количество фермионов увеличивается в два раза, при этом сверхтяже-лые фермионы являются метастабильными.

Непосредственная проверка основной гипотезы данной модели невозможна в виду недостижимости на сегодняшний день (да и в обозримом будущем) того масштаба энергий, на котором должно наблюдаться нарушение сим-метрии. Косвенное подтверждение теории возможно в сочетании лабора-торных тестов, таких как:

* поиск массы нейтрино;
* поиск осцилляций нейтрино;
* изучение переходов *К0↔̅К̅0 и В0↔̅В̅0*;
* поиск аксионных распадов *μ→еα, К→πα* и т.д. вместе с анализом космологических и астрофизических эффектов, связанных с этими распадами

**Ранняя Вселенная в модели горизонтального объединения**

Динамика инфляции

В МГО в качестве инфлатона используется бозон Хиггса η. В общем случае вакуумное среднее <η> определяет подавление масс нейтральных ферми-онов (легких нейтрино) относительно заряженных:

Потенциал хиггсовского поля имеет вид

где *f* -- масштаб нарушения *SU(2)*-симметрии. Данное скалярное поле и будет играть роль инфлатона в МГО. Используя этот потенциал можно рассчитать амплитуду возмущения плотности *δН(k)* (для 60-го е-фолдинга):

и это значение воспроизводит результаты экспериментов (COBE).

Также можно оценить значение параметра Хаббла на момент конца инфляции (для широкого диапазона *f* ):

.

Образование первичных черных дыр

Возмущения плотности энергии в ультрафиолетовой области спектра эффек-тивно ограничиваются образованием первичных черных дыр. Для фонового уравнения состояния *p = γ·ε* (0 < *γ* < 1) вероятность формирования ПЧД с массой в диапазоне *М* определяется хвостом гауссовского распределения флуктуации плотности:

Масса ПЧД, рождающейся в момент времени *t*, определяется выражением

при *γ* = 1/3, что соответствует радиационно-доминированной стадии.

На пылевой стадии (*p* = 0) флуктуации плотности растут, образуя гравитаци-онно связанные объекты. Тогда доля полной плотности, переходящая в ПЧД, зависит от вероятности сжатия этих объектов под шварцшильдовский ради-ус. Минимальная вероятность этого события определяется выражением

и соответствует прямому коллапсу ПЧД в период образования. Этот случай соответствует коллапсу ПЧД с массой в диапазоне в момент *t* . Здесь *М*1 – масса внутри космологического горизонта на момент времени *t*1, *Мmax* – масса объекта, обособляющегося от расширения в момент *t*2:

Модель предполагает, что после окончания хаотической инфляции наступает период разогрева. В этом случае возможна реализация мягкого уравнения состояния (*γ* << 1), что увеличило бы эффективность образования первичных черных дыр.

Собственно, времена *t*1 и *t*2 определяются как момент окончания инфляции и момент окончания разогрева соответственно:

здесь -- ширина распада инфлатона, причем

По окончании разогрева скалярное поле быстро распадается на релятивист-ские частицы.

В случае выбранных численных параметров пик распределения ПЧД по массе находится вблизи *M*1 и их спектр будет непротяженным.

Даже в наиболее общем случае неминимального самодействующего инфлатона, вероятность прямого коллапса ПЧД будет незначительна. Для внутренней согласованности модели необходимо ввести ограничения на образование ПЧД.

Введение условия

гарантирует правильную структуру массовой матрицы фермионов, генериру-емой дираковским “see-saw” механизмом. Здесь – константы соот-ветствующих взаимодействий, – вакуумное среднее соответствующего горизонтального скаляра. Для минимального самодействия инфлатона необ-ходимо, чтобы выполнялось

Столь низкое значение масштаба нарушения горизонтальной симметрии влечет за собой проблему образования доменных стенок за счет флуктуаций вещественного инфлатонного поля в период от t1 до t2. Для устранения этой проблемы есть два пути. Первый требует устранить условие минимальной связи инфлатона. Второй – ввести комплексное инфлатонное поле. В первом случае рассматриваемый в данном разделе период эволюции Вселенной бу-дет ненормально большим, во втором реализуется неминимальная модель аксиона. Таким образом, очевидно, что МГО требует более сложного много-параметрического космологического сценария.

Ранние «горизонтальные» фазовые переходы

Взаимодействие горизонтальных скаляров с инфлатоном приводит к фазо-вым переходам на инфляционной стадии. При этом в спектре возмущения плотности возникают характерные пики. Пиковые возмущения уходят за горизонт в течение приблизительного периода от 40-го до 1-го е-фолдинга до конца инфляции. На RD или MD стадии они вновь оказываются в пределах горизонта, причем имеют возможность сформировать ПЧД.

