

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

**Реферат**  
**по курсу**  
**«Введение в космофизику»**

**Суперсимметрия, локальное горизонтальное объединение и  
попытка решения проблемы ароматов**

Выполнил  
студент группы М21-115

\_\_\_\_\_ А. И. Дуров

Проверил  
преподаватель, к.ф.-м.н.

\_\_\_\_\_ М. Ю. Хлопов

Москва 2022

# Оглавление

|  |           |
|--|-----------|
| Введение . . . . .   | 2         |
| Подавление D-членных расщеплений в присутствии дополнительной $U(1)$ . . . . . | 4         |
| Реалистичная модель массы фермионов и иерархий смешивания .                    | 7         |
| Решение проблемы суперсимметричного аромата . . . . .                          | 9         |
| Заключение . . . . .   | 11        |
| <b>Список использованных источников</b>  | <b>13</b> |

# Введение

Одной из фундаментальных загадок стандартной модели является непонимание массы фермиона и иерархий смешивания. Многообещающим подходом к решению этой головоломки является использование горизонтальных симметрий, как глобальных, так и локальных, которые преобразуют фермионы одного поколения в другое. Тот факт, что в "пределе исчезающих связей Юкавы" стандартная модель обладает огромной  $SU(3)_L^q \times SU(3)_R^u \times SU(3)_R^d \times SU(3)_L^l \times SU(3)_R^e \times U(1)_{B-L}$  горизонтальной симметрией, делает этот подход вполне правдоподобным.

В данном реферате будут вестись рассуждения о локальной реализации горизонтальных симметрий. Локальные симметрии обладают определенными явными преимуществами по сравнению со своими глобальными аналогами. Наиболее существенным отличием, возможно, является сильное подозрение в том, что глобальные (но не локальные) симметрии подвержены явному частому нарушению из-за квантовых гравитационных эффектов.

Наличие суперсимметрии, по-видимому, накладывает дополнительные ограничения на модели с локальными горизонтальными симметриями [1]. Например, если выбрать общую простую неабелеву группу  $G$  как локальную горизонтальную симметрию, при наличии нарушения суперсимметрии,  $D$ -члены, связанные с  $G$ , будут вызывать незначительное расщепление между массами слептона и скварка разных поколений (примечание: слептоны и скварки - гипотетические суперсимметричные ("зеркальные") к лептонам и кваркам, соответственно, частицы). В свою очередь, они вызывают неприемлемое количество эффектов нейтрального тока, изменяющих аромат. Поскольку скварковые расщепления масс не зависят от горизонтальных калибровок и пока горизонтальная группа является простой, нет свободного параметра, который можно использовать для уменьшения этих разделений до приемлемого уровня. Это создает серьезное препятствие для использования локальных горизонтальных симметрий как способа понимания иерархии масс фермионов в суперсимметричном контексте.

Если бы  $D$ -членные скварковые расщепления масс (или слептоновые) отсутствовали (или если бы они были под контролем), локальные горизон-

тальные симметрии могли бы аккуратно решить проблему аромата SUSY (SUperSYmmetry), которая преследует общую мягко нарушаемую суперсимметричную стандартную модель. Такое решение было бы весьма желательно, особенно в таких сценариях, когда нарушение суперсимметрии передается в сектор MSSM (Minimal Supersymmetric Standard Model) через супергравитацию. Явным преимуществом является тот факт, что не нужно делать никаких специальных предположений о потенциале Келера (Kahler potential или суперпотенциал), кроме требования калибровочной инвариантности. В прошлом были предприняты два различных подхода, которые позволяют избежать вышеупомянутой трудности с D-членом: первое - предположение, что горизонтальная симметрия является глобальной, или второе - использование дискретной калибровочной симметрии. В обоих случаях нет связанных D-членов.

