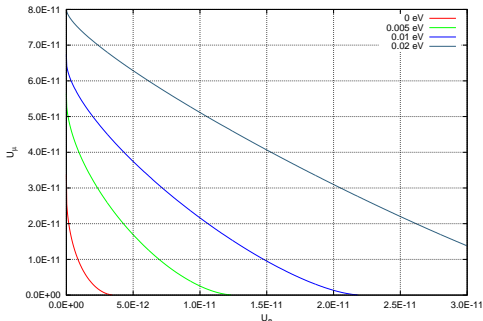


МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА
ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Кафедра физики частиц и космологии

Численная оценка минимальных углов
смешивания между активными и стерильными
нейтрино



Научный руководитель
Горбунов Д. С.

Выполнил
студент 4 курса гр. 443
Краснов И. В.



Введение

Модель

Актуальность

Цели работы

Аналитическая
часть работы

Численная
часть работы

Выводы

Осцилляции нейтрино очевидно указывают на неполноту Стандартной Модели физики частиц (СМ). Одними из наиболее активно развиваемых направлений расширения СМ являются модели со стерильными нейтрино. В лагранжиан включаются три новых майрановских фермиона N_l , $l = 1, 2, 3$, не заряженных по калибровочной группе СМ, $SU(3)_c \times SU(2)_W \times U(1)_Y$ (отсюда и прилагательное стерильные). Эти фермионы смешиваются с нейтрино СМ (“активными” нейтрино), что дает последним массу и смешивание между нейтрино разных типов.



Введение

Модель

Актуальность

Цели работы

Аналитическая
часть работы

Численная
часть работы

Выводы

Добавка стерильных нейтрино приводит к тому, что к обычному лагранжиану SM можно добавить взаимодействие вида:

$$\mathcal{L} = i\bar{N}_I \gamma^\mu \partial_\mu N_I - \frac{1}{2} M_I \bar{N}_I^c N_I - Y_{\alpha I} \bar{L}_\alpha \tilde{H} N_I + h.c., \quad (1)$$

где M_I это Майрановские массы, а $Y_{\alpha I}$ это матрица юкавского взаимодействия с лептонными дублетами L_α , $\alpha = e, \mu, \tau$ и Хиггсовским дублетом SM ($\tilde{H}_a = \epsilon_{ab} H_b^*$).



Введение

Модель

Актуальность

Цели работы

Аналитическая
часть работы

Численная
часть работы

Выводы

Пусть поле Хиггса принимает вакуумное значение $v = 246 \text{ ГэВ}$. Тогда взаимодействие Юкавы в (1) принимает вид смешивания между стерильными N_I и активными ν_α нейтрино. Тем самым массовая матрица активных нейтрино не имеет диагонального вида. Ее диагонализация дает массовые состояния m_i , по которым разлагается состояние флейворных нейтрино, что и приводит к явлению осцилляций нейтрино.

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = U_{PMNS}^\dagger \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix} \quad (2)$$



Введение

Модель

Актуальность

Цели работы

Аналитическая
часть работы

Численная
часть работы

Выводы

Плюсы теории:

- Перенормируема.
- Значениями модельных параметров возможно распорядиться так, чтобы объяснить не только нейтринные осцилляции, но и барионную асимметрию Вселенной через механизм лептогенезиса в первичной плазме.
- В некоторой области модельных параметров легчайшее из трех стерильных нейтрино может претендовать на роль частицы темной материи.
- Помимо этого, с помощью механизма “качели” (I типа) элегантно объясняется факт малости значений масс нейтрино по сравнению с другими частицами СМ.
- Отдельное внимание уделяется моделям, где некоторые из стерильных нейтрино имеют массу порядка 1 ГэВ, так как в этом случае они должны рождаться в распадах тяжелых адронов, что напрямую должно регистрироваться в экспериментах.



Введение

Модель

Актуальность

Цели работы

Аналитическая
часть работы

Численная
часть работы

Выводы

Данная работа направлена на расчет минимальных возможных значений смешивания между стерильными и активными нейтрино, разрешенных механизмом “качели” I типа для случая нескольких нейтрино массы порядка 1 ГэВ. Значение смешивания необходимо для расчета чувствительности будущих экспериментов, направленных на исследование всей области значений модельных параметров, разрешенных механизмом “качели” I типа для нейтрино интересующих нас масс.



