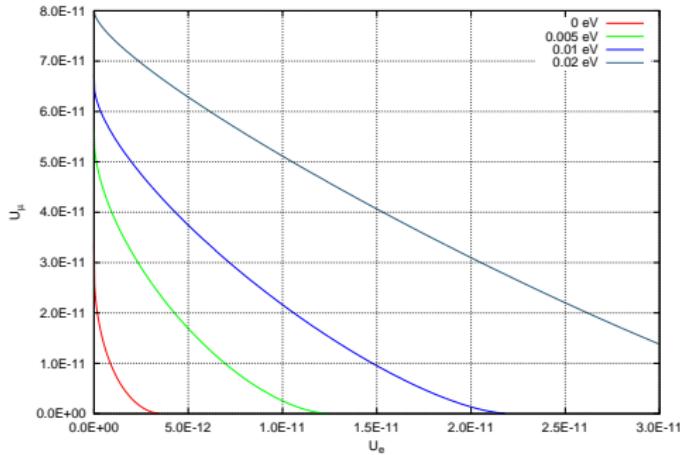


МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени М.В. ЛОМОНОСОВА  
ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

## Кафедра физики частиц и космологии

# Численная оценка минимальных углов смешивания между активными и стерильными нейтрино

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



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  $N_I$ ,  $I = 1, 2, 3$ , 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

Выходы

Добавка стерильных нейтрино приводит к тому, что к обычному лагранжиану СМ 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  $L_\alpha, \alpha = e, \mu, \tau$  и Хиггсовским дублетом СМ ( $\tilde{H}_a = \epsilon_{ab} H_b^*$ ).



Введение

Модель

Актуальность

Цели работы

Аналитическая  
часть работы

Численная  
часть работы

Выходы

Пусть поле Хиггса принимает вакуумное значение  $v = 246\text{ГэВ}$ . Тогда взаимодействие Юкавы в (1) принимает вид смещивания между стерильными  $N_l$  и активными  $\nu_\alpha$  нейтрино.

Тем самым массовая матрица активных нейтрино не имеет диагонального вида. Ее диагонализация дает массовые состояния  $m_i$ , по которым разлагается состояние флэйворных нейтрино, что и приводит к явлению осцилляций нейтрино.

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



## Плюсы теории:

- Перенормируема.
- Значениями модельных параметров возможно распорядиться так, чтобы объяснить не только нейтриноные 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) элегантное объяснение получает 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.



# Поиск стерильных нейтрино

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.



Юкавское взаимодействие удобно представить в виде  
(arXiv: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.



В таком случае матрица смещивания 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 смещивание получают различные комбинации стерильных и активных нейтрино. Рассмотрим их отдельно.



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  $\nu_\tau$ , 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  $\nu_e$  и  $\nu_\mu$ :

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

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.



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  $U_\mu$ .