В этом реферате описывается решение "проблемы D-члена которое облегчило бы использование истинных калибровочных симметрий для одновременного решения проблемы массы фермиона и проблемы суперсимметричного аромата [2]. Показывается, что, присоединив локальную симметрию  $U(1)$  к существующей неабелевой горизонтальной симметрии  $G$ , можно взять под контроль массовые расщепления между различными поколениями скварков, вызванные D-членами. Разделение массы теперь будет квадратично зависеть от соотношения двух калибровочных выражений, которое может быть скорректировано таким образом, чтобы сделать эффекты FCNC (Flavor-Changing Neutral Current) достаточно малыми. Этот механизм будет проиллюстрирован на примере горизонтальной модели  $SU(2)_H \times U(1)_H$ . Затем будет описано построение полностью реалистичной модели, используя эту группу, и показано, как фактор  $U(1)$  может быть отождествлен с аномальной  $U(1)$ , возникающей при компактификации суперструн (примечание: компактификация - операция, которая преобразует топологические пространства в компактные). Эта модель вполне предсказуема в нейтринном, а также в кварковом и лептонном секторах. В частности, она поддерживает широкоугольные атмосферные и малоугловые солнечные нейтринные колебания. Модель может быть исключена, если редкий распад  $\mu \rightarrow e\gamma$  не наблюдается в текущем цикле экспериментов. Кроме то-

го, эта модель может быть легко объединена в группу  $SU(5)$  или  $SO(10)$ .

## Подавление D-членных расщеплений в присутствии дополнительной $U(1)$

Рассмотрим калибровочную группу теории как  $SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y \times G_H$ , где горизонтальная группа  $G_H$  выбрана как  $SU(2)_H \times U(1)_H$ , как было указано ранее. Выберем содержание вещества в модели таким же, как и в MSSM, с добавлением трех правых нейтрино (обозначаемых  $\nu_i^c$ ). Эти поля  $\nu_i^c$  необходимы для устранения "аномалии треугольника" и глобальной  $SU(2)_H$  аномалии. Непосредственным следствием этого является то, что левые нейтрино будут иметь небольшие массы, индуцируемые seesaw-механизмом. Горизонтальные квантовые числа выбраны в прямом предположении, что частицы первых двух поколений принадлежат к дублетам группы  $SU(2)_H$ , тогда как частицы третьего поколения находятся в синглетном представлении. Кроме того, мы вводим условие унифицируемости, которое означает, что все 16 членов поколения имеют одинаковые горизонтальные заряды. Таким образом, материальное содержание модели в стандартном трактовании таково:

$$\{Q_a, L_a, u_a^c, d_a^c, e_a^c, \nu_a^c\} : 2(-1) \quad (1)$$

$$\{Q_3, L_3, u_3^c, d_3^c, e_3^c, \nu_a^3\} : 1(0)$$

где показаны квантовые числа  $SU(2)_H \times U(1)_H$ . Здесь  $a = 1 - 2$  - это индекс  $SU(2)_H$ . Сектор Хиггса состоит из следующих полей:

$$\{H_u, H_d\} : 1(0); \phi_a : 2(1); \bar{\phi}_a : 2(-1); \chi : 1(1); \bar{\chi} : 1(-1); S_i : 1(0) (i = 1 - 2) \quad (2)$$

Здесь  $H_u, H_d$  являются обычными полями дублета MSSM, в то время как все остальные поля являются синглетами стандартной модели. Учитывая группу горизонтальной симметрии  $G$ , эта система Хиггса является минимальным выбором, который может правильно разбить  $G$  без нарушения суперсимметрии. Поля  $(\phi, \bar{\phi})$  разрывают  $SU(2)_H$  полностью, в то время как поля  $(\chi, \bar{\chi})$  разрывают  $U(1)_H$ . Поля  $S_i$  необходимы для того, чтобы раз-

решить кубические члены в суперпотенциале, что является требованием, если горизонтальная калибровочная симметрия должна быть нарушена в суперсимметричном пределе только перенормируемыми членами.

