

# 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.
- ▶ Есть два типа нейтрино: 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.
- ▶ Есть два типа нейтрино: флейворные нейтрино и массивные. Первые рождаются, тогда как вторые — распространяются.
- ▶ В данной работе мы разбираем качественные характеристики численного решения уравнения осцилляции нейтрино в среде.

## Осцилляции нейтрино

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

# Оscилляции нейтрино

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

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

$U_{\alpha i}$  — элементы унитарной матрицы смешивания, матрица Понтекорво—Маки—Накагавы—Сакаты (PMNS).

# Оscилляции нейтрино

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

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

$U_{\alpha i}$  — элементы унитарной матрицы смешивания, матрица Понтекорво—Маки—Накагавы—Сакаты (PMNS).

Вероятность найти флейвор  $\beta$  в точке  $r$

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

Здесь  $\Delta_{ij} = \Delta m_{ij}^2 / 2E$ , а  $A_i$  начальное условие.

# Осцилляции нейтрино в веществе

Уравнение осцилляций в среде

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

# Осцилляции нейтрино в веществе

Уравнение осцилляций в среде

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

Здесь  $H(\xi)$  — эрмитовая матрица

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

# Осцилляции нейтрино в веществе

Уравнение осцилляций в среде

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

Здесь  $H(\xi)$  — эрмитовая матрица

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

Матрица  $W$  имеет вид:

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

# Осцилляции нейтрино в веществе

Уравнение осцилляций в среде

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

Здесь  $H(\xi)$  — эрмитовая 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

$$v(\xi) = \gamma e^{-\eta \xi}$$

## Наблюдаемые

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

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

## Наблюдаемые

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

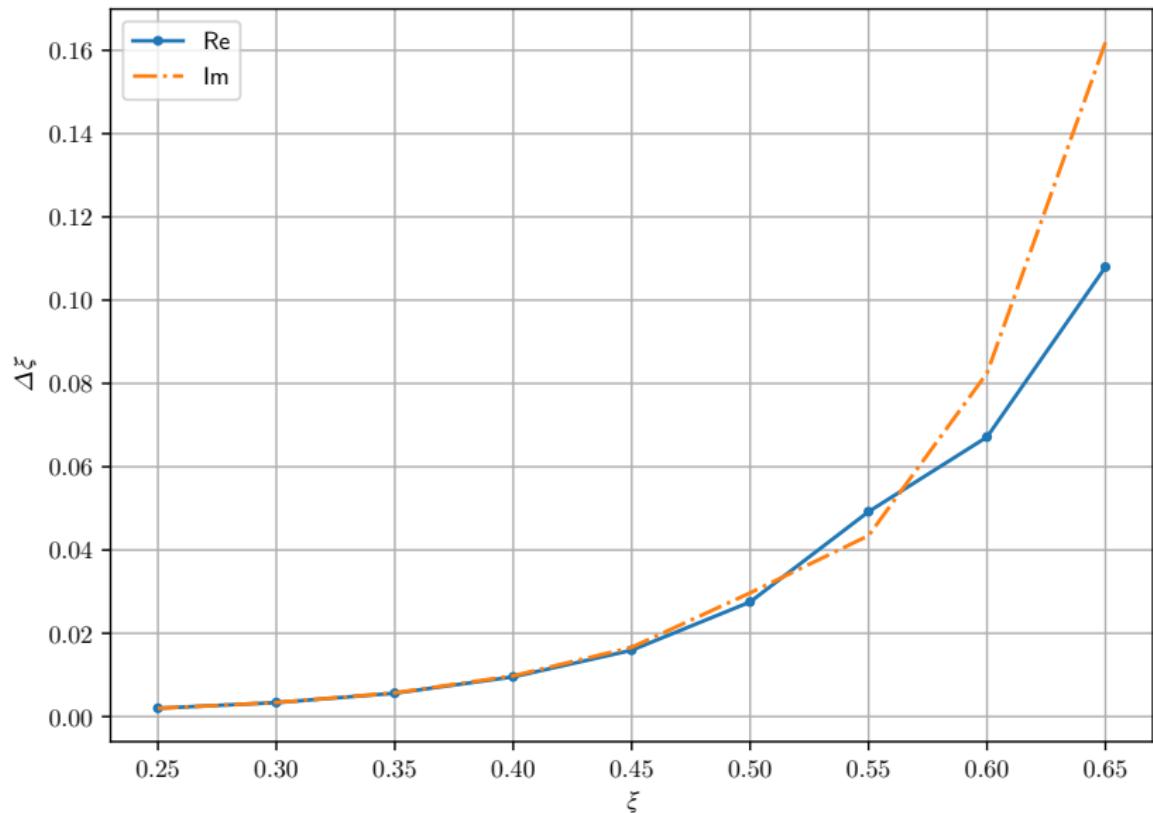
$$P_{\alpha\beta} = \sum_j |U_{\beta j}|^2 |A_j|^2 + 2 \sum_{i>j} \operatorname{Re}[U_{\beta i} U_{\beta j}^* A_i A_j^* e(-i \Delta_{ij} L)].$$