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  
Выходы

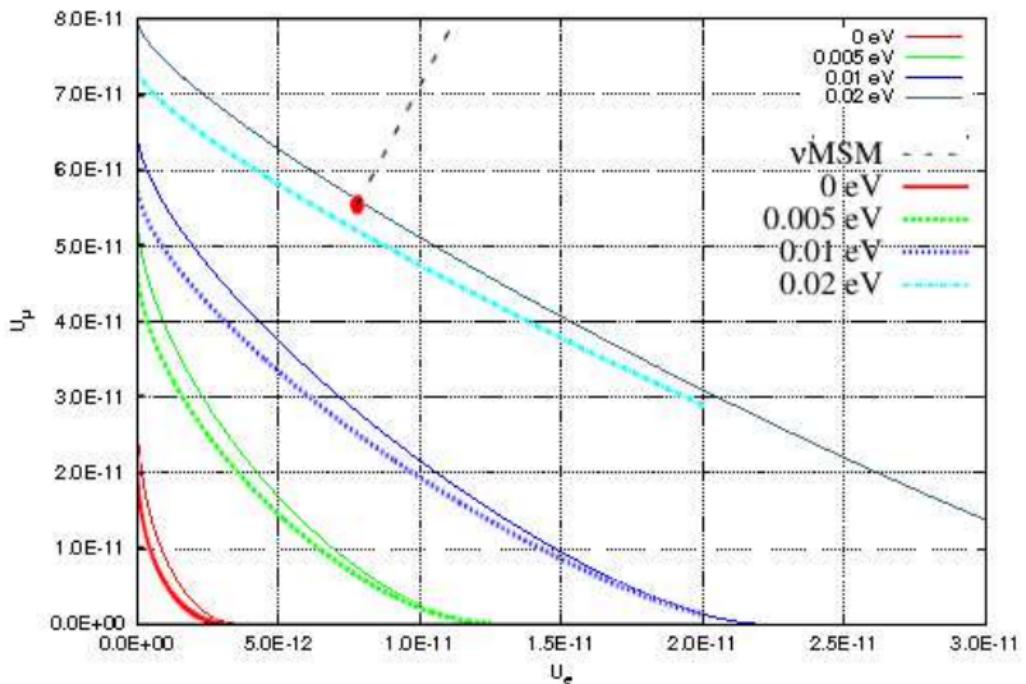


Рис.: Минимальные значения углов смещивания для  $M_1 = M_2 = 500$  МэВ и нормальной иерархии масс активных нейтрино. Различные линии соответствуют различным значениям массы легчайшего из активных нейтрино  $m_{lightest}$ . Для сравнения на график наложены линии  $\delta^2 = 1$  (vMSM) и  $\delta^2 = 0$  (0 eV).



# Численная часть работы

Введение  
Модель  
Актуальность  
Цели работы  
Аналитическая часть работы  
Численная часть работы  
Выходы

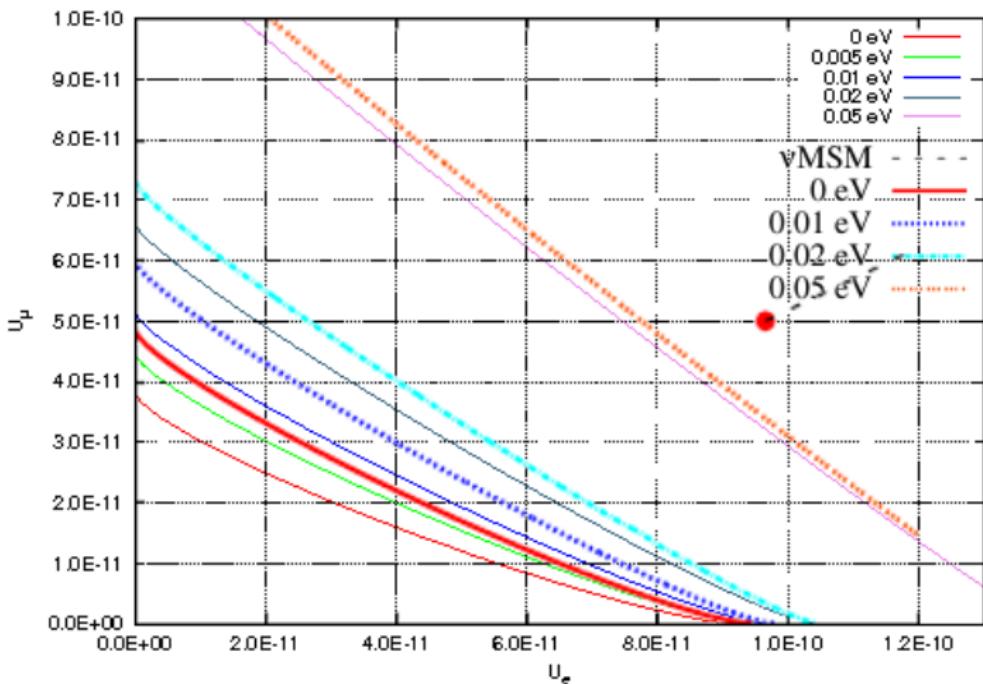


Рис.: Минимальные значения углов смещивания для  $M_1 = M_2 = 500$  МэВ и инверсной иерархии масс активных нейтрино. Различные линии соответствуют различным значениям массы легчайшего из активных нейтрино  $m_{lightest}$ . Для сравнения на график наложены линии из [?].





# Численная часть работы

Введение  
Модель  
Актуальность  
Цели работы  
Аналитическая часть работы  
Численная часть работы  
Выходы

