

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ МИФИ»  
(НИЯУ МИФИ)

УДК 539.120.71

РЕФЕРАТ НА ТЕМУ

**Модель горизонтального объединения. Проблема объединения на малом  
энергетическом масштабе.  
(Model of Horizontal unification – problem of low scale solution)**

Студент

\_\_\_\_\_ А. Н. Морозихин

# ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Введение</b>	<b>3</b>
<b>1 Модель горизонтального объединения и ее космологические следствия</b>	<b>5</b>
<b>2 Ранняя вселенная в модели горизонтального объединения</b>	<b>7</b>
2.1 Инфляция . . . . .	7
2.2 Первичные черные дыры . . . . .	7
<b>3 Бариосинтез</b>	<b>10</b>
3.1 Бариосинтез . . . . .	10
<b>4 Модели скрытой массы в модели горизонтального объединения</b>	<b>11</b>
<b>5 Экспериментальные данные</b>	<b>13</b>
<b>Заключение</b>	<b>15</b>
<b>Список литературы</b>	<b>16</b>

# ВВЕДЕНИЕ

Стандартная калибровочная модель  $SU(3) \otimes SU(2) \otimes U(1)$  также как и ее расширения, основанные на калибровочных группах объединения  $SU(5)$ ,  $SU(10)$ , построены в рамках одного фермионного поколения и не содержат в себе обоснования к возникновению иерархии масс между поколениями фермионов и к наблюдаемой малости величин углов смешивания. С этой точки зрения проблема поколений фермионов остается одной из центральных проблем физики частиц. В представленных моделях юкавские связи произвольны и должны изначально задаваться для каждого фермиона в отдельности, чтобы воспроизводились экспериментальные данные по их массам и углам смешивания [1].

Относительное равноправие между кварк-лептонными поколениями с точки зрения сильного и электрослабого взаимодействий предполагает существование симметрии между этими поколениями (горизонтальной). Как один из рассматриваемых вариантов используют концепцию локальной симметрии  $SU(3)$  [2]. Под действием этой симметрии левополяризованные кварки и лептонные компоненты преобразуются как  $SU(3)_H$  триплеты, а правополяризованные — как антитриплеты. Их массовый член преобразуется как  $3 \otimes 3 = 6 \oplus \bar{3}$  и, следовательно, может возникать только в результате нарушения горизонтальной симметрии. Этот подход может быть тривиально обобщен на случай  $n$  поколений, предполагая соответствующую  $SU(n)$  симметрию. В случае трехпоколений, выбор группы горизонтальной симметрии является единственным, поскольку ортогональные и вектороподобные калибровочные группы не могут обеспечить различных представлений для левых и правых фермионных состояний. В рассмотренном подходе гипотеза о том, что структура массовой матрицы определяется структурой нарушения горизонтальной симметрии, то есть структурой вакуумных средних горизонтальных скаляров, осуществляющих нарушение  $SU(3)$ , является обоснованной. Иерархия масс между поколениями связана с гипотезой об определенной иерархии такого нарушения симметрии. Эта гипотеза называется гипотезой горизонтальной иерархии [3].

Чтобы построить реалистическую модель нарушения горизонтальной симметрии, нужно ввести довольно широкий набор параметров. Однако, стоит отметить, что число этих параметров меньше, чем в реалистической модели без горизонтальной симметрии. Большинство этих пара-

метров фиксируется экспериментальными данными о свойствах кварков и лептонов. Также совокупность нетривиальных физических явлений, предсказываемых на основе модели, в принципе обеспечивает полную проверку модели и определение всех ее параметров.

# 1 МОДЕЛЬ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ОБЪЕДИНЕНИЯ И ЕЕ КОСМОЛОГИЧЕСКИЕ СЛЕДСТВИЯ

Анализ горизонтального объединения как феноменологии теории всего, на основе космомикрoфизики, может быть полезен для правильного выбора реалистической модели среди множества возможностей.

Явления позволяющие обеспечить полную проверку предлагаемой модели и ее параметров возникают при высоком энергетическом масштабе нарушения горизонтальной симметрии  $F$ , который имеет порядок величины  $F > 10^5 - 10^6$  ГэВ. Такой порядок делает невозможным и недоступным их изучение даже в обозримом будущем. Тем не менее, сочетание экспериментальных поисков косвенных эффектов в редких процессах известных частиц с анализом их космологических и астрофизических эффектов позволяют изучать физику, предсказываемую на этих масштабах, так же как и космологический сценарий, основанный на этой физике.