Усреднённая вероятность выживания составляет

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

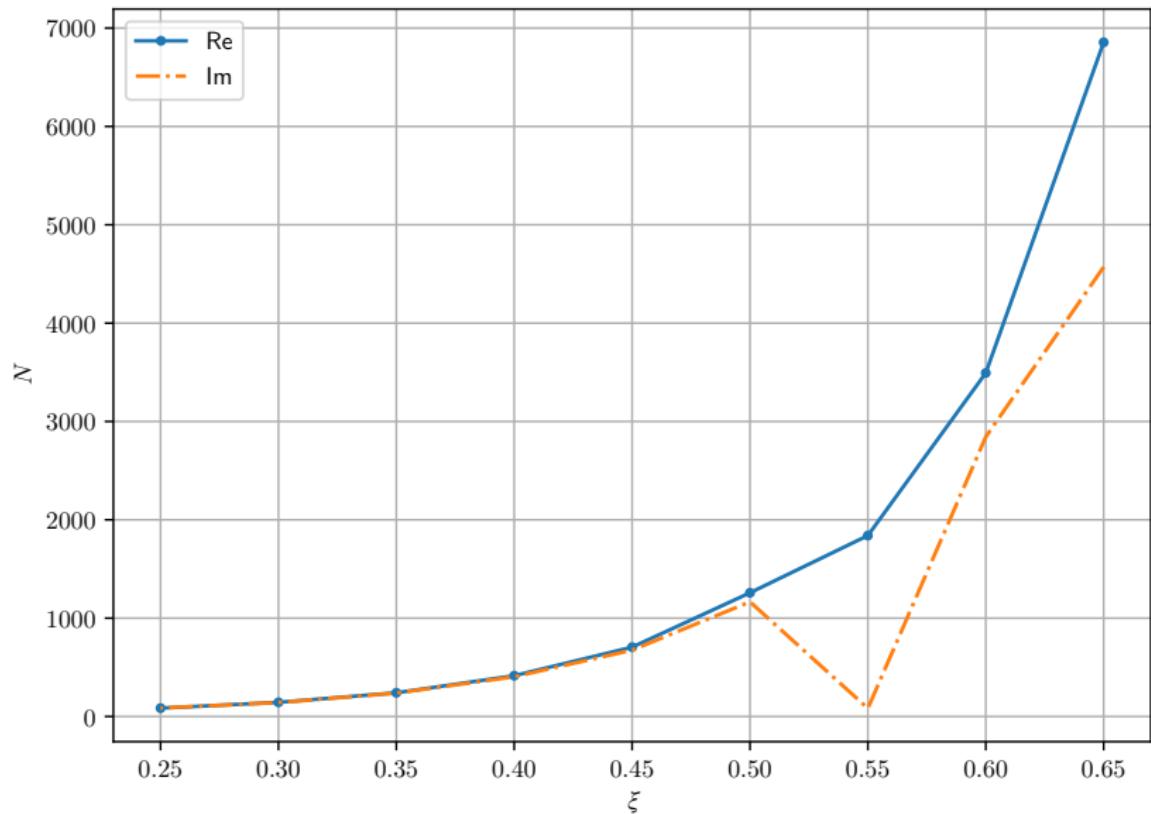
## Качественные свойства решения

Квазипериоды реальной и мнимой частей  $\Psi_1$