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

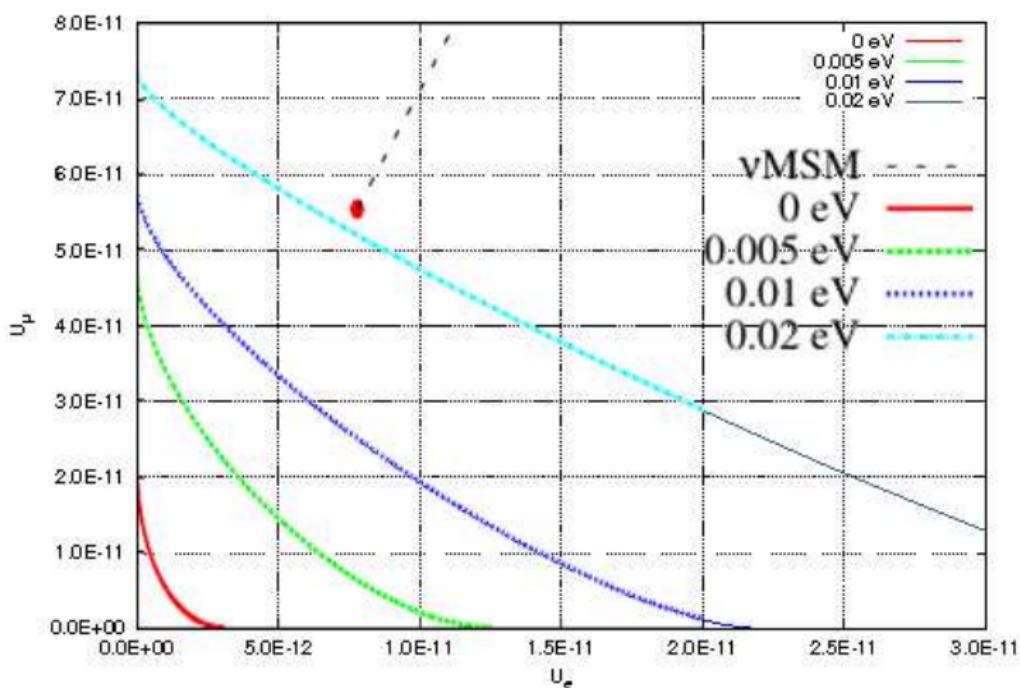


Рис.: Минимальные значения углов смещивания для  $M_1 = M_2 = 500$  МэВ и нормальной иерархии масс активных нейтрино. Различные





Введение

Модель

Актуальность

Цели работы

Аналитическая  
часть работы

Численная  
часть работы

Выходы

Дальнейшим развитием было “отпускание” СР-нарушающих фаз.

Для наглядности предоставлены графики для различных

фиксированных значений  $\delta$ . Сканировалась фаза  $\alpha_1$ , для

ускорения расчетов для начала фаза  $\alpha_2$  полагалась равной 0.

Из формулы (5) видно, что в случае  $t_{lightest} = 0$  зависимость

матрицы  $U$  от  $\alpha_1$  пропадает, что также отражается и на

графиках. Кроме того, среди всех значений  $\delta$  наименьшие углы смещивания достигаются при  $\delta = 0$ .

Для невырожденного случая варьирование СР-нарушающих фаз

позволяет значительно понизить минимальные углы

смещивания. включение фазы  $\alpha_2$  также занижает значения минимальных углов смещивания.

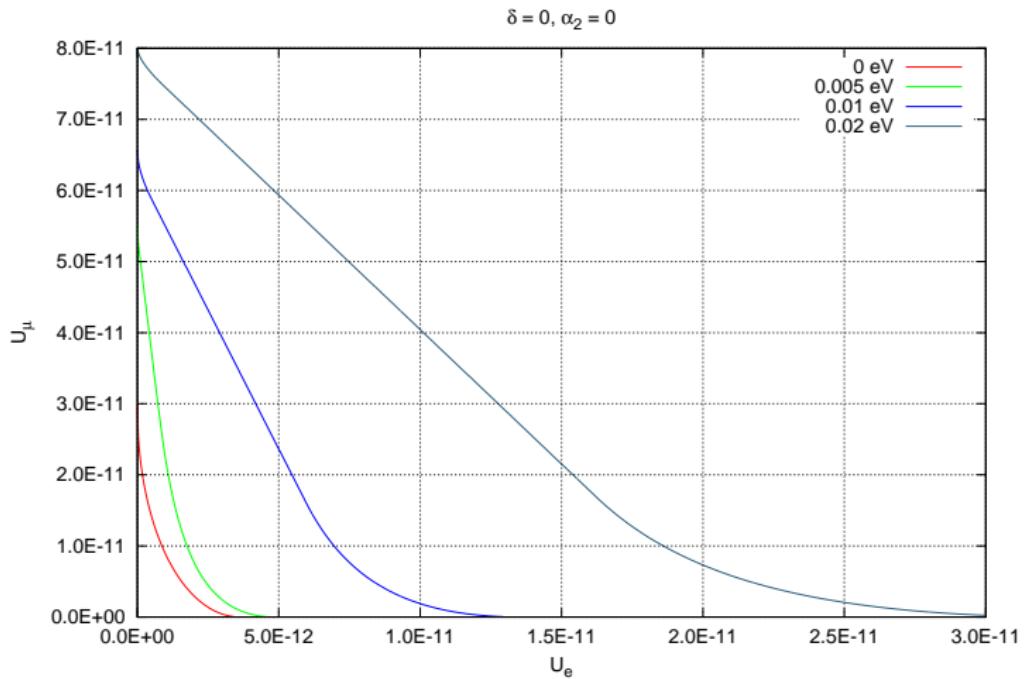


Рис.: Минимальные значения углов смешивания для  $M_1 = M_2 = 500$  МэВ и нормальной иерархии масс активных нейтрино. Различные линии соответствуют различным значениям массы легчайшего из активных нейтрино  $m_{lightest}$ . Фиксированы фазы  $\delta = 0, \alpha_2 = 0$ .

