

Обзор теоретических возможностей введения ненулевых нейтринных масс

A review of the theoretical possibilities of introducing nonzero
neutrino masses

Малков Кирилл

МГУ, 2018

Научный руководитель – Иванов Игорь Пьерович

Проблематика

Существование нейтрино было предположено Паули в первой половине 20-ого века, чтобы объяснить непрерывность спектра в β -распаде, но до сих пор так и не удалось получить точное значение масс нейтрино.

До 1970-х считалось теоретически невозможным существование ненулевых масс нейтрино, так как в минимальной СМ постулировалось, что левый лептоны образуют двумерное пространство (дублет):

$$\psi_L = \begin{pmatrix} e_L \\ \nu_L \end{pmatrix}$$

В то время как правые образуют синглет, так как постулируется, что правые есть только электроны e_R , а следовательно, записав лагранжиан взаимодействия между левым, правым и хиггсовским полем и подставив массовое вакуумное среднее

$$\langle \phi_a \rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ v \end{pmatrix}, \text{ вместо } \phi_a = \begin{pmatrix} \phi^+(x) \\ \phi_0(x) \end{pmatrix}$$

$$\mathcal{L}_Y = y [(\overline{\psi}_L)_a e_R \phi_a + \bar{e}_L \phi^\dagger (\overline{\psi}_L)]$$

↓

$$\mathcal{L}_Y = yv(e_R \bar{e}_L + \bar{e}_R e_L) = m_e e \bar{e}$$

Дираковские масс нейтрино Вариант №1

Простейшая попытка описать массы нейтрино – добавить ν_R и построить аналог вышеупомянутого массового слагаемого, используя тот же хиггсовский механизм. Такие нейтрино называются “стерильными”, так как они не чувствуют никаких калибровочных взаимодействий. По этой причине существование этого нейтрино подтвердить экспериментально пока не представилось возможности.

$$\mathcal{L}_D = y_D [(\overline{\psi}_L)_a \nu_R \widetilde{\phi}_a + \overline{\nu}_R \widetilde{\phi}^\dagger (\overline{\psi}_L)]$$

↓

$$\widetilde{\phi}_a = \begin{pmatrix} (\phi^0)^* \\ -(\phi^+)^* \end{pmatrix}, \langle \widetilde{\phi}_a \rangle = \begin{pmatrix} v \\ 0 \end{pmatrix}$$

↓

$$\mathcal{L}_D = y_D v (\nu_R \overline{\nu}_L + \overline{\nu}_R \nu_L) = m_\nu \nu \bar{\nu}$$

Дираковские масс нейтрино Вариант №2

Расширить СМ и сказать, что хиггсовских дублетов в природе существует не один, а два (или больше), у которых также есть заряженные и нейтральные компоненты. Это вполне разрешено теорией и экспериментом. Тогда может оказаться, что правые нейтрино взаимодействуют с левыми так же, как было показано выше, но зависят уже не только от очень малой константы y_D , но и от вакуумного среднего $\langle \phi_2^0 \rangle$. Записав потенциал взаимодействия, мы можем подобрать все коэф. так, чтобы минимум получался при очень маленьком ν_2 . И тогда маленькие массы нейтрино получается естественным образом при умеренных числах y_D .

$$V = -\mu_1^2 |\phi_1|^2 - \mu_2^2 |\phi_2|^2 + \lambda_1 |\phi_1|^4 + \lambda_2 |\phi_2|^4 + \lambda_3 |\phi_1|^2 |\phi_2|^2 + \lambda_4 |\phi_1^\dagger \phi_2|^2$$

Нейтрино Дирака и нейтрино Майорана

Для нейтрино Дирка справедливо $\nu = \nu_L + \nu_R$

Применив операцию зарядового сопряжения получим:

$$(\nu)^C = (\nu_L)^C + (\nu_R)^C \neq \nu$$

Но также справедливо $\nu = \nu_L + (\nu_L)^C = (\nu_L)^C + \nu_L = (\nu)^C$

Так мы получили нейтрино Майорана. Причем хотя и оба варианта математически разрешены, но какая из двух возможностей отвечает реальным нейтрино в нашем мире до сих пор неясно.

Майрановские массы нейтрино Вариант №3

Все расчёты выше были проведены с идеей того, что нейтрино истинно нейтральная частица, но в СМ нейтрино имеет ненулевой гиперзаряд и активно участвует в электрослабом взаимодействии, поэтому просто записать майрановское слагаемое не представляется возможным. Зато можно скомпенсировать электрические заряды, свернув лептонный дублет с хиггсовским.

Оператор Вайнберга

$$\mathcal{L}_W = \frac{1}{\Lambda} [(\overline{\psi_L} \tilde{\phi})(\tilde{\phi}^T (\psi_L)^c) + (\overline{(\psi_L)^c} \tilde{\phi}^*)(\tilde{\phi}^\dagger \psi_L)]$$

Механизм seesaw

Проблема с оператором Вайнберга в том, что такая комбинация нейтрино в хиггсов имеет слишком большую размерность в энергетических единицах – 5, из-за чего мы должны поставить в знаменатель коэф. размерностью массы. Но из-за этого вероятности всех процессов, вызванных оператором, будут расти с ростом энергии $\sim (E/\Lambda)^2$, а значит при $E \gg \Lambda$ вероятность будет больше единицы, что математически бессмысленно. Тогда для больших энергий подключается механизм seesaw.

Механизм seesaw

Постулируется, что нейтрино майорановское, но в лагранжиан одновременно включаются дираковские и майорановские слагаемые и что масса $\nu_L - M$ очень большая.

Дираковское слагаемое: $\frac{1}{2} m [\overline{\nu_L} \nu_R + \overline{(\nu_L)^c} (\nu_R)^c + h.c.]$

Майорановское слагаемое: $\frac{1}{2} M [\overline{(\nu_R)^c} \nu_R + h.c.]$

Объединив получим: $\frac{1}{2} \overline{((\nu_L)^c, \nu_R)^c} \mathcal{M} \begin{pmatrix} (\nu_L)^c \\ \nu_R \end{pmatrix}, \mathcal{M} = \begin{pmatrix} 0 & m \\ m & M \end{pmatrix}$

Список литературы

- Л.Б. Окунь. Физика элементарных частиц (2-е, 1988)
- Y. Grossman. TASI 2002 lectures on neutrinos (2003)
- В. А. Бедняков, Д. В. Наумов, О. Ю. Смирнов. Физика нейтрино и ОИЯИ(2016)
- S.Dawson. Introduction to Electroweak Symmetry Breaking(1999)
- G. Gelmini, E. Roulet Neutrino Masses(1994)