Предлагаемая к обзору модель [5] удовлетворяет следующим условиям:

- Естественное подавление нейтральных токов с изменением аромата (FCNC) [6];
- Естественная горизонтальная иерархия, которая проявляется в иерархии масс поколений;
- Естественное решение в КХД проблемы CP-нарушения [7];

Из представленной модели следует:

- Существование нейтральных токов, меняющих аромат, связанных с аксионом и взаимодействием горизонтальных бозонов;
- Существование майорановской массы нейтрино;
- Объяснение иерархии масс между поколениями лептонов;
- Существование метастабильных сверхтяжелых фермионов;

Проверку можно осуществить на основе:

- Поиск массы нейтрино;
- Поиск осцилляций нейтрино;
- Изучение переходов  $K^0 \leftrightarrow \bar{K}^0$  и  $B^0 \leftrightarrow \bar{B}^0$ ;
- Поиск аксионных распадов вместе с анализом космологических и астрофизических эффектов;

Последние включают в себя изучение влияния излучения аксионов на процессы эволюции звезд, исследование воздействия эффектов первичных аксионных полей и массивных нестабильных нейтрино на динамику образования крупномасштабной структуры Вселенной, так же как и анализ механизмов инфляции и бариосинтеза, основанных на физике скрытого сектора модели.

# 2 РАННЯЯ ВСЕЛЕННАЯ В МОДЕЛИ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ОБЪЕДИНЕНИЯ

## 2.1 ИНФЛЯЦИЯ

В инфляционном сценарии, реализующемся в рамках модели горизонтального объединения, в качестве инфлатона может выступать хиггсовское поле  $\eta$ , являющееся вещественным  $SU(2) \otimes U(1) \otimes SU(3)_H$  и синглетным скаляром с вакуумным средним и потенциалом:

$$\langle \eta \rangle = \frac{\mu}{G_\mu}; V(\eta) = \lambda(\eta^2 - \frac{f^2}{2})^2, \quad (2.1)$$

где  $f$  - энергетический масштаб спонтанного нарушения глобальной симметрии.

Такой потенциал соответствует медленно скатывающемуся скалярному полю, следовательно, простейшая реализация горизонтальной симметрии соответствует простейшему сценарию хаотической инфляции. Если зафиксировать параметры потенциала инфлатона, используя наблюдаемые ограничения на плотность энергии инфлатона в период генерации наблюдаемых флуктуаций микроволнового фона для 60-го е-фолдинга, можно ограничить плотность энергии инфлатона в период окончания инфляции. Используя потенциал инфлатона, можно рассчитать амплитуду возмущений плотности  $\delta H(k)$ , составляющую для моделей с плоскими спектрами и незначительными гравитационными волнами, соответствующих моделям горизонтального объединения  $\delta H \sim 1.7 * 10^{-5}$ . Кроме того, возможно оценить значение хаббловской постоянной в период окончания инфляции  $H_{end}$ , в широком диапазоне вакуумных средних  $f$  составляющее  $H_{end} \simeq 1.8 * 10^{-7} m_{pl}$ . Данное значение воспроизводит результат эксперимента COBE. В экспериментах WMAP и PLANCK, наблюдавших микроволновый фон, были получены данные на уровне  $\sim 10^{-4}$

## 2.2 ПЕРВИЧНЫЕ ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ

Поведение спектра возмущений плотности энергии в ультрафиолетовой области можно оценить, анализируя образование первичных черных дыр (ПЧД) в ранней Вселенной. Вероятность формирования ПЧД в диапазоне масс  $M$  для уравнения состояния для уравнения состояния  $p = u$

- $\epsilon(0 < y < 1)$   $p = \gamma * \epsilon(0 < \gamma < 1)$  определяется хвостом сферически симметричного гауссовского распределения флуктуации плотности:

$$\beta_0(M) \approx \delta(M) \exp - \frac{\gamma^2}{2\delta^2(M)} \quad (2.2)$$