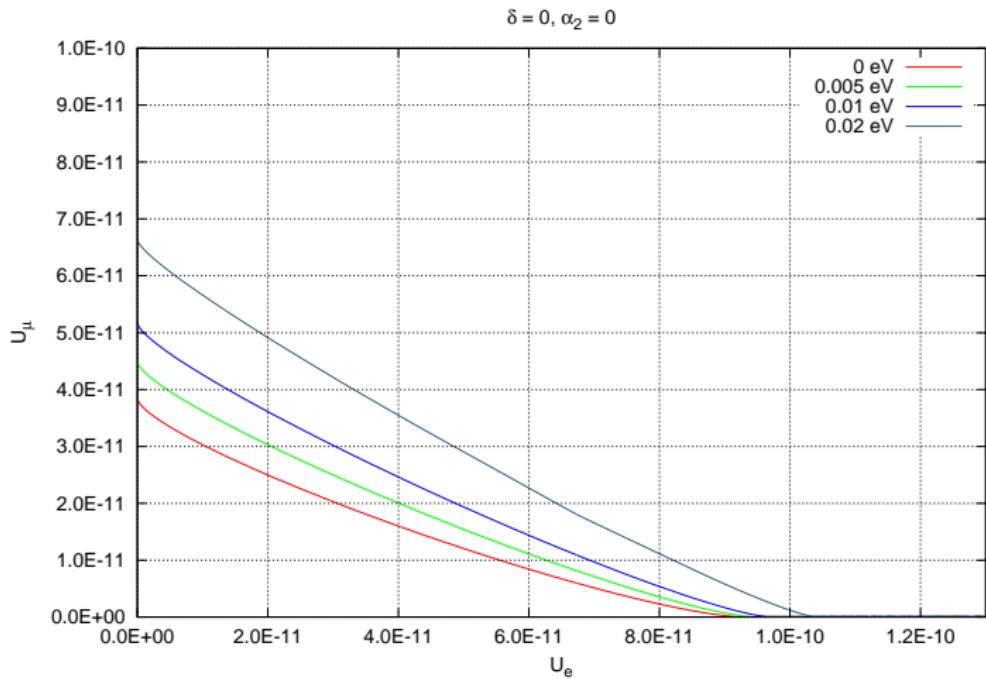


Рис.: Минимальные значения углов смешивания для  $M_1 = M_2 = 500$  МэВ и инверсной иерархии масс активных нейтрино. Различные линии соответствуют различным значениям массы легчайшего из активных нейтрино  $m_{lightest}$ . Фиксированы фазы  $\delta = 0, \alpha_2 = 0$ .

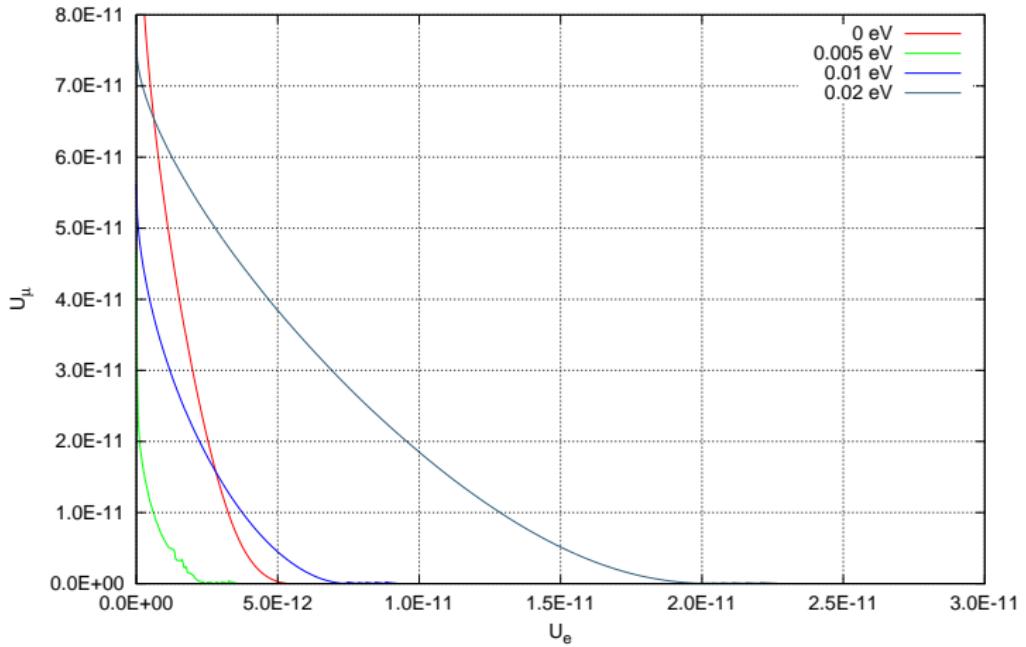


Рис.: Минимальные значения углов смешивания для  $M_1 = M_2 = 500$  МэВ и нормальной иерархии масс активных нейтрино. Различные линии соответствуют различным значениям массы легчайшего из активных нейтрино  $m_{lightest}$ . Фиксированы фазы  $\delta = -\frac{\pi}{2}$ ,  $\alpha_2 = 0$ .