Продemonстрируем, как в этой модели возникает подавление расщепления массы D-члена между скварками разных поколений (и слептонами). В этой конкретной модели проблема касается  $SU(2)_H$  D-членов, которые потенциально могут разделить массы первых двух поколений. Обратите внимание, что  $U(1)_H$  D-член не вызовет массового расщепления в первых двух поколениях. Наиболее общий суперпотенциал, включающий поля Хиггса, имеет вид:

$$W = \mu_\phi \phi \bar{\phi} + \lambda \phi \bar{\phi} S_1 + W'(\chi \bar{\chi}, S_i) \quad (3)$$

где не понадобится явная форма фрагмента  $W'$ , включающего поля  $(\chi \bar{\chi}, S_i)$ . В суперсимметричном пределе мы имеем  $\langle \phi \rangle = \langle \bar{\phi} \rangle \equiv V_\phi$  и  $\langle \chi \rangle = \langle \bar{\chi} \rangle \equiv V_\chi$ . Можно сделать разумное предположение о том, что масштаб нарушения горизонтальной симметрии  $(V_\phi, V_\chi)$  намного больше, чем масштаб условий нарушения мягкой суперсимметрии,  $M_{SUSY}$ . Требование обращения в нуль F-членов в суперсимметричном пределе подразумевает  $F_\phi = (\mu_\phi + \lambda S_1) \bar{\phi}$  и  $F_S = \lambda \phi \bar{\phi} + \delta W'/\delta S = 0$ . Включая произвольное мягкое нарушение суперсимметрии, скалярный потенциал, включающий поля  $(\phi, \bar{\phi})$ , задается отдельным выражением. А минимизируя этот потенциал относительно полей  $\phi$  и  $\bar{\phi}$  и вычитая два условия экстремизации, мы приходим к соотношению:

$$(|\bar{\phi}|^2 - |\phi|^2) \left[ \frac{\lambda^*}{\phi \bar{\phi}} (\lambda \phi \bar{\phi} + \delta W'/\delta S) - \frac{1}{4} (g_{2H}^2 + 4g_{1H}^2) + B_\phi \mu_\phi + A_\phi \lambda S \right] = (m_\phi^2 - m_{\bar{\phi}}^2) \quad (4)$$

В итоге вклад в расщепление массы скварка (или слептона) от D-члена определяется следующим образом:

$$\Delta m_q^2 \cong \frac{g_{2H}^2}{g_{2H}^2 + 4g_{1H}^2} (m_\phi^2 - m_{\bar{\phi}}^2) \quad (5)$$

Стоит обратить внимание, что в отсутствие  $U(1)_H$ , группа H (т.е., ес-

ли  $g_{1H} = 0$ ),  $\delta m_{barq}^2 \simeq m_\phi^2 m_\phi^2$ , которая не зависит от калибровочной связи и является произвольной (т.е. любой между  $(100 GeV)^2 (1000 GeV)^2$ ). Хотя эти D-члены вносят вклад в диагональные массы скварков, поскольку они не универсальны, как только производится вращение Кабиббо на кварковых полях, они вносят вклад в процессы изменения аромата. Наиболее строгие ограничения возникают из-за смешивания  $K^0 - \bar{K}^0$  и редкого распада  $\mu \rightarrow e\gamma$ . Разница масс  $K_L - K_S$  устанавливает ограничение (из самого строгого оператора (LL)(RR))  $[\delta m_q^2/m_q^2]\theta_C \leq 1 \times 10^{-3} (m_q/500 GeV)$ , где  $m_q$  обозначает среднюю массу квадрата. Ограничение, возникающее из  $\mu \rightarrow e\gamma$ , аналогично. Очевидно, что если  $g_{1H} \rightarrow 0$ , расщепление D-члена будет грубо противоречить экспериментам, если массы квадратов будут ниже ТэВ. С другой стороны, при наличии дополнительного калибровочного выражения  $g_{1H}$  мы можем контролировать процессы FCNC на приемлемом уровне.