Для дыр, сформированных на RD стадии, масса оценивается как

где *Н*0 – постоянная Хаббла во время инфляции. На MD стадии для оценки массы ПЧД используют выражение

Массы скаляров *m*i связаны с масштабами нарушения горизонтальной симметрии соотношением

причем вакуумные средние поколений имеют следующую иерархию:

Минимальное взаимодействие инфлатона со скалярами определяется фермионными петлевыми поправками и дается выражением

Когда амплитуда поля *η* падает ниже

Происходит *i*-й фазовый переход. При этом в спектре адиабатических возмущений возникает пик с контрастом плотности

где

Шкалу нарушения горизонтальной симметрии можно связать с е-фолдингом и массой первичных черных дыр, образующихся при коллапсе пиков возму-щений. Поскольку ни одна ЧД, образованная за счет фазовых переходов, не превышает предел в 1000 г по массе, можно сделать вывод о том, что

Динамика аксионного поля

На основе анализа моделей, использующих аксион как частицу холодной скрытой массы, можно заключить, что первичное аксионное поле было распределено крайне неоднородно.

Аксионное поле возникает после фазового перехода, нарушающего симмет-рию Печчей-Куин (PQ). Собственно, аксион есть ничто иное, как бозон хиггса с комплексной фазой *θ*. При нарушении PQ-симметрии, аксион остается почти безмассовым. Масса появляется после КХД фазового перехода.

Локальное значение энергии колебаний аксионного поля зависит от локаль-ной фазы *θ*. Модуляции распределения фазы возникают из-за образования и трансформации топологических дефектов в последовательности PQ и КХД фазовых переходов.

Во время PQ перехода образуется броуновская сеть аксионных нитей. В это время истинное состояние вакуума является вырожденным и масса у акси-онного поля крайне мала и определяется соотношением

где *F*α – шкала нарушения PQ-симметрии, *А*с – константа, зависящая от моде-ли аксиона, *m*π – масса пиона, *f*π – пионная константа. После КХД перехода вырождение снимается, при этом минимуму энергии будет соответствовать фаза

В областях пространства с данной фазой поле будет находиться в состоянии конденсата с нулевым импульсом.

Состояния *θ* = *0*, *θ* = *2π* и т.д. нетождественны. При этом движение вдоль замкнутого контура, очевидно, приводит к изменению фазы. При изменении фазы на *2π* поле неизбежно попадает в другое вакуумное состояние, а зна-чит при *θ* = *πk* должны наблюдаться полевые аксионные стенки.

Распределение плотности энергии аксионного поля, собственно говоря, определяется расположением стенок. Области поля, в которых плотность энергии превышает среднее значение, были названы архиолями. Структура архиолей сохраняется на протяжении всей последующей эволюции Вселен-ной (реализуясь в виде аксионной скрытой массы), в то время как стенки со временем исчезают.

Архиоли способны влиять на распределение энергии реликтового излучения, что приводит к ограничению на шкалу нарушения PQ-симметрии

Весьма примечательно, что данное ограничение является модельно незави-симым.

После КХД фазового перехода аксион приобретает существенно отличную от нуля массу. Появляется возможность формирования гравитационно связан-ных аксионных объектов, что и реализуется внутри архиолей. Предположительно, в настоящее время такие объекты можно наблюдать в гало галактик. Масса и размер этих объектов колеблются в пределах

Обнаружение подобных объектов в гало нашей галактики позволило бы кос-венно подтвердить правильность предположений о существовании и путях эволюции аксионного поля в рамках МГО.

Помимо объяснения механизма формирования скрытой массы, введение аксионного поля в рамках МГО позволяет описать механизм нарушения барионной симметрии во Вселенной.

Барионная асимметрия

Модель горизонтального объединения разрешает несохранение (*B* + *L*) в электрослабых взаимодействиях при высоких температурах и неравновесные переходы с обусловленные физикой майорановской массы ней-трино.

Пространственное распределение барионов и антибарионов связано с моду-ляцией фазы аксионного поля. Таким образом, в некоторых областях прос-транства возможен избыток барионов того или иного заряда.

Следовательно, при некоторых условиях возможно образование доменов антивещества. Небольшие домены аннигилируют до первой секунды расширения. Крупномасштабные скопления, удовлетворяющие ограничени-ям на аннигиляцию, способны формировать объекты доступные для наблюдения. Минимальная масса таких объектов определяется условием выживания относительно аннигиляции с окружающим вещетвом. Так, не исключено наличие в гало Галактики скоплений антизвезд. Подобные скопления должные являться источниками антипротонов, с помощью которых возможно обнаружение данных объектов.