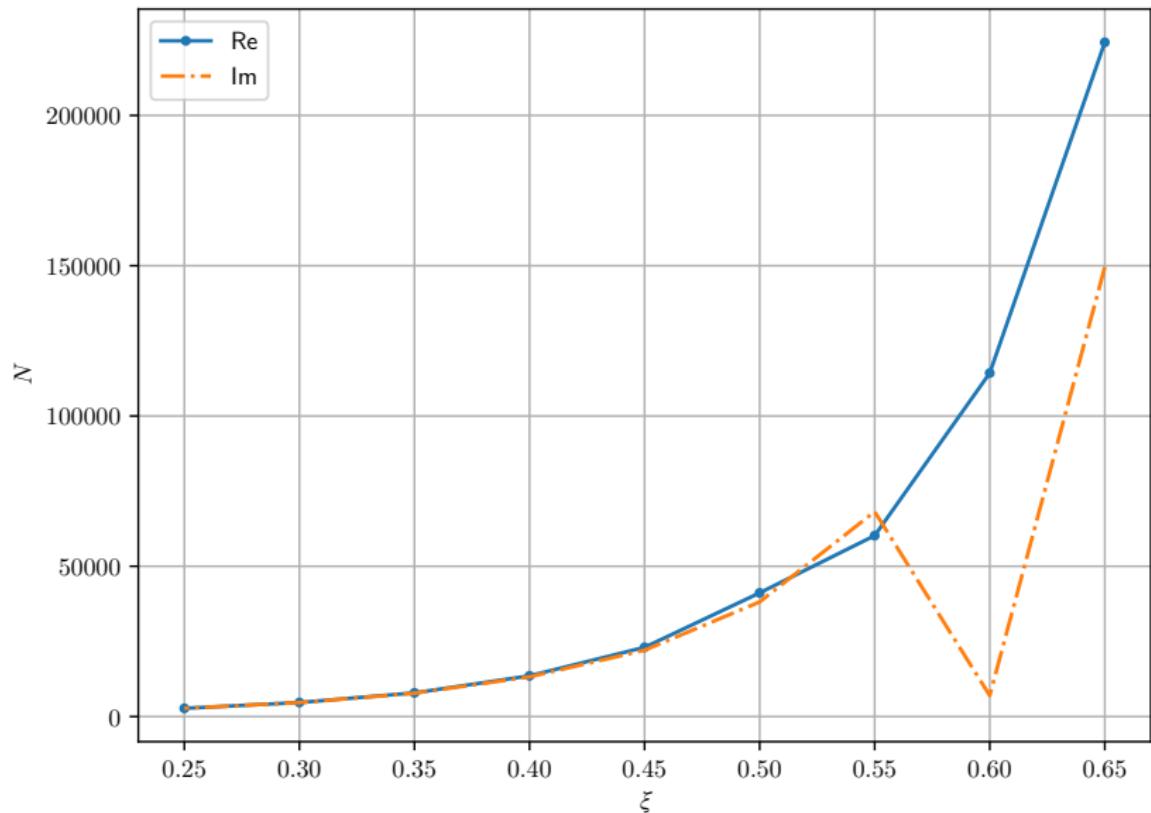
# Качественные свойства решения

Число переходов нуля для  $\Psi_2$



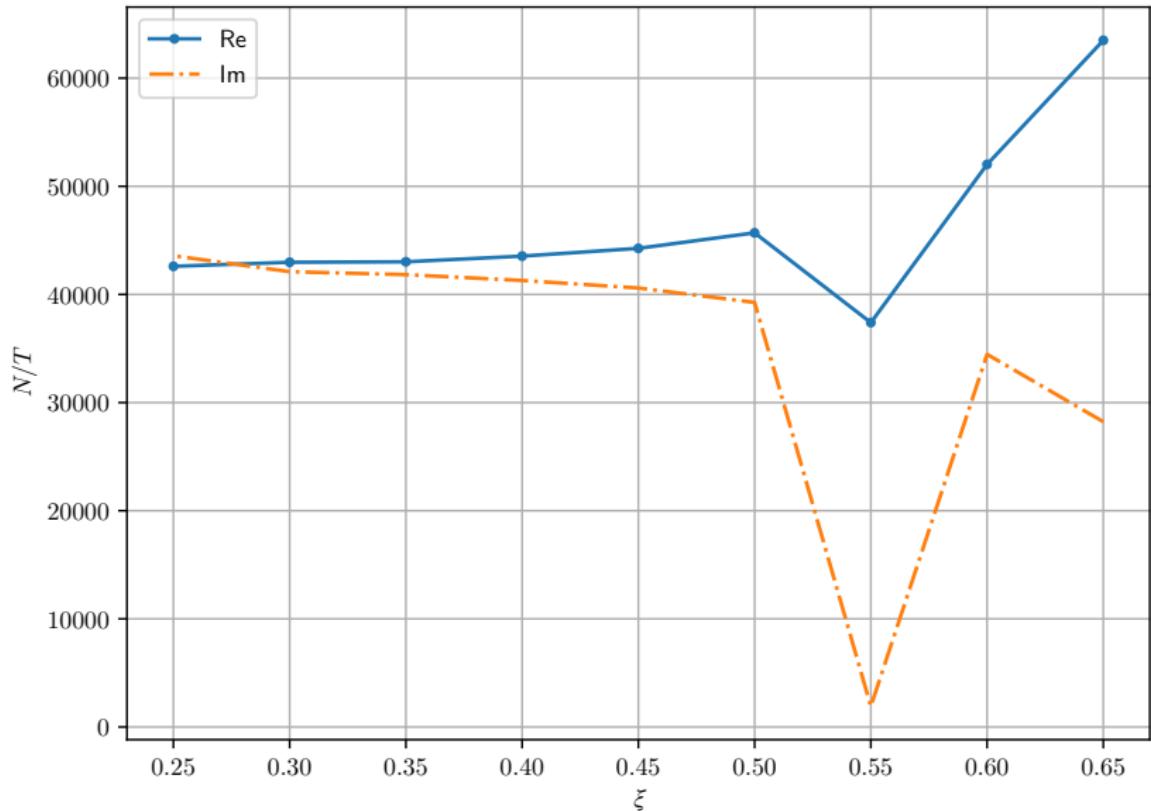