Для  $m_q \sim (300 - 500) GeV$  это вполне согласуется с экспериментами. Важно, что слагаемые массы, нарушающие мягкую суперсимметрию,  $m_\phi^2$  и  $m_{\bar{\phi}}^2$  не проходят ниже горизонтального масштаба (поскольку поля  $\phi$  и  $\bar{\phi}$  имеют массы порядка  $V_\phi$ ). С другой стороны, массы скварков действительно находятся ниже  $V_\phi$  и в этом процессе получают универсальный вклад аромата от gauginos (gaugino - это гипотетический фермионный квант суперсимметричного поля (т.е. - суперпартнер) калибровочного поля, предсказанный калибровочной теорией в сочетании с суперсимметрией). Для сопоставимых значений начальных (по шкале Планка) масс gaugino и скварка коэффициент  $m_\phi^2/m_q^2$  уменьшается примерно на  $\sim 1/10$ .

Несмотря на то, что мы использовали конкретный пример, чтобы проиллюстрировать предлагаемый механизм решения проблемы "D-члена его особенности преобладают в более общих контекстах. Например, мы могли бы использовать альтернативные суперпотенциалы, такие как  $W = \lambda S_1(\phi\bar{\phi}\mu^2) + W'$  или один, включающий неперенормируемые операторы. Проблема FCNC в отсутствие  $U(1)_H$  и ее решение через  $U(1)_H$  будут идентичны случаю, описанному выше.

# Реалистичная модель массы фермионов и иерархий смешивания

Теперь покажем, что модель, описанная в предыдущем разделе, может естественным образом объяснить массу фермиона и иерархию смешивания. Будем следовать той точке зрения, что в лагранжиане разрешены все операторы, согласующиеся с калибровочной инвариантностью. Это включает в себя неперенормируемые операторы, которые будут подавлены соответствующими обратными степенями планковской массы. Предполагается, что все коэффициенты таких операторов имеют порядок единицы.

Сначала рассмотрим кварковый сектор теории. Общий суперпотенциал, согласующийся с симметрией  $SU(2)_H \times U(1)_H$ , задается:

$$\begin{aligned} W_{Yuk} = & h_{33}^u Q_3 u_3^c H_u + h_{33}^d Q_3 d_3^c H_d + \frac{h_{23}^u}{M} \epsilon^{ab} Q_a u_3^c H_u \phi_b + \frac{h_{23}^d}{M} \epsilon^{ab} Q_a d_3^c H_d \phi_b + \\ & + \frac{h_{32}^u}{M} \epsilon^{ab} Q_3 u_a^c H_u \phi_b + \frac{h_{32}^d}{M} \epsilon^{ab} Q_3 d_a^c H_d \phi_b + \frac{h_{22}^u}{M^2} Q_a u_b^c H_u \phi_p \phi_q \epsilon^{ap} \epsilon^{bq} + \\ & + \frac{h_{22}^d}{M^2} Q_a d_b^c H_d \phi_p \phi_q \epsilon^{ap} \epsilon^{bq} + \frac{h_{12}^u}{M^2} \epsilon^{ab} Q_a u_b^c H_u \chi^2 + \frac{h_{12}^d}{M^2} \epsilon^{ab} Q_a d_b^c H_d \chi^2 \quad (6) \end{aligned}$$

Также можно получить следующую иерархическую матрицу масс как для верхнего, так и для нижнего секторов:

$$M_f = v_f \begin{pmatrix} 0 & h_{12}^f \epsilon_\chi^2 & 0 \\ -h_{12}^f \epsilon_\chi^2 & h_{22}^f \epsilon_\phi^2 & h_{23}^f \epsilon_\phi \\ 0 & h_{32}^f \epsilon_\phi & h_{33}^f \end{pmatrix} \quad (7)$$

с  $f = u, d$ . Матрица массы заряда лептона имеет идентичную форму, как и матрица массы нейтрино Дирака (если определить  $f = l, \nu$  для двух случаев).