Масса ПЧД, родившейся на момент времени  $t$ , должна быть по меньшей мере,  $\gamma^{\frac{2}{3}}$  от массы горизонта. В ранней Вселенной обычно берется  $\gamma = 1$  что соответствует радиационно-доминированной стадии. Далее следует пылевая стадия с уравнением состояния  $w = 0$ , во время которой за счет роста флуктуации плотности образуются гравитационно связанные объекты. Доля плотности переходящая в ПЧД, зависит от вероятности, с которой эти объекты сжимаются под свой шварцшильдовский радиус. Минимальная вероятность соответствует прямому коллапсу ПЧД непосредственно в период образования:  $\beta(M) \sim 2 * 10^{-2} \delta(M)^{\frac{13}{2}}$ . Такая вероятность справедлива для образования ПЧД с массой в диапазоне  $M_1 \leq M \leq M_{max}$ , где  $M_1$  - масса внутри космологического горизонта на момент начала пылевой стадии  $t_0$ ,  $M_{max}$  - масса объекта, обособляющегося от расширения в конце пылевой стадии  $t_2$ .  $M_{max}$  дается неявно выражением:

$$M_{max} = [\delta(M_{max})]^{\frac{3}{2}} \frac{t_2}{t_{pl}} m_{pl} \quad (2.3)$$

Инфляционная модель, основанная на модели горизонтального объединения, делает возможной реализацию мягкого уравнения состояния  $\gamma \ll 1$ , возникающего в период разогрева после окончания хаотической инфляции, наличие которого увеличивает эффективность образования ПЧД. Разогрев происходит за счет трения, возникающего при взаимодействии скалярного инфлатонного поля с другими частицами, преобразующего кинетическую энергию колебаний поля в фоновое излучение.

В таком случае пылевая стадия начинается с момента окончания инфляции и длится до завершения разогрева Вселенной в момент  $t_2 = \Gamma_{\eta}^{-1}$ , когда скалярное поле быстро распадается на релятивистские частицы  $||$ . Для реализации достаточно длительной пылевой стадии необходимо выполнения условия  $H_{end}^{-1} \ll \Gamma_{\eta}^{-1}$ . Внутренняя согласованность модели горизонтального объединения требует ввести ограничение на образование ПЧД, гарантирующее правильную структуру массовой матрицы фермионов, генерируемой дираковским "see-saw" механизмом:

$$G_{\eta} f \leq G_F^n \langle \xi^{(n)} \rangle, \quad (2.4)$$

где  $G$  - константы соответствующих взаимодействий,  $\xi$  - вакуумное среднее соответствующих горизонтальных скаляров.

Таким образом для минимального самодействия инфлантона необходимо, чтобы выполнялось условие  $f \leq 10^{-6} m_{pl}$ .



Такое значение масштаба нарушения горизонтальной симметрии влечет за собой проблему образования доменных стенок за счет флуктуаций вещественного инфлатонного поля в период пылевой стадии. Для ее решения требуется либо устранить условие минимальной связи инфлатона и положить  $f = m_{pl}$ , что приведет к ненормально большому постинфляционному периоду, либо ввести комплексное инфлатонное поле, для реализации которого потребуется ввести неминимальную модель аксиона. Таким образом решение данной проблемы в рамках МГО требует более сложного многопараметрического космологического сценария.

## 3 БАРИОСИНТЕЗ

### 3.1 БАРИОСИНТЕЗ

МГО обеспечивает механизм бариосинтеза. Этот механизм основан на несохранении суммы барионного и лептонного чисел в электрослабом взаимодействии при неравновесных переходах с  $\Delta L = 2$ , обусловленных физикой нейтрино, существованием майорановской массы. В случае, когда в процессе бариосинтеза существенную роль играет CP-нарушение вследствие влияния аксионного поля, пространственная асимметрия барионов может оказаться неоднородной из-за модуляции его фазы. При этом барионная асимметрия зависит от  $\theta(x)$  и представляется в виде:

$$\Delta(x) = \Delta_0 + \Delta_1 \sin \theta(x) \quad (3.1)$$

При  $\Delta_1 > \Delta_0$  образуется избыток барионов. В таком случае получается нетривиальная картина эволюции доменов антивещества. Небольшие домены аннигилируют еще до первой секунды расширения, в то время как крупные скопления способны формировать доступные для наблюдения объекты [8]. Так не исключено существование шаровых скоплений антизвезд в гало нашей Галактики. Подобные скопления должны являться источниками антипротонов, что потенциально позволяет наблюдать их в эксперименте AMS.