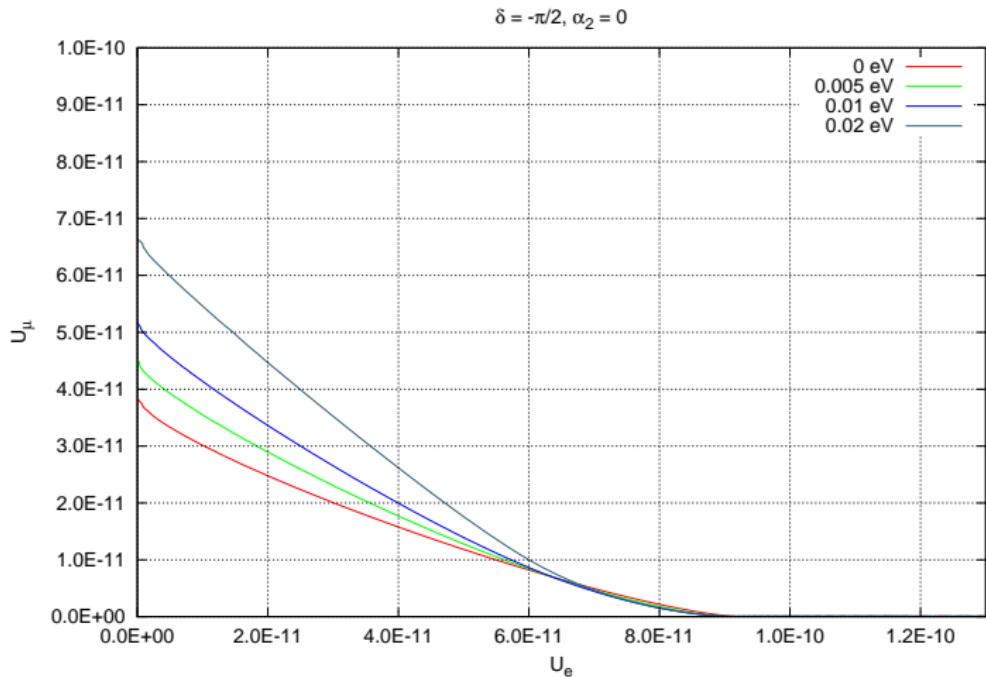


Рис.: Минимальные значения углов смещивания для  $M_1 = M_2 = 500$  МэВ и инверсной иерархии масс активных нейтрино. Различные линии соответствуют различным значениям массы легчайшего из активных нейтрино  $m_{lightest}$ . Фиксированы фазы  $\delta = -\frac{\pi}{2}, \alpha_2 = 0$ .