Матрицы масс естественным образом объясняет иерархию масс фермиона и угла смешивания. Чтобы увидеть это в деталях, предположим, что все параметры  $h_{ij}$  имеют первый порядок. Массовые соотношения в секторе нижних кварков затем задаются формулой:



$$m_s/m_b \sim \epsilon_\phi^2, m_d/m_s \sim \epsilon_\chi^4 \epsilon_\phi^4 \quad (8)$$

с аналогичными результатами в секторах верхнего кварка и заряженного лептона. Если мы выберем  $\epsilon_\phi \cong 1/7$  и  $\epsilon_\chi \cong 1/20$ , все наблюдаемые массы и углы смешивания могут быть объяснены, при этом коэффициенты  $h_{ij}$  принимают значения в диапазоне  $(1/2 - 2)$ . Это огромное улучшение по сравнению со стандартными моделями Юкавы, которые охватывают примерно шесть порядков величины. В нашей системе, различия первого порядка, такие как в  $m_\mu/m_\tau$  и  $m_s/m_b$  (они отличаются примерно в 3 раза по шкале Планка), объясняются различиями первого порядка в соединениях  $h_{ij}$ . Иерархия  $m_b/m_t$  требует умеренных или больших значений  $tg\beta \sim 10 - 40$ .

Переходя теперь к лептонному сектору, как уже отмечалось, матрицы масс заряженного лептона и нейтрино Дирака имеют идентичные формы, как было показано в уравнении (7). Массовая матрица  $\nu_i^c$  Майораны получается из лагранжиана:

$$\begin{aligned} L^{\nu^c} = & f_{33}\nu_3^c\nu_3^c\Delta + \frac{f_{23}}{M}\epsilon^{ab}\nu_a^c\nu_b^c\Delta\phi_b + \frac{f_{22}}{M^2}\nu_a^c\nu_b^c\Delta\phi_p\phi_q\epsilon^{ap}\epsilon^{bq} + \\ & + \frac{f_{13}}{M^3}\epsilon^{ab}\nu_a^c\nu_b^c\Delta\bar{\phi}_b\chi^2 + \frac{f_{12}}{M^4}\nu_a^c\nu_b^c\Delta\bar{\phi}_p\bar{\phi}_q\epsilon^{ap}\epsilon^{bq}\chi^2 + \frac{f_{11}}{M^6}\nu_a^c\nu_b^c\phi_p\bar{\phi}_q\epsilon^{ap}\epsilon^{bq}\chi^4 \quad (9) \end{aligned}$$

На уровне стандартной модели для массы  $\nu_3^c$  Майораны будет допущен простой массовый член. Есть предположение, что это возникает из-за VEV (Vacuum expectation value) поля  $\delta$ , которое нарушает В - L симметрию. Когда модель встроена в лево-правую симметричную структуру или  $SO(10)$ , или если измеряется В-Л симметрия модели в ее нынешнем виде, майоровские массы полей  $\nu^c$  потребуют VEV для такого мультиплета [3].

Из-за сложности seesaw-диагонализации можно сохранить наименьшие не обращающиеся в нуль члены во всех элементах матрицы Майораны  $\nu^c$ , которая задается:

$$M_{\nu^c} = < \Delta > \begin{pmatrix} f_{11}\epsilon_\phi^2\epsilon_\chi^4 & f_{12}\epsilon_\phi^2\epsilon_\chi^2 & f_{13}\epsilon_\phi\epsilon_\chi^2 \\ f_{12}\epsilon_\phi^2\epsilon_\chi^2 & f_{22}\epsilon_\phi^2 & f_{23}\epsilon_\phi \\ f_{13}\epsilon_\phi\epsilon_\chi^2 & f_{23}\epsilon_\phi & f_{33} \end{pmatrix} \quad (10)$$

## Решение проблемы суперсимметричного аромата

Представленная здесь модель имеет встроенное решение проблемы суперсимметричного аромата. На самом деле, частью мотивации использовать горизонтальную симметрию и было, по сути, решением этой проблемы. Поскольку горизонтальная симметрия локальна, от квантовых гравитационных эффектов не ожидается явного нарушения. Как уже обсуждалось (см. разд. 2), усиливающая горизонтальную симметрию группа по коэффициенту  $U(1)$  уменьшает нарушение аромата, возникающее из-за горизонтальных  $SU(2)_H$  D-членов. Однако нарушение аромата в секторе скварков (и слептонов) будет вызвано, как только будут включены эффекты нарушения горизонтальной симметрии. Теперь покажем, что такие нарушения не являются чрезмерными и согласуются с существующими ограничениями FCNC.