## 4 МОДЕЛИ СКРЫТОЙ МАССЫ В МОДЕЛИ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ОБЪЕДИНЕНИЯ

В случае нарушенной симметрии поколений механизм see-saw генерации массы нейтрино формирует иерархию масс, обратную по отношению к иерархии нарушения горизонтальной симметрии. Масса обычного легкого нейтрино обратно пропорциональна майорановской массе тяжелого партнера:

$$m_\nu \propto M_N^{-1} \quad (4.1)$$

В случае модели обратной иерархии та же самая обратная пропорциональность имеет место и для тяжелых партнеров кварков и заряженных частиц. В модели горизонтального объединения, углы смешивания, характеризующие амплитуду осцилляций нейтрино, определяются относительным вращением в горизонтальном групповом пространстве массовых матриц нейтрино и заряженных лептонов. Поэтому экспериментальные ограничения на углы смешивания нейтрино в поисках осцилляций нейтрино накладывают верхние пределы на отклонения отношений масс нейтрино от строгой пропорциональности соответствующим отношениям масс заряженных лептонов. При больших углах смешивания, например, близких к случаю максимального смешивания, соотношение пропорциональности сильно искажается. Исходное соотношение пропорциональности:

$$m_{\nu_e} : m_{\nu_\mu} : m_{\nu_\tau} \sim m_e : m_\mu : m_\tau \quad (4.2)$$

Для секстетного представления горизонтальных хиггсовских полей массовые матрицы нейтрино недиагональны и возможны распады тяжелых нейтрино  $\nu_H$  на легкие нейтрино  $\nu_L$  и архиноны.

Совокупность космологических и астрофизических ограничений оставляют два интервала энергий, где может быть разрешена данная модель:

- $\theta_{PQ} \sim 10^6$  ГэВ;
- $\theta_{PQ} \sim 10^{10}$  ГэВ;;

Для малой шкалы нарушения симметрии поколений, предсказываемый эффект майорановской массы нейтрино весьма близок к современной чувствительности поисков двойного безнейтринного распада. С другой стороны, предсказываемые в модели с «низкой» шкалой значения раз-

ности квадратов масс нейтрино находятся в резком противоречии с этими параметрами, определенными из экспериментальных указаний на наличие нейтринных осцилляций в экспериментах SNO, KamLAND, K2K и SuperKamiookande.

В оставшейся области, аксионный вклад в плотность оказывается недостаточным для общей плотности скрытой материи. Эти результаты привели к опровержению модели, придав основанному на этой модели космологическому сценарию исключительно иллюстративный характер. При больших  $\theta_{PQ}$  аксионное поле должно доминировать во Вселенной. Доминантность стабильных массивных нейтрино соответствует меньшим  $\theta_{PQ}$ . И, наконец, самым низким допустимым значениям этого параметра соответствуют космологические модели с массивным нестабильным нейтрино.

В рамках модели горизонтального объединения, непрерывно изменяя фундаментальный физический параметр  $\theta_{PQ}$ , мы получаем плавный переход от доминантности одной формы скрытой массы к доминантности другой такой формы во Вселенной. Модель позволяет сделать определенные предсказания для каждого типа скрытой массы, исходя из комбинации космологических, астрофизических и физических ограничений. В общем случае, имеется шесть различных сценариев скрытой массы, которые могут реализоваться в рамках модели горизонтального объединения:

- Холодная скрытая масса;
- Горячая скрытая масса;
- Релятивистская нестабильная скрытая масса;
- Нерелятивистская нестабильная скрытая масса;
- Релятивистский иерархический распад нейтрино;
- Нерелятивистский иерархический распад нейтрино;

## 5 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Эксперименты по поиску массы нейтрино, осциллирующий нейтрино, а также двойного безнейтринного  $\beta$ -распада позволяют дать критический анализ модели горизонтального объединения.

Оценка массы электронного, мюонного и тау нейтрино производится с помощью анализа распада трития, пиона, и тау-лептона. На данный момент установлены следующие ограничения на массы:

- $m_{\nu_e} < 2.2$  эВ;
- $m_{\nu_\mu} < 170$  кэВ;
- $m_{\nu_\tau} < 15.5$  МэВ;

Из представленных оценок видно, что ограничения на дираковскую массу нейтрино не противоречат теории. **[oscillations??]**

Поиски безнейтринного двойного  $\beta$ -распада дают оценки на массу электронного нейтрино  $m_{\nu_e} < 0.33$  эВ. Первые результаты эксперимента Gerda дают оценку периода полураспада по данному каналу более  $2 * 10^{25}$  лет. Данные полученные из экспериментов по поиску осциллирующий нейтрино указывают на существенное отличие иерархии масс нейтрино от предсказываемой. Это является следствием жестких ограничений на разность масс. **[and direct upper limit on electron neutrino mass]** Таким образом, предлагаемая иерархия масс нейтрино не находит экспериментального подтверждения.