Введение

Модель

Актуальность

Цели работы

**Аналитическая
часть работы**

Численная
часть работы

Выводы

Юкавское взаимодействие удобно представить в виде
([arXiv:hep-ph/0103065v2](https://arxiv.org/abs/hep-ph/0103065v2)):

$$Y \equiv \frac{i\sqrt{2}}{v} \sqrt{M_R} R \sqrt{m_\nu} U_{PMNS}^\dagger, \quad (3)$$

где $M_R \equiv \text{diag}\{M_1, M_2, M_3\}$, $m_\nu \equiv \text{diag}\{m_1, m_2, m_3\}$, $R^T R = 1$.
 R может быть параметризовано в виде:

$$R = \text{diag}\{\pm 1, \pm 1, \pm 1\} \times \begin{pmatrix} c_2 c_1 & c_2 s_1 & s_2 \\ -c_3 s_1 - s_3 s_2 c_1 & c_3 c_1 - s_3 s_2 s_1 & s_3 c_2 \\ s_3 s_1 - c_3 s_2 c_1 & -s_3 c_1 - c_3 s_2 s_1 & c_3 c_2 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

где $c_i = \cos z_i$, $s_i = \sin z_i$, а z_i – три комплексных угла, параметры модели.



Введение

Модель

Актуальность

Цели работы

Аналитическая
часть работы

Численная
часть работы

Выводы

В таком случае матрица смешивания стерильных и активных нейтрино может быть представлена в виде:

$$U = \frac{v}{\sqrt{2}} M_R^{-1} Y = i M_R^{-\frac{1}{2}} R m_{\nu}^{\frac{1}{2}} U_{PMNS}^{\dagger} \quad (5)$$

и зависит от как от параметров от трех комплексных углов z_i и трех, пока неизвестных CP -нарушающих фаз матрицы U_{PMNS} .

Уровень предполагаемого сигнала, вызванного, например, распадами стерильного нейтрино, определяется значениями элементов матрицы $|U_{I\alpha}|^2$, $I = 1, 2, 3$; $\alpha = e, \mu, \tau$.

Для разных соотношений масс стерильных нейтрино наибольшее смешивание получают различные комбинации стерильных и активных нейтрино. Рассмотрим их отдельно.



Введение

Модель

Актуальность

Цели работы

Аналитическая
часть работы

Численная
часть работы

Выводы

Полагая массы $M_1 > 2\text{ГэВ}$, $M_2 > 2\text{ГэВ}$, $M_3 < 2\text{ГэВ}$ мы получаем ситуацию, в которой интересными для экспериментаторов являются значения $|U_{3e}|$ и $|U_{3\mu}|$. Однако эти значения могут равняться нулю, если N_3 смешивается только с ν_τ , или же не смешивается с активными нейтрино вовсе в случае безмассового легчайшего нейтрино.

Нетривиальной является ситуация, когда $M_1 < 2\text{ГэВ}$, $M_2 < 2\text{ГэВ}$, $M_3 > 2\text{ГэВ}$. В данном случае наблюдаемыми становятся величины смешивания N_1 и N_2 с ν_e и ν_μ :

$$\begin{aligned} U_e &\equiv |U_{1e}|^2 + |U_{2e}|^2 \\ U_\mu &\equiv |U_{1\mu}|^2 + |U_{2\mu}|^2 \end{aligned} \quad (6)$$

В данной работе исследовались кривые минимальных возможных значений этих величин и их зависимость друг от друга.

Случай всех трех масс меньших, чем 2 ГэВ мало интересен, так как, воспользовавшись унитарностью матрицы U , его возможно решить аналитически.



Численная часть работы

Введение

Модель

Актуальность

Цели работы

Аналитическая
часть работы

Численная
часть работы

Выводы

Для начала, положив все CP -нарушающие фазы нулю, при фиксированных значениях U_e искалось минимальное возможное значение U_μ .

Эти графики должны повторять те, что были указаны в статье ([arXiv:1312.2887 \[hep-ph\]](https://arxiv.org/abs/1312.2887)), однако различия между ними составляют до 10% значений функций, что требовало своего объяснения.