Предполагаем, что нарушение суперсимметрии происходит в скрытом секторе и передается в сектор MSSM с помощью супергравитации. Однако не будем делать никаких специальных предположений о потенциале Келера (или суперпотенциале). В частности, мы не предполагаем, что скалярные массы универсальны или что трилинейные A-члены, нарушающие суперсимметрию, пропорциональны суперпотенциальным связям Юкавы. Мягкие скалярные массы возникают из общих потенциальных членов Келера. Для скварков первых двух поколений доминирующий вклад приходится на:

$$L = \int d^4\theta Q_a^\dagger Q_a \frac{z^* z}{M_{Planck}^2} \quad (11)$$

где  $z$  – поле скрытого сектора (спурион, примечание: это фиктивное вспомогательное поле в квантовой теории поля, которое может использо-

ваться для параметризации любого нарушения симметрии и определения всех операторов, инвариантных относительно симметрии) с ненулевой F-составляющей, нарушающей суперсимметрию. Идентифицируя  $F_z^2/M_{Plank}^2 = M_{SUSY}^2$ , мы видим, что доминирующие массы для первых двух поколений универсальны вследствие горизонтальной симметрии  $SU(2)_H$ . Неуниверсальные исправления будут вытекать из таких терминов, как

$$L = \int d^4\theta (Q_a^\dagger \phi_a)(\phi_b^\dagger Q_b) \frac{z^* z}{M_{Plank}^4} \quad (12)$$

и аналогичный член с заменой  $\phi$  на  $\bar{\phi}$ . По сравнению с доминирующим вкладом, эти неуниверсальные члены подавляются коэффициентом  $\epsilon_\phi^2 \sim 2 \times 10^{-2}$ . Поскольку эти поправки вносят вклад в диагональные записи в матрице массы скварков, любой эффект FCNC потребует дополнительного угла смешивания кварков ( $\sim \theta_C \sim \sqrt{\frac{m_d}{m_s}} \cong 0.2$ ). Кроме того, как отмечалось ранее, эти неуниверсальные поправки разбавляются примерно в 1/10 раза в секторе скварков за счет эффектов RGE, пропорциональных массе gaugino (главным образом - gluino). Удобно определить набор параметров  $\delta_{12}^d$  как отношение (1,2) элемента матрицы массы скварка к среднему квадрату массы скварка в базисе, где кварковые поля являются физическими. Затем мы оцениваем  $(\delta_{12}^d)_{LL,RR} \sim (2 \times 10^{-2}) \times (0.2) \times (0.1) = 4 \times 10^{-4}$ . Это следует сравнить с экспериментальным пределом для этой величины  $(\delta_{12}^d)_{LL,RR} \leq 1 \times 10^{-3}$ , действительным для средней массы квадрата 500 ГэВ. Здесь видное хорошее согласие с экспериментом.

Аналогичное рассуждение в секторе слептонов первых двух поколений приводит к прогнозу  $(\delta_{12}^l)_{LL,RR} \sim \epsilon_\phi^2 \theta_{e\mu} \sim (2 \times 10^{-2}) \times (0.07) \sim 1.4 \times 10^{-3}$ . Здесь мы приняли угол смешивания  $e - \mu$  равным  $\sqrt{m_e/m_\mu} \sim 0.07$ , что соответствует матрице масс. Обратите внимание, что в отличие от сектора скварков, нет значительного эффекта разбавления (поскольку слептоны нейтральны по цвету). Это число следует сравнить с ограничением из настоящего экспериментального предела для  $\mu \rightarrow e\gamma$ , которое соответствует  $(\delta_{12}^l)_{LL,RR} \leq (4.0 \times 10^{-3} - 1.8 \times 10^{-2})$   $m \sim 100$  ГэВ и для  $x \equiv m_{\tilde{\gamma}}^2/m_{\tilde{l}}^2$  в диапазоне 0,3 – 3. Хотя ограничение выполнено, вероятность для  $\mu \rightarrow e\gamma$  не может быть намного ниже текущего экспериментального предела. По

оценкам, этот показатель не более чем в 100 раз ниже нынешнего предела, который вскоре будет протестирован.