# Качественные свойства решения

Число переходов нуля для  $\Psi_3$

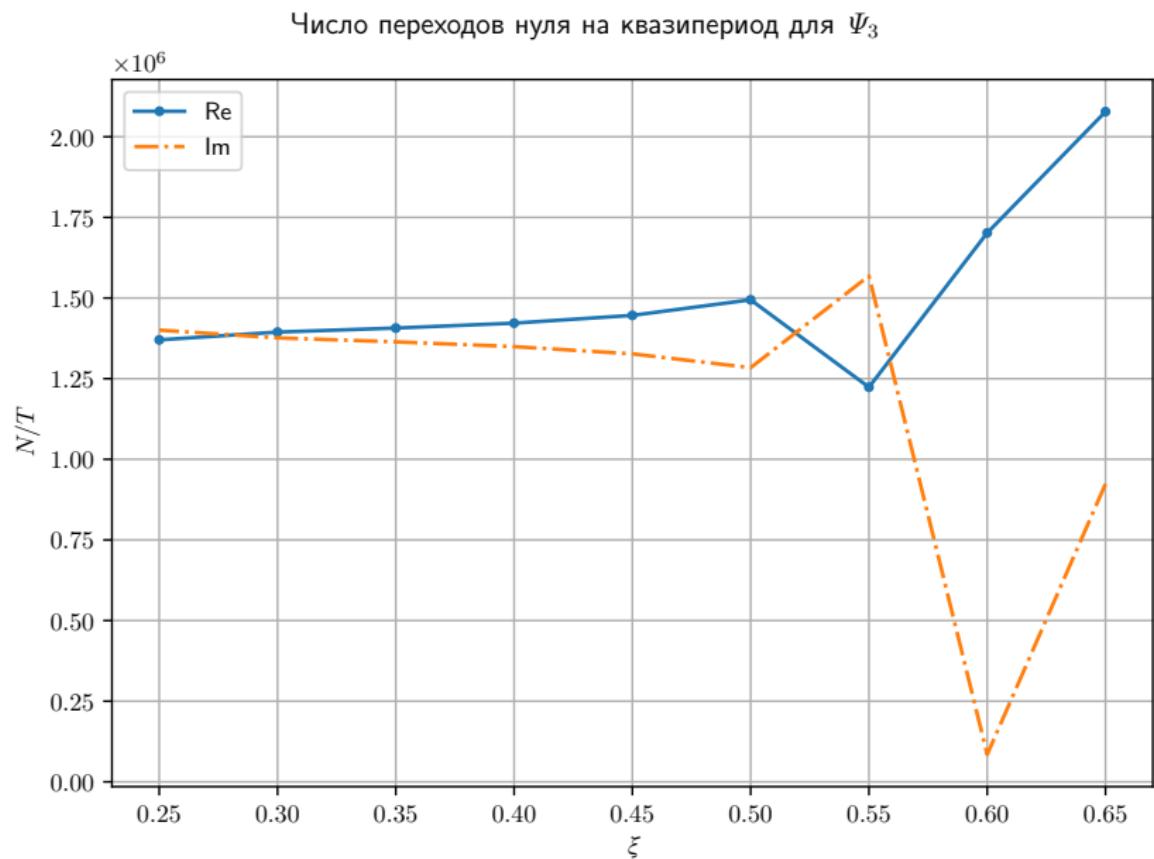


# Качественные свойства решения

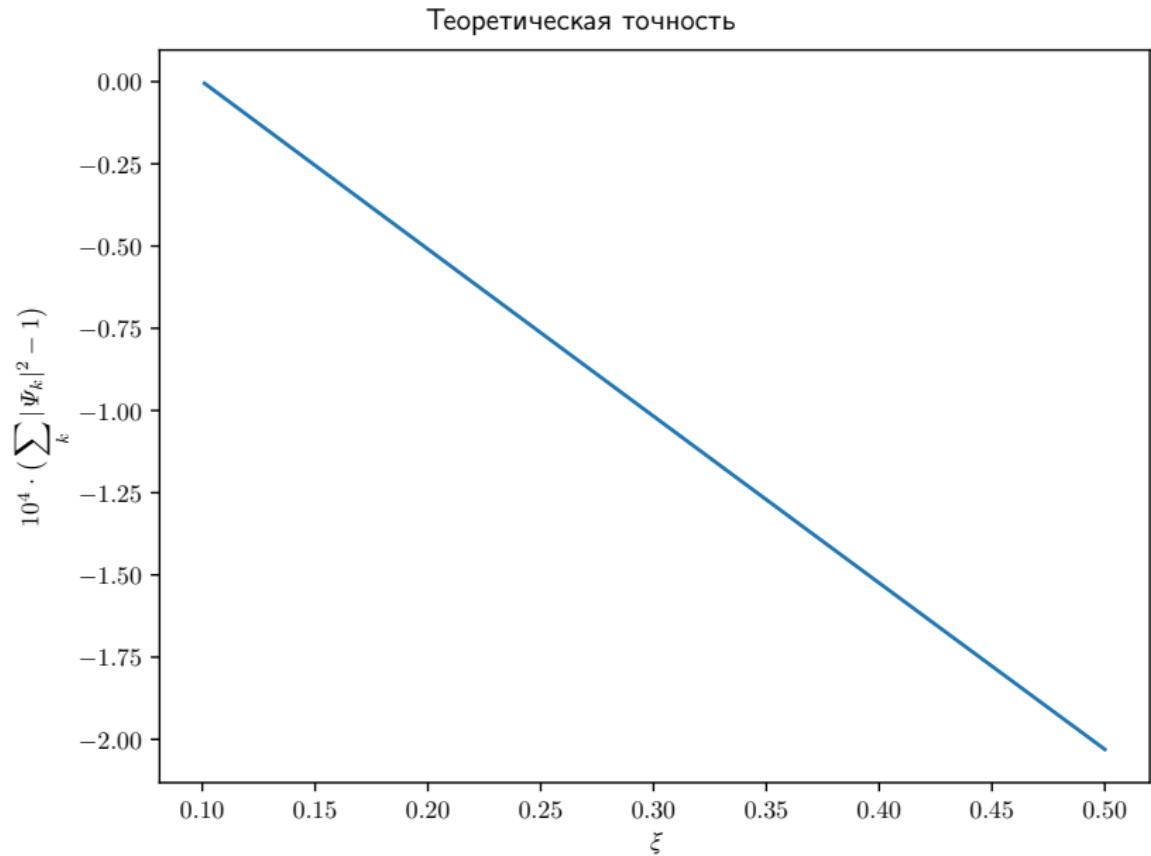
Число переходов нуля на квазипериод для  $\Psi_2$



# Качественные свойства решения



# Качественные свойства решения



## Заключение

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.

КОНЕЦ

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