

# Качественные свойства решений уравнения осцилляций нейтрино в среде

Данеко И.И.

20 октября 2025

Научный руководитель: Ломов В.П.

Иркутск, ФГБОУ ВО ИГУ

- ▶ Нейтрино — одна из самых необычных частиц в нашем мире.

- ▶ Нейтрино — одна из самых необычных частиц в нашем мире.
- ▶ Она обладает нулевым зарядом, полуцелым спином и участвует только в слабом взаимодействии.

- ▶ Нейтрино — одна из самых необычных частиц в нашем мире.
- ▶ Она обладает нулевым зарядом, полуцелым спином и участвует только в слабом взаимодействии.
- ▶ Нейтрино существует как бы в двух видах: флейворные нейтрино и массивные. Первые рождаются, тогда как вторые — распространяются.

- ▶ Нейтрино — одна из самых необычных частиц в нашем мире.
- ▶ Она обладает нулевым зарядом, полуцелым спином и участвует только в слабом взаимодействии.
- ▶ Нейтрино существует как бы в двух видах: флейворные нейтрино и массивные. Первые рождаются, тогда как вторые — распространяются.
- ▶ В данной работе мы разбираем качественные характеристики численного решения уравнения осцилляции нейтрино в среде.

Три известных состояния флейворных  $\nu_\alpha$  ( $\alpha = e, \mu, \tau$ ) являются линейными комбинациями состояний массивных  $\nu_i$  с массами  $m_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ), состояния флейворных нейтрино являются суперпозицией состояний массивные нейтрино

Три известных состояния флейворных  $\nu_\alpha$  ( $\alpha = e, \mu, \tau$ ) являются линейными комбинациями состояний массивных  $\nu_i$  с массами  $m_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ), состояния флейворных нейтрино являются суперпозицией состояний массивные нейтрино

$$\nu_\alpha = \sum_i U_{\alpha i}^* \nu_i,$$

$U_{\alpha i}$  являются элементами унитарной матрицы смешивания и называемой матрицей Понтекорва–Маки–Накагавы–Сакаты (PMNS).

Три известных состояния флейворных  $\nu_\alpha$  ( $\alpha = e, \mu, \tau$ ) являются линейными комбинациями состояний массивных  $\nu_i$  с массами  $m_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ), состояния флейворных нейтрино являются суперпозицией состояний массивные нейтрино

$$\nu_\alpha = \sum_i U_{\alpha i}^* \nu_i,$$

$U_{\alpha i}$  являются элементами унитарной матрицы смешивания и называемой матрицей Понтекорва–Маки–Накагавы–Сакаты (PMNS).

Вероятность иметь состояние аромата  $\beta$  в точке  $r$

$$P_{\alpha\beta} = \sum_j |U_{\beta j}|^2 |A_j|^2 + 2 \sum_{i>j} \text{Re}[U_{\beta i} U_{\beta j}^* A_i A_j^* \exp^{-i\Delta_{ij}L}].$$

Здесь  $\Delta_{ij} = \Delta m_{ij}^2 / 2E$ , где  $E = |p|$ , а  $A_i$  амплитуда вероятности наличия в точке регистрации



Уравнение осцилляций в среде

$$i \frac{\partial \Psi}{\partial \xi} = H(\xi) \Psi(\xi).$$

Уравнение осцилляций в среде

$$i \frac{\partial \Psi}{\partial \xi} = H(\xi) \Psi(\xi).$$

Здесь  $H(\xi)$  — эрмитова матрица

$$H(\xi) = H_0 + v(\xi)W$$

Уравнение осцилляций в среде

$$i \frac{\partial \Psi}{\partial \xi} = H(\xi) \Psi(\xi).$$

Здесь  $H(\xi)$  — эрмитова матрица

$$H(\xi) = H_0 + v(\xi)W$$

Матрица  $W$  имеет вид:

$$W = \begin{pmatrix} c_{13}^2 c_{12}^2 & c_{12} s_{12} c_{13}^2 & c_{12} c_{13} s_{13} \\ c_{12} s_{12} c_{13}^2 & s_{12}^2 c_{13}^2 & s_{12} c_{13} s_{13} \\ c_{12} s_{13} c_{13} & s_{12} c_{13} s_{13} & s_{13}^2 \end{pmatrix}.$$