Касаемо суперсимметрии, нарушающей трилинейные  $A$ -члены, они возникают в моделях супергравитации из суперпотенциальных терминов, таких как:

$$L = \int d^2\theta Q_3 d_3^c H_d \frac{z}{M_{Planck}} \quad (13)$$

Результирующие коэффициенты трехлинейных скалярных членов имеют порядок  $M_{SUSY}$ . Горизонтальная калибровочная инвариантность подразумевает, что в нашей модели структура  $A$ -членов идентична структуре суперпотенциала. Однако коэффициенты матрицы  $A$  не пропорциональны матрице Юкавы. Результирующие коэффициенты трехлинейных скалярных членов этой непропорциональности приведут к процессам FCNC. Мы оцениваем параметр  $(\delta_{12}^d)_{LR} \sim \epsilon_\chi^2 A v_d / m_q^2$ . Выбирая  $m_q = 500 \text{ GeV}$  и при  $\beta = 30$  мы получаем  $(\delta_{12}^d)_{LR} \cong 3 \times 10^{-5}$ , что значительно ниже экспериментального предела для этого количества, возникающего в результате смешивания  $K^0 - \bar{K}^0$ . Аналогичная оценка будет справедлива для лептонного  $(\delta_{12}^l)_{LR,RL}$ . Для масс слептона в 500 ГэВ ограничение от  $\mu \rightarrow e\gamma$  равно  $(\delta_{12}^l)_{LR,RL} \leq 2 \times 10^{-5}$ . Видно, что ограничение довольно жесткое. Учитывая неизвестные коэффициенты первого порядка (или некоторую пропорциональность членов  $A$ ), можно прийти к выводу, что  $\mu \rightarrow e\gamma$  не может быть намного ниже текущего экспериментального предела. Поскольку коэффициенты  $\tilde{\mu}_L \tilde{e}_R$  и  $\tilde{\mu}_R \tilde{e}_L$  приблизительно одинаковы, мы ожидаем, что мюоны обеих спиральностей будут участвовать в распаде, в отличие от эффектов великого объединения, где распад  $\mu_L \rightarrow e_R \gamma$  подавляется. Скорость распада  $\tau \rightarrow \mu \gamma$  оценивается на два порядка величины ниже нынешних пределов.

## Заключение

В качестве заключения можно сказать, что был описан способ избежать чрезмерных эффектов FCNC, вызванных  $D$ -членным разделением массы между скварками и слептонами разных поколений в моделях с локальными горизонтальными симметриями. Была построена модель без аномалий

с  $SU(2)_H \times U(1)_H$  в качестве локальной группы горизонтальной симметрии и показано, что это может привести к правильному пониманию наблюдаемых иерархий среди масс кварков и лептонов и их смешений. Также было показано, что модель обеспечивает одновременное решение проблемы суперсимметричного аромата. Без каких-либо дополнительных допущений эта модель также приводит к желаемой картине масс нейтрино и смешиваний; она поддерживает колебания под малым углом для солнечных осцилляций и осцилляций под большим углом для атмосферных нейтрино. Хотя нарушение аромата в модели находится "под контролем оно не является ненаблюдаемым. Прогнозируется, что редкий распад  $\mu \rightarrow e\gamma$  будет близок к текущему экспериментальному пределу.

# Список литературы

1. LOW ENERGY SUPERSYMMETRY PHENOMENOLOGY / H. Baer [и др.] // Physical Review Letters. — 1995. — Март.
2. *Babu K., Barr S.* Gauged  $SO(3)$  family symmetry and squark mass degeneracy // Physics Letters B. — 1996. — Окт. — Т. 387, № 1. — С. 87—98.
3. *Babu K. S., Mohapatra R. N.* Supersymmetry, Local Horizontal Unification, and a Solution to the Flavor Puzzle // Physical Review Letters. — 1999. — Сент. — Т. 83, № 13. — С. 2522—2525.