$$\delta = -\pi, \alpha_2 = 0$$

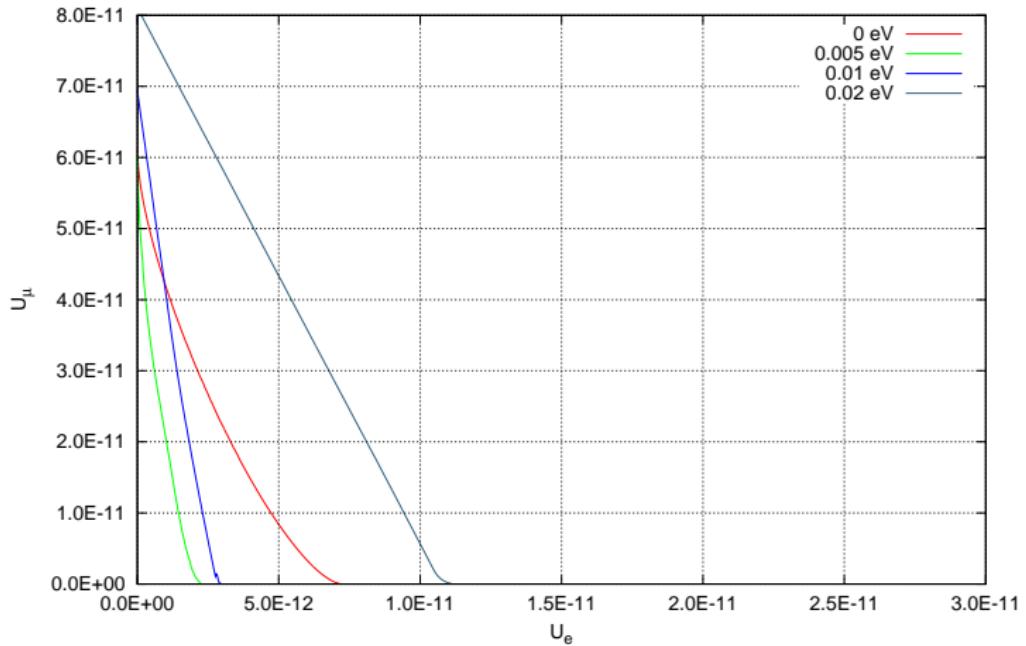


Рис.: Минимальные значения углов смещивания для  $M_1 = M_2 = 500$  МэВ и нормальной иерархии масс активных нейтрино. Различные линии соответствуют различным значениям массы легчайшего из активных нейтрино  $m_{lightest}$ . Фиксированы фазы  $\delta = -\pi, \alpha_2 = 0$ .

$$\delta = -\pi, \alpha_2 = 0$$

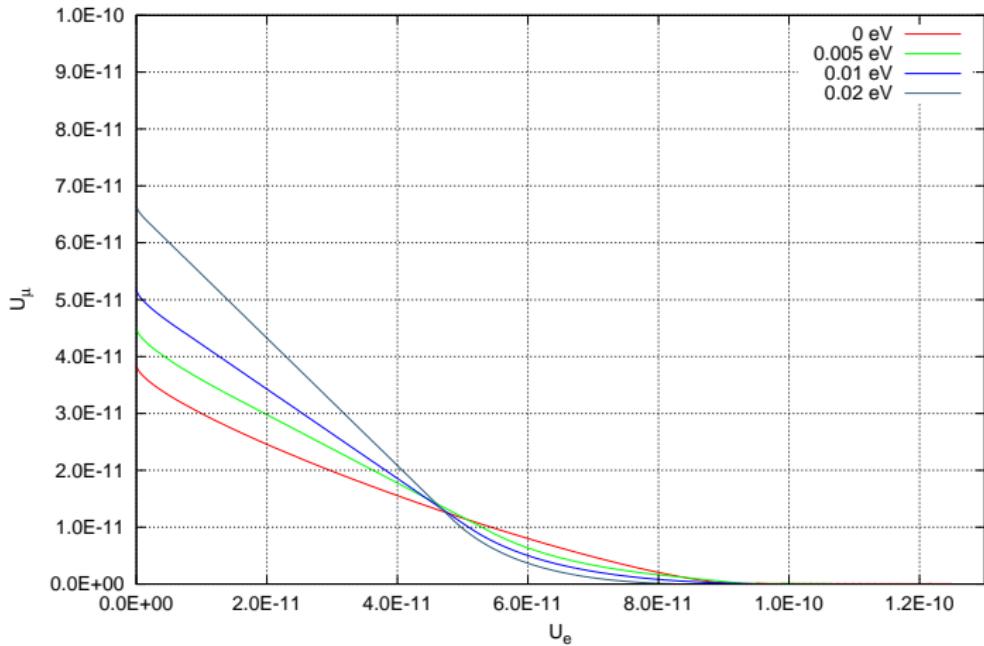


Рис.: Минимальные значения углов смещивания для  $M_1 = M_2 = 500$  МэВ и инверсной иерархии масс активных нейтрино. Различные линии соответствуют различным значениям массы легчайшего из активных нейтрино  $m_{lightest}$ . Фиксированы фазы  $\delta = -\pi, \alpha_2 = 0$ .