**Космология скрытой массы в модели горизонтального объединения (случай «низкой» шкалы нарушения горизонтальной симметрии)**

В общем случае, существует шесть различных типов скрытой массы, которые могут быть реализованы в МГО. Реализация того или иного сценария зависит от шкалы нарушения симметрии Печчей-Куин. Сверху шкала ограничена запретом на горизонтальные фазовые переходы во время инфляционной стадии. Нижний предел обусловлен ограничением на излучение аксионов звездами. Соответствующие значения энергии

В данной работе описываются модели, соответствующие нарушению PQ-симметрии на масштабах

К таковым принадлежат модели релятивистского и нерелятивистского иерар-хического распада нейтрино (HND), кроме того небольшой вклад в плотность темной материи вносят первичные архионы, относящиеся к сценарию горя-чей скрытой массы.

По сценарию релятивистского HND в современной Вселенной доминируют релятивистские архионы и электронные нейтрино от распадов мюонных нейтрино с массой

и временем жизни

при условии быстрого распада с массой

и временем жизни

В настоящий момент плотность DM в соответствии с этой моделью описыва-ется выражением

где параметр, учитывающий смешивание нейтрино и учитывающий красное смещение релятивистских продуктов распада; критическая плотность.

Нерелятивистский сценарий реализуется в случае, если

В данном сценарии архионы будут нерелятивистскими или полурелятивист-скими. Полная плотность архионной материи

В тоже время, в случае полная плотность нерелятивистских

Очевидной проблемой низкоэнергетической шкалы нарушения симметрии Печчей-Куин являются высокие значения масс нейтрино различных арома-тов. Полученные в экспериментах ограничения на массы нейтрино второго и третьего поколений находятся в резком несоответствии со значениями, предлагаемыми моделью.

**Экспериментальная проверка теории**

Как уже было сказано, для низкоэнергетической шкалы нарушения симмет-рии контрольными являются результаты экспериментов по измерению массы нейтрино, по поиску двойного безнейтринного бета-распада и нейтринных осцилляций. Для модели в целом решающими являются результаты экспериментов по поиску аксиона и определения его константы взаимодействия.

Поскольку нейтрино – очень слабо взаимодействующая, к тому же, незаря-женная частица, определение ее массы весьма затруднено. Для дираковско-го нейтрино существует два пути определения массы: кинематический расчет в случае слабых распадов или расчет на основе теории осцилляций нейтрино. Ниже представлены результаты оценки масс нейтрино на 2012 год:

* Результат получен на основании анализа данных распадов
* Результат получен при анализе спектра мюонов в распаде
* Результат получен при исследовании распадов

Таким образом, ограничения, наложенные на дираковскую массу нейтрино, полученные при исследовании слабых распадов, не противоречат предпосылкам теории.

Поиски безнейтринного бета-распада дают различные оценки, однако, во всех экспериментах период полураспада по этому каналу Ограничение на майорановскую массу нейтрино колеблется в пределах

Данные, полученные в экспериментах по поиску осцилляций нейтрино, сви-детельствуют о том, что иерархия масс нейтрино отличается от предсказаний модели, и весьма существенно. Следовательно, предложенная моделью иерархия масс горизонтальных скаляров не объясняет наблюдаемой иерар-хии масс поколений фермионов.

В экспериментах по поиску распадов с участием аксиона не было получено указаний существование таких мод распада. В других экспериментах аксион также не был обнаружен. Полученное ограничение на взаимодействие акси-она с другими частицами имеет очень низкое значение.

**Заключение**

В работе была исследована модель горизонтального объединения. В основе своей модель предполагает наличие «горизонтальной» симметрии между поколениями фермионов. Описанный механизм нарушения симметрии объясняет иерархию масс поколений. Введение в теорию псевдогодстоунов-ского бозона фамилонного типа объясняет барионную ассиметрию, а кроме того этот бозон, названный архионом, является кандидатом на роль частицы скрытой массы.

Ограничения, накладываемые на шкалу нарушения горизонтальной симмет-рии оставляют разрешенной достаточно большую область энергий. В данной работе исследовалась область низких энергий нарушения. Однако, результа-ты экспериментов опровергают выводы модели в целом. Нет подтвержде-ний существования архиона, а даже если он существует, его параметры не соответствуют предсказаниям модели. Также предсказаниям модели не соответствует иерархия масс нейтрино, полученная в экспериментах по осцилляциям.

Таким образом, модель горизонтального объединения остается лишь тео-рией, не имеющей подтверждения в реальном мире.

**Список литературы**