Зависимость вероятности выживания электронного нейтрино от углов смешивания

Кучеров Д.А., науч. рук. Ломов В.П.

Иркутск, ИГУ

Задачи работы

В работе поставленно несколько задач:

Задачи работы

В работе поставленно несколько задач:

- Изучить теорию нейтринных осцилляций в среде, разобрать используемую модель.

Задачи работы

В работе поставленно несколько задач:

- Изучить теорию нейтринных осцилляций в среде, разобрать используемую модель.
- Провести вычисления с помощью метода разложения Магнуса, варьируя значения углов смешивания.

Задачи работы

В работе поставленно несколько задач:

- Изучить теорию нейтринных осцилляций в среде, разобрать используемую модель.
- Провести вычисления с помощью метода разложения Магнуса, варьируя значения углов смешивания.
- Проанализировать полученные решения.

Задачи работы

В работе поставленно несколько задач:

- Изучить теорию нейтринных осцилляций в среде, разобрать используемую модель.
- Провести вычисления с помощью метода разложения Магнуса, варьируя значения углов смешивания.
- Проанализировать полученные решения.
- Сделать вывод об характере зависимости вероятности выживания электронного нейтрино от значения углов смешивания.

Теоритическая часть

Нейтрино можно классифицировать по двум критериям: по массе и по их связи с заряженными лептонами(по флейворам). В физике элементарных частиц, термин "флейвор"используется для описания различных типов, или "вкусов элементарных частиц. Этот термин часто применяется в отношении кварков и лептонов, включая нейтрино.
Нейтрино существуют в трех флейворах: электронные, мюонные и тау-нейтрино. Каждый флейвор ассоциируется с соответствующим лептоном (электроном, мюоном и тау-лептоном). Эти флейворы нейтрино уникальны тем, что они могут меняться один в другой в процессе нейтринных осцилляций. Переход нейтрино из одного флейвора в другой описывается уравнением:

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_i U^*_{\alpha i} |\nu_i\rangle \tag{1}$$

Уравнение нейтринных осцилляций

Когда активные флэйворные нейтрино распространяются в веществе, на их эволюционное уравнение влияют эффективные потенциалы из-за когерентного взаимодействия со средой посредством реакций нейтрального и заряженного токов. Таким образом, влияние среды можно описать в терминах потенциалов, в которых распространяются нейтрино, зависящим от состава среды, электрической нейтральности, намагниченности (ориентации спинов), скоростей частиц среды. Учитывая данные обстоятельства, было выведено уравнение:

$$\mathrm{i}\frac{\mathrm{d}\psi}{\mathrm{d}\xi} = [H_0 + \nu(\xi)W]\psi \tag{2}$$

Оно имеет несколько особенностей: уравнение матричное, состоящее из трёх компонент, $H(\xi) = [H_0 + \nu(\xi)W]$ это унитарная матрица гамильтониана эволюции. Данное уравнение на сегодняшний день не имеет аналитического решения. А численное интегрирование достаточно трудоёмкий процесс.

Метод разложения Магнуса

Одним из способов интегрирования уравнения (2) является метод разложения Магнуса. Этот метод относится к так называемым геометрическим интеграторам, которые заточены под решения таких дифференциальных уравнений как (2). Отличительной особенностью разложения Магнуса является то, что приближенное решение, предоставляемое процедурой, разделяет с точным решением соответствующие геометрические свойства. В нашем случае этим свойством является унитарность оператора эволюции времени.

Для автоматизации процесса генерации и обработки данных были написаны сценарии в bash-оболочке. Уравнение нейтринных осцилляций было численно решено с помощью программы m4-tol.
Для оценки точности мы воспользуемся одним замечательным свойством уравнения (2), а именно сохранение нормировки, то есть решение имеет смысл вероятности, а это значит, что будет справедливо выражение $\sum_i |\psi_i|^2 - 1 = 0$. Далее интегрируем уравнение (2), используя метод Рунге-Кутты реализованный в wolfram mathematica (используемая версия 13.2.1.0), в диапазоне от 0,1 до 1. Затем, записываем в файл решение в диапазоне от 0,101 до 1 с шагом 10^{-3}. С помощью python строим график функции $F(\xi) = \sum_i |\psi_i(\xi)|^2 - 1$
Проводим подобную процедуру и для метода разложения Магнуса.

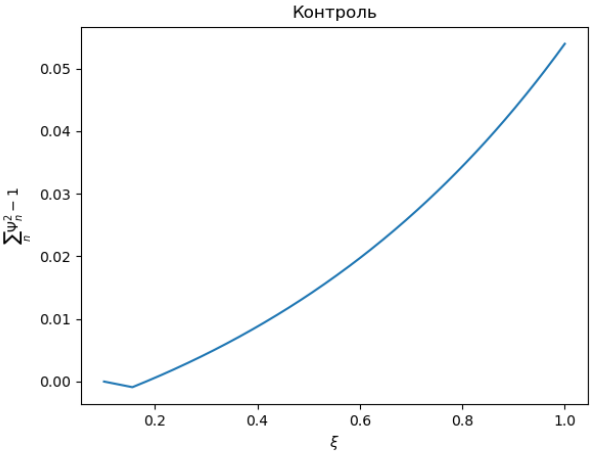

Рис.: График контроля нормировки для решения полученного с помощью wolfram mathematica

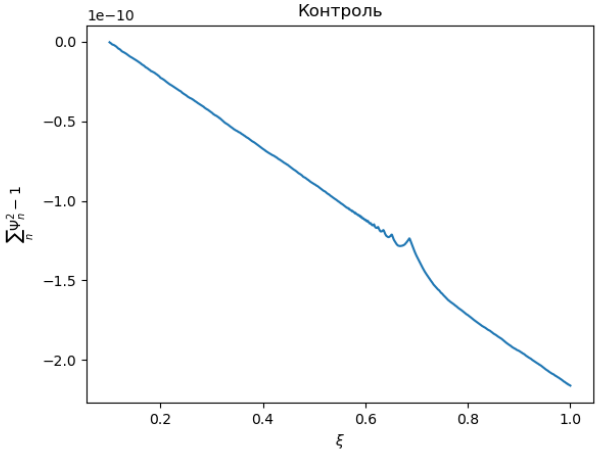

Рис.: График контроля нормировки для решения полученного с помощью метода разложения Магнуса

Вывод

Из полученных графиков, можно сделать вывод, что метод разложения Магнуса является достаточно эффективным методом интегрирования уравнения (2), в сравнении с методом Рунге-Кутты.