Обсуждения с авторами привели к выводу, что заявленные в статье значения экспериментальных данных отличались от тех, что были использованы при построении графиков.



Численная часть работы

Введение

Модель

Актуальность

Цели работы

Аналитическая
часть работы

Численная
часть работы

Выводы

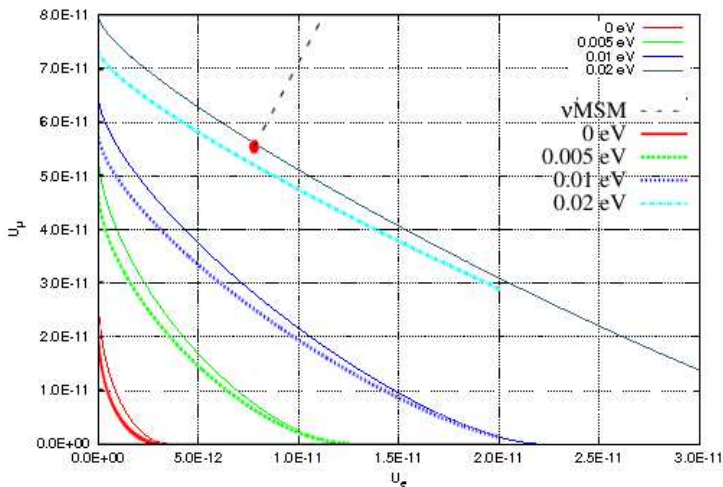


Рис.: Минимальные значения углов смешивания для $M_1 = M_2 = 500$ МэВ и нормальной иерархии масс активных нейтрино. Различные линии соответствуют различным значениям массы легчайшего из активных нейтрино $m_{lightest}$. Для сравнения на график наложены линии



Численная часть работы

Введение

Модель

Актуальность

Цели работы

Аналитическая
часть работы

Численная
часть работы

Выводы

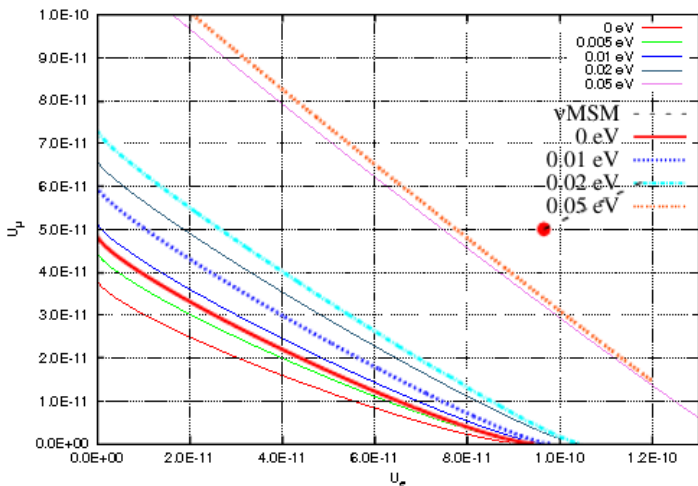


Рис.: Минимальные значения углов смешивания для $M_1 = M_2 = 500$ МэВ и инверсной иерархии масс активных нейтрино. Различные линии соответствуют различным значениям массы легчайшего из активных нейтрино $m_{lightest}$. Для сравнения на график наложены линии из [?].



Численная часть работы

Построенные с данными значениями параметров кривые совпадают с предоставленными в статье.

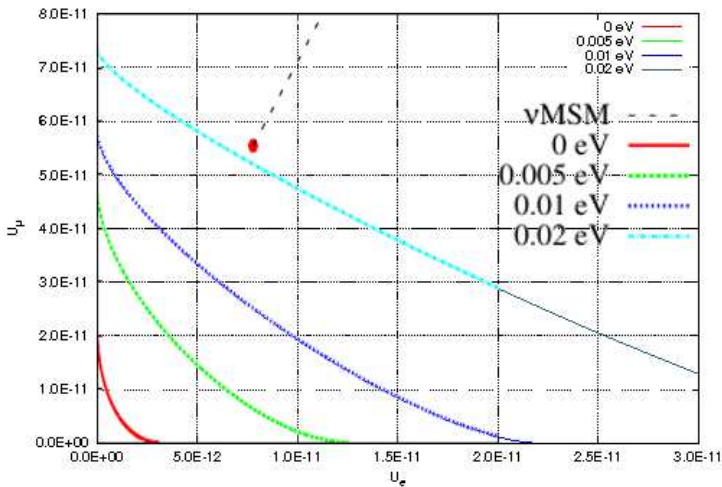


Рис.: Минимальные значения углов смешивания для $M_1 = M_2 = 500$ МэВ и нормальной иерархии масс активных нейтрино. Различные