Уравнение осцилляций в среде

$$i \frac{\partial \Psi}{\partial \xi} = H(\xi) \Psi(\xi).$$

Здесь  $H(\xi)$  — эрмитова матрица

$$H(\xi) = H_0 + v(\xi)W$$

Матрица  $W$  имеет вид:

$$W = \begin{pmatrix} c_{13}^2 c_{12}^2 & c_{12} s_{12} c_{13}^2 & c_{12} c_{13} s_{13} \\ c_{12} s_{12} c_{13}^2 & s_{12}^2 c_{13}^2 & s_{12} c_{13} s_{13} \\ c_{12} s_{13} c_{13} & s_{12} c_{13} s_{13} & s_{13}^2 \end{pmatrix}.$$

Профиль плотности для солнечной модели

$$v(\xi) = \gamma \exp(-\eta \xi)$$

Вероятность иметь состояние аромата  $\beta$  в точке  $r$

$$P_{\alpha\beta} = \sum_j |U_{\beta j}|^2 |A_j|^2 + 2 \sum_{i>j} \text{Re}[U_{\beta i} U_{\beta j}^* A_i A_j^* \exp(-i\Delta_{ij} L)].$$

Вероятность иметь состояние аромата  $\beta$  в точке  $r$

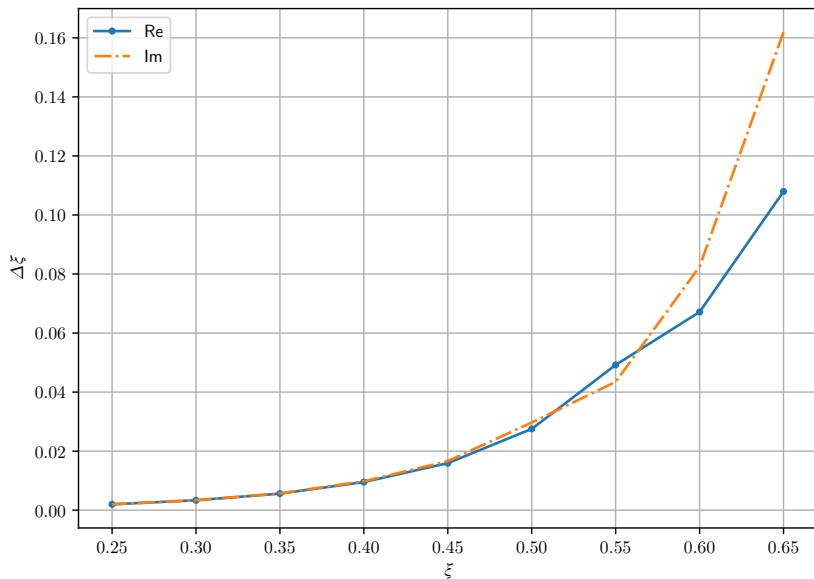
$$P_{\alpha\beta} = \sum_j |U_{\beta j}|^2 |A_j|^2 + 2 \sum_{i>j} \text{Re}[U_{\beta i} U_{\beta j}^* A_i A_j^* \exp(-i\Delta_{ij} L)].$$