Эксперименты по поиску аксиона и реакций с его участием также не дали положительных результатов. Например, анализ нейтринного сигнала в эксперименте SN1987A не подтвердили существования аксионов. Эти данные свидетельствуют о том, что аксион либо является невидимой частицей, либо он не существует.

В рамках низкой шкалы нарушения симметрии поколений, доступной для проверки в экспериментах на ускорителях, с заметной вероятностью могут идти процессы с изменением аромата, такие как: **[MK; direction of arrows??]**

- $\mu \leftarrow e\alpha$ ;
- $\tau \leftarrow \mu\alpha$ ;
- $K \leftarrow \pi\alpha$ ;
- $B \leftarrow K(K^*)\alpha$ ;

$$- \mu \leftarrow \pi(\rho)\alpha;$$

Поиск архионных распадов мезонов, барионов, и обусловленных калибровочными горизонтальными бозонами эффектов FCNC в системах нейтральных K-, D- и B- мезонов дает возможность экспериментальной проверки модели горизонтального объединения. Особенностью изучения таких процессов является то, что их эффекты должны наблюдаться с вероятностью, определяемой соответствием космологической модели этим эффектам, так как последние вытекают из тех же физических что и рассматриваемая модель. Это подчеркивает важность применения методов экспериментальной космомикрфизики в исследовании модели горизонтального объединения [10]

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе была исследована модель горизонтального объединения и её реализация в области “низкой” шкалы нарушения симметрии. Эта модель, основанная на горизонтальной симметрии между поколениями фермионов, позволяет объяснять иерархию масс между кварк-лептонными поколениями, определяет механизмы инфляции и бариосинтеза, а также дает ряд претендентов на роль скрытой массы во Вселенной. Нарушение этой симметрии ведет к появлению архиона, обуславливающего существование нейтральных токов с изменением аромата (FCNC) и появлению майорановской массы нейтрино. В основе своей модель предполагает наличие «горизонтальной» симметрии между поколениями фермионов. Она позволяет объяснить иерархию масс между кварк-лептонными поколениями, определяет механизмы инфляции и бариосинтеза, а также дает ряд претендентов на роль скрытой массы во Вселенной. Стоит отметить, что ряд космологических ограничений при сопоставлении с экспериментальными данными не дают подтверждения МГО. Данная модель не полна - она не включает в себя теории суперсимметрии, великого объединения, темной материи и, следовательно, не может полностью описывать космологический сценарий и служить его физическим основанием, но она представляется лишь первым шагом к реалистическому единому описанию единого основания структуры макро - и микромира. Результаты экспериментов опровергают выводы модели в целом. Нет подтверждений 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.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Хлопов М.Ю. Основы космомикрoфизики. Изд. 2-е. — М.: Едиториал УРСС, 2011. — 368 с.
- [2] Чкареули Дж. К. (1980). Письма ЖЭТФ. 32, 684.
- [3] Бережигани З.Г., Сахаров А. С, Хлопов М. Ю. (1992). Ядерная физика. 55, 1918 Sov. J. Nucl. Phys. 55, 1063).
- [4] Z.G.Berezhiani and M.Yu.Khlopov "Theory of broken gauge symmetry of families" Ядерная физика (1990) V.51, PP.1157-1170.
- [5] Glashow S. L., Weinberg S. (1977). Phys. Rev. D15, 1958
- [6] Peccei R.D., Quinn H.R. (1977a). Phys. Rev. Lett. 38, 1440. 537.
- [7] Kofman L.A., Linde A. D. (1987). Nucl. Phys. B282, 555
- [8] Сахаров А. С., Хлопов М. Ю. (1993). Ядерная физика. 56, 220 [Sov. J. Nucl. Phys. 56, 412].
- [9] Belotsky K. M., Khlopov M. Yu., Sakharov A. S., Shklyaev A. A., Sudarikov A. L. (1998). Gravitation and Cosmology. 4, Suppl., 70.