Введение

Модель

Актуальность

Цели работы

Аналитическая
часть работы

Численная
часть работы

Выводы

Дальнейшим развитием было “отпускание” CP-нарушающих фаз. Для наглядности предоставлены графики для различных фиксированных значений δ . Сканировалась фаза α_1 , для ускорения расчетов для начала фаза α_2 полагалась равной 0. Из формулы (5) видно, что в случае $m_{lightest} = 0$ зависимость матрицы U от α_1 пропадает, что также отражается и на графиках. Кроме того, среди всех значений δ наименьшие углы смешивания достигаются при $\delta = 0$. Для невырожденного случая варьирование CP-нарушающих фаз позволяет значительно понизить минимальные углы смешивания. включение фазы α_2 также занижает значения минимальных углов смешивания.

- Введение
- Модель
- Актуальность
- Цели работы
- Аналитическая часть работы
- Численная часть работы**
- Выводы

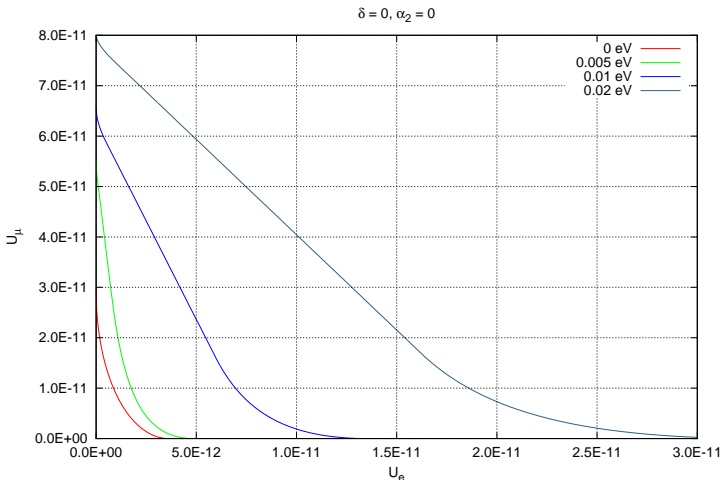


Рис.: Минимальные значения углов смешивания для $M_1 = M_2 = 500$ МэВ и нормальной иерархии масс активных нейтрино. Различные линии соответствуют различным значениям массы легчайшего из активных нейтрино $m_{lightest}$. Фиксированы фазы $\delta = 0, \alpha_2 = 0$.

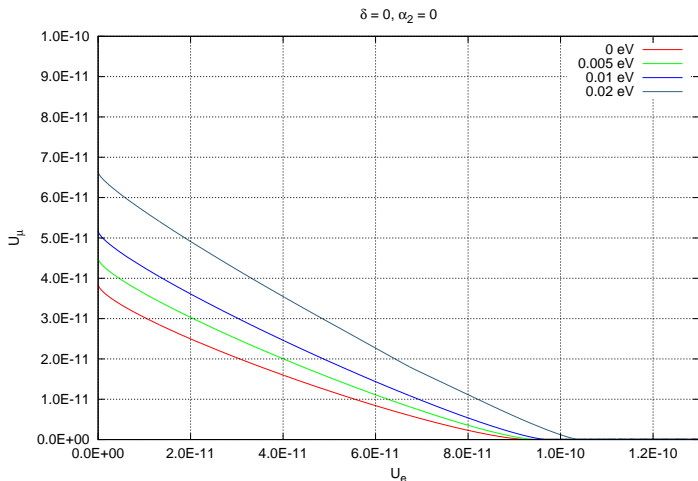


Рис.: Минимальные значения углов смешивания для $M_1 = M_2 = 500$ МэВ и инверсной иерархии масс активных нейтрино. Различные линии соответствуют различным значениям массы легчайшего из активных нейтрино $m_{lightest}$. Фиксированы фазы $\delta = 0, \alpha_2 = 0$.