средняя вероятность выживания составляет

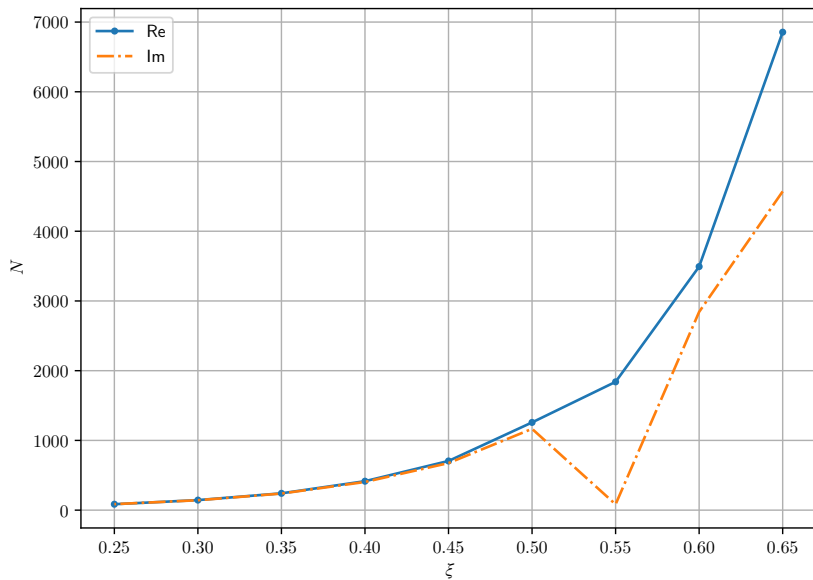
$$\langle P_{ee} \rangle = c_{12}^2 c_{13}^2 |\Psi_1|^2 + s_{12}^2 c_{13}^2 |\Psi_2|^2 + s_{13}^2 |\Psi_3|^2. \quad (1)$$