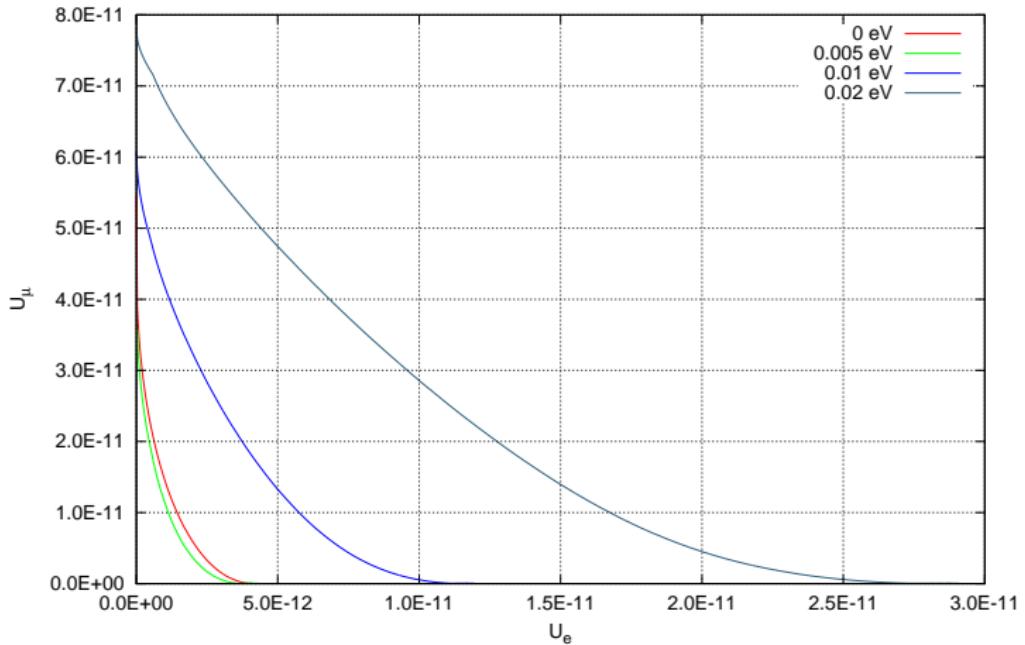


Рис.: Минимальные значения углов смешивания для  $M_1 = M_2 = 500$  МэВ и нормальной иерархии масс активных нейтрино. Различные линии соответствуют различным значениям массы легчайшего из активных нейтрино  $m_{lightest}$ . Фиксированы фазы  $\delta = \frac{\pi}{4}$ ,  $\alpha_2 = 0$ .

$$\delta = \pi/4, \alpha_2 = 0$$

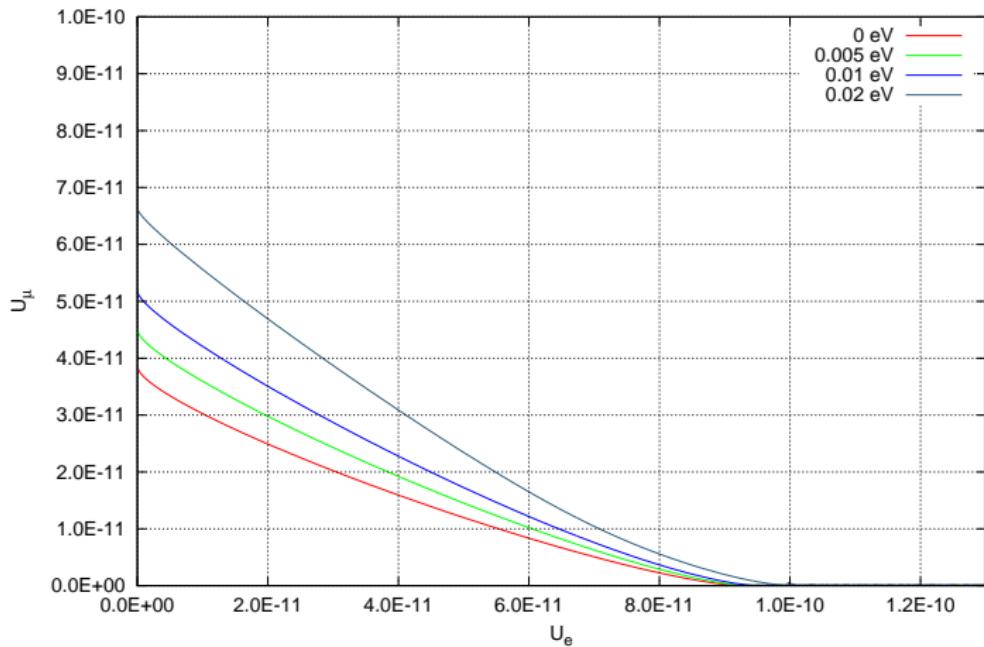


Рис.: Минимальные значения углов смещивания для  $M_1 = M_2 = 500$  МэВ и инверсной иерархии масс активных нейтрино. Различные линии соответствуют различным значениям массы легчайшего из активных нейтрино  $m_{lightest}$ . Фиксированы фазы  $\delta = \frac{\pi}{4}, \alpha_2 = 0$ .