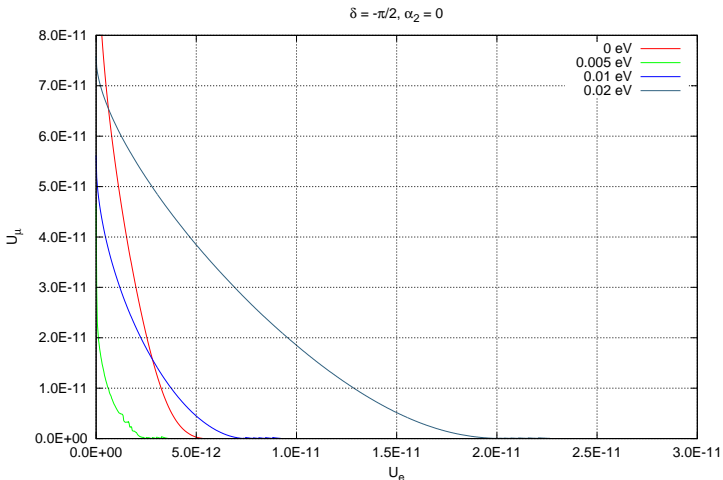


Рис.: Минимальные значения углов смешивания для $M_1 = M_2 = 500$ МэВ и нормальной иерархии масс активных нейтрино. Различные линии соответствуют различным значениям массы легчайшего из активных нейтрино $m_{lightest}$. Фиксированы фазы $\delta = -\frac{\pi}{2}, \alpha_2 = 0$.

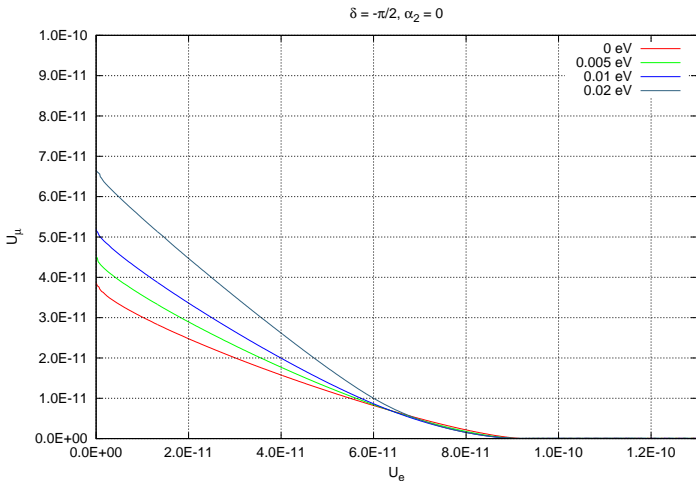


Рис.: Минимальные значения углов смешивания для $M_1 = M_2 = 500$ МэВ и инверсной иерархии масс активных нейтрино. Различные линии соответствуют различным значениям массы легчайшего из активных нейтрино $m_{lightest}$. Фиксированы фазы $\delta = -\frac{\pi}{2}, \alpha_2 = 0$.

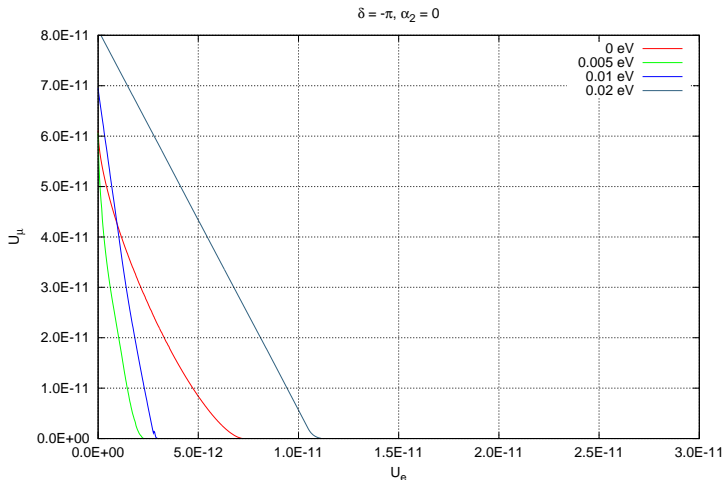


Рис.: Минимальные значения углов смешивания для $M_1 = M_2 = 500$ МэВ и нормальной иерархии масс активных нейтрино. Различные линии соответствуют различным значениям массы легчайшего из активных нейтрино $m_{lightest}$. Фиксированы фазы $\delta = -\pi, \alpha_2 = 0$.