# Качественные свойства решения

Квазипериоды реальной и мнимой частей  $\Psi_1$

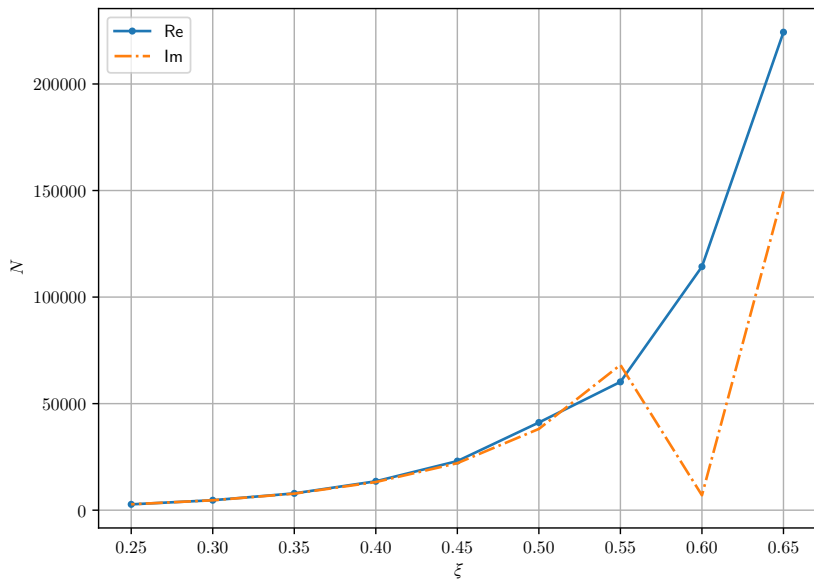


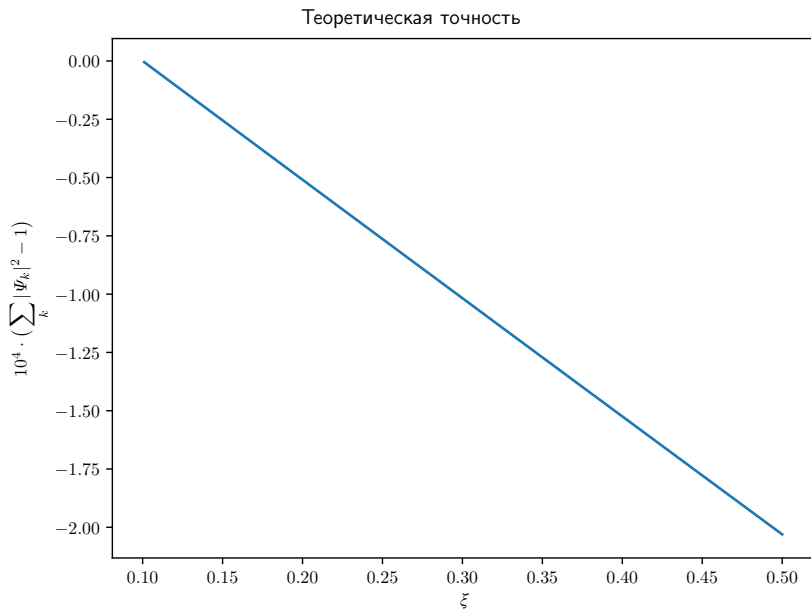
Число переходов нуля для  $\Psi_2$





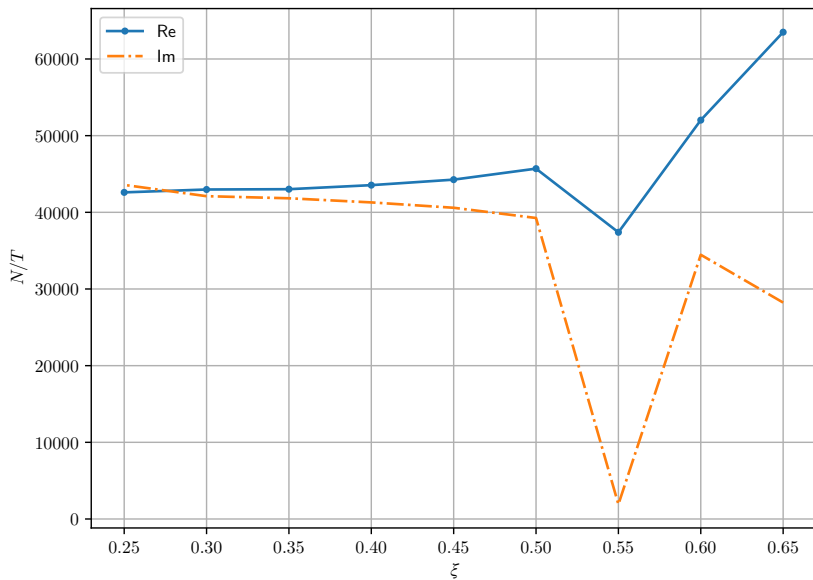
Число переходов нуля для  $\Psi_3$



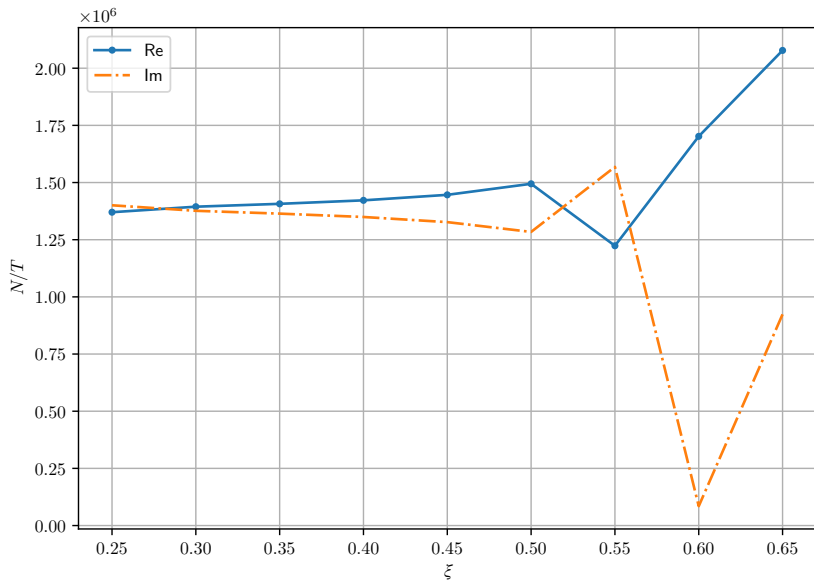


# Качественные свойства решения

Число переходов нуля на квазипериод для  $\Psi_2$



Число переходов нуля на квазипериод для  $\Psi_3$



В данной работе мы применили встроенные в Mathematica средства численного решения дифференциальных уравнений (DOPRI) для выяснения качественных характеристик полученного решения.

В данной работе мы применили встроенные в Mathematica средства численного решения дифференциальных уравнений (DOPRI) для выяснения качественных характеристик полученного решения.

- ▶ Мы нашли подходящую характеристику.

В данной работе мы применили встроенные в Mathematica средства численного решения дифференциальных уравнений (DOPRI) для выяснения качественных характеристик полученного решения.

- ▶ Мы нашли подходящую характеристику.
- ▶ следует внимательно относиться к расчётам с помощью встроенных средств и, по возможности, использовать альтернативные алгоритмы.





## ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