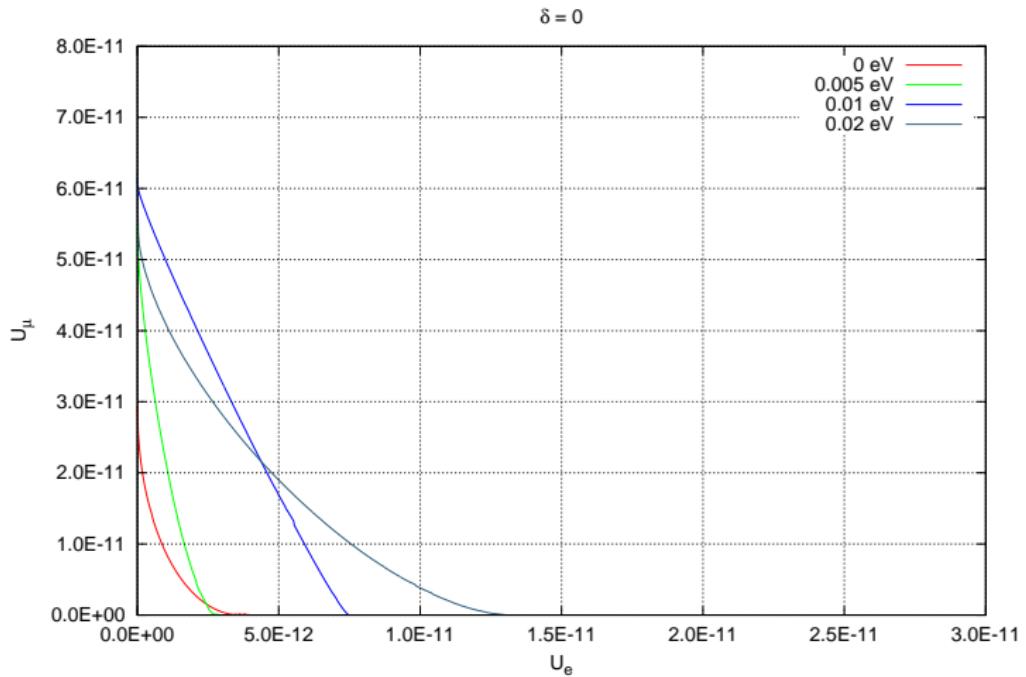


Рис.: Минимальные значения углов смещивания для  $M_1 = M_2 = 500$  МэВ и нормальной иерархии масс активных нейтрино. Различные линии соответствуют различным значениям массы легчайшего из активных нейтрино  $m_{lightest}$ . Фиксирована фаза  $\delta = 0$ .

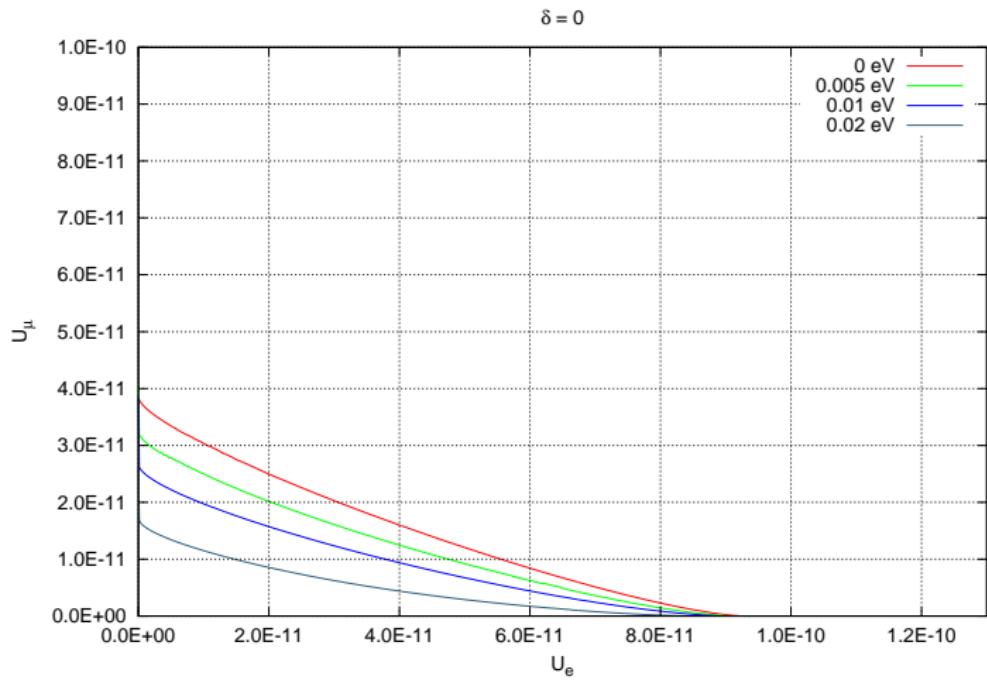


Рис.: Минимальные значения углов смещивания для  $M_1 = M_2 = 500$  МэВ и инверсной иерархии масс активных нейтрино. Различные линии соответствуют различным значениям массы легчайшего из активных нейтрино  $m_{lightest}$ . Фиксирована фаза  $\delta = 0$ .



Введение

Модель

Актуальность

Цели работы

Аналитическая  
часть работы

Численная  
часть работы

Выводы

- Была написана программа для получения минимальных значений смещивания 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 смещивания от  $CP$ - нарушающих фаз.