- Введение
- Модель
- Актуальность
- Цели работы
- Аналитическая часть работы
- Численная часть работы**
- Выводы

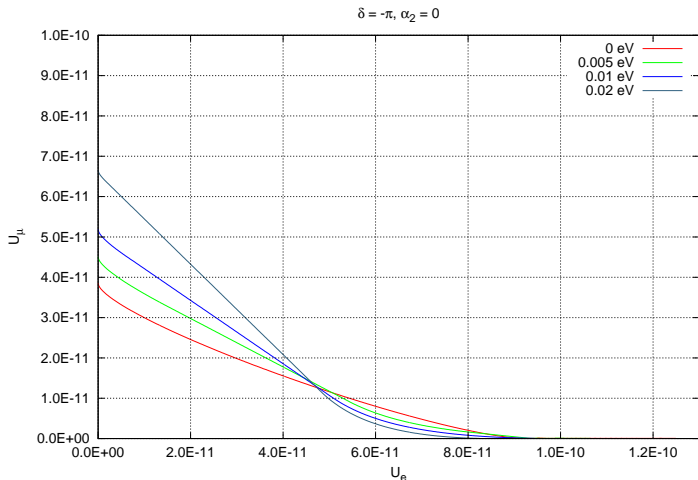


Рис.: Минимальные значения углов смешивания для $M_1 = M_2 = 500$ МэВ и инверсной иерархии масс активных нейтрино. Различные линии соответствуют различным значениям массы легчайшего из активных нейтрино $m_{lightest}$. Фиксированы фазы $\delta = -\pi, \alpha_2 = 0$.

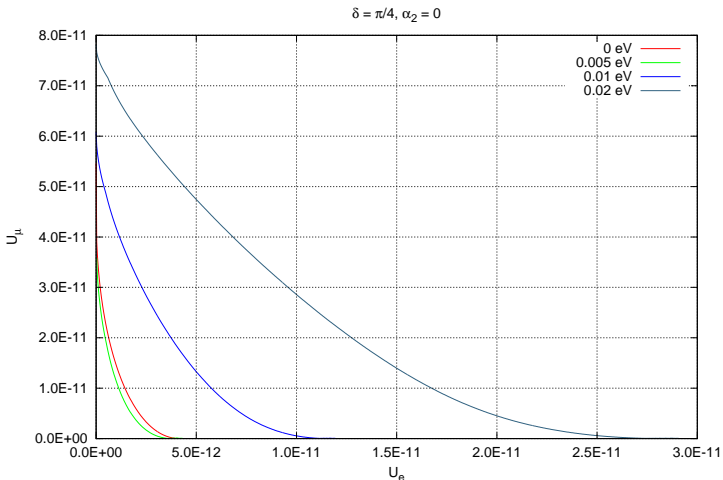


Рис.: Минимальные значения углов смешивания для $M_1 = M_2 = 500$ МэВ и нормальной иерархии масс активных нейтрино. Различные линии соответствуют различным значениям массы легчайшего из активных нейтрино $m_{lightest}$. Фиксированы фазы $\delta = \frac{\pi}{4}, \alpha_2 = 0$.

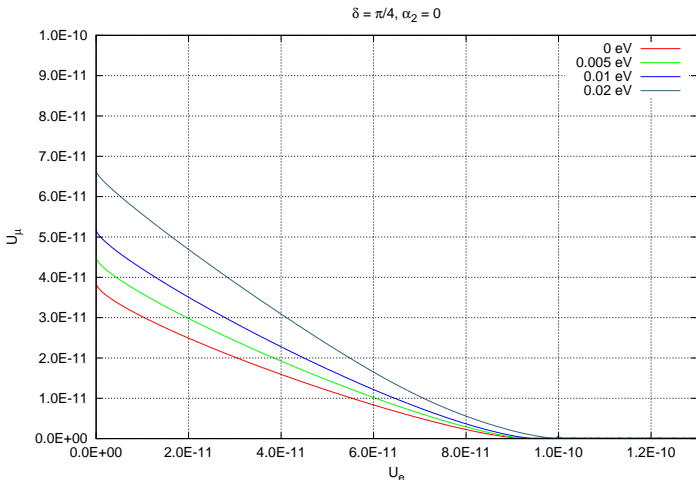


Рис.: Минимальные значения углов смешивания для $M_1 = M_2 = 500$ МэВ и инверсной иерархии масс активных нейтрино. Различные линии соответствуют различным значениям массы легчайшего из активных нейтрино m_{lightest} . Фиксированы фазы $\delta = \frac{\pi}{4}, \alpha_2 = 0$.

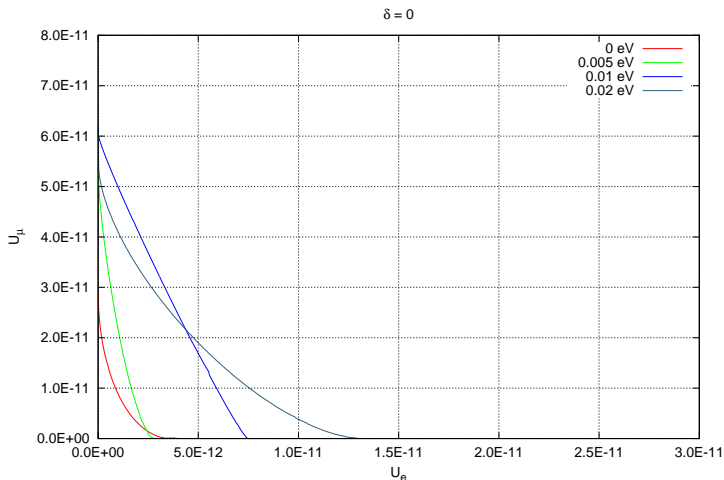


Рис.: Минимальные значения углов смешивания для $M_1 = M_2 = 500$ МэВ и нормальной иерархии масс активных нейтрино. Различные линии соответствуют различным значениям массы легчайшего из активных нейтрино $m_{lightest}$. Фиксирована фаза $\delta = 0$.

- Введение
- Модель
- Актуальность
- Цели работы
- Аналитическая часть работы
- Численная часть работы**
- Выводы

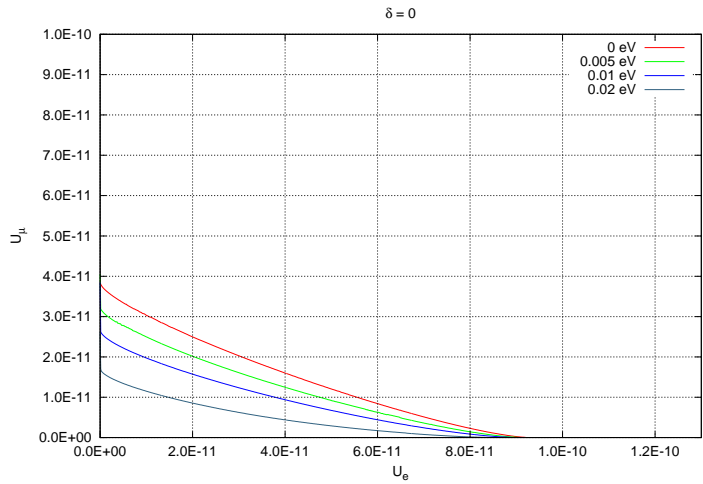


Рис.: Минимальные значения углов смешивания для $M_1 = M_2 = 500$ МэВ и инверсной иерархии масс активных нейтрино. Различные линии соответствуют различным значениям массы легчайшего из активных нейтрино $m_{lightest}$. Фиксирована фаза $\delta = 0$.



Введение

Модель

Актуальность

Цели работы

Аналитическая
часть работы

Численная
часть работы

Выводы

- Была написана программа для получения минимальных значений смешивания двух стерильных нейтрино с активными нейтрино.
- Результаты для нулевых фаз совпали с результатами, полученными ранее ([arXiv:1312.2887](https://arxiv.org/abs/1312.2887)).
- Код программы позволяет изучить зависимость смешивания от CP - нарушающих фаз.