

# Астрофизические проявления легкого стерильного нейтрино

Выполнил:  
студент 215 группы,                      Беляев П. П.

Научный руководитель:  
член-корр. РАН,                      Троицкий С. В.

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова  
Физический факультет  
Кафедра физики частиц и космологии

19 мая 2023 г.

# План презентации

① Введение. Постановка задачи

② Основная часть. Ход работы

③ Заключение. Итоги

# Введение. Постановка задачи

- Нейтрино, соответствующие заряженным лептонам:  $\nu_e$ ,  $\nu_\mu$ ,  $\nu_\tau$

# Введение. Постановка задачи

- Нейтрино, соответствующие заряженным лептонам:  $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$
- Baksan Experiment on Sterile Neutrinos (BEST)

# Введение. Постановка задачи

- Нейтрино, соответствующие заряженным лептонам:  $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$
- Стерильное нейтрино  $\nu_s$  ?
- Baksan Experiment on Sterile Neutrinos (BEST)

# Введение. Постановка задачи

- Нейтрино, соответствующие заряженным лептонам:  $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$
- Стерильное нейтрино  $\nu_s$  ?
- Vaksan Experiment on Sterile Neutrinos (BEST)
- Приближение Грибова-Понтекорво

# Основная часть. Ход работы

- Состояние с определенным поколением (ароматом):

$$|\nu_\alpha\rangle, \quad \alpha \in \{e, \mu, \tau, \dots\}$$

## Основная часть. Ход работы

- Состояние с определенным поколением (ароматом):

$$|\nu_\alpha\rangle, \quad \alpha \in \{e, \mu, \tau, \dots\}$$

- Состояние с определенной массой:

$$|\nu_j\rangle, \quad j \in \{1, 2, 3, \dots\}$$



# Основная часть. Ход работы

- Состояние с определенным поколением (ароматом):

$$|\nu_\alpha\rangle, \quad \alpha \in \{e, \mu, \tau \dots\}$$

- Состояние с определенной массой:

$$|\nu_j\rangle, \quad j \in \{1, 2, 3 \dots\}$$

- PMNS-матрица:

$$|\nu_j\rangle = \sum_{\alpha} U_{\alpha j} |\nu_\alpha\rangle$$

# Основная часть. Ход работы

- Состояние с определенным поколением (ароматом):

$$|\nu_\alpha\rangle, \quad \alpha \in \{e, \mu, \tau, \dots\}$$

- Состояние с определенной массой:

$$|\nu_j\rangle, \quad j \in \{1, 2, 3, \dots\}$$

- PMNS-матрица:

$$|\nu_j\rangle = \sum_{\alpha} U_{\alpha j} |\nu_\alpha\rangle$$

- Параметризация:

# Основная часть. Ход работы

- Состояние с определенным поколением (ароматом):

$$|\nu_\alpha\rangle, \quad \alpha \in \{e, \mu, \tau, \dots\}$$

- Состояние с определенной массой:

$$|\nu_j\rangle, \quad j \in \{1, 2, 3, \dots\}$$

- PMNS-матрица:

$$|\nu_j\rangle = \sum_{\alpha} U_{\alpha j} |\nu_\alpha\rangle$$

- Параметризация:

$$U^{3 \times 3} = R_{23} \tilde{R}_{13} R_{12}$$

# Основная часть. Ход работы

- Состояние с определенным поколением (ароматом):

$$|\nu_\alpha\rangle, \quad \alpha \in \{e, \mu, \tau, \dots\}$$

- Состояние с определенной массой:

$$|\nu_j\rangle, \quad j \in \{1, 2, 3, \dots\}$$

- PMNS-матрица:

$$|\nu_j\rangle = \sum_{\alpha} U_{\alpha j} |\nu_\alpha\rangle$$

- Параметризация:

$$U^{3 \times 3} = R_{23} \tilde{R}_{13} R_{12}$$

$$U^{4 \times 4} = \tilde{R}_{34} R_{24} \tilde{R}_{14} R_{23} \tilde{R}_{13} R_{12}$$

# Основная часть. Ход работы

- Параметризация:

$$U^{3 \times 3} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & \tilde{s}_{13} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\tilde{s}_{13}^* & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

# Основная часть. Ход работы

- Параметризация:

$$U^{3 \times 3} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & \tilde{s}_{13} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\tilde{s}_{13}^* & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$U^{4 \times 4} = \begin{pmatrix} 1 & & & \\ & 1 & & \\ & c_{34} & \tilde{s}_{34} & \\ & -\tilde{s}_{34}^* & c_{34} & \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & & & \\ & c_{24} & s_{24} & \\ & -s_{24} & c_{24} & \\ & & & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{14} & & \tilde{s}_{14} & \\ & 1 & & \\ & & 1 & \\ -\tilde{s}_{14}^* & & & c_{14} \end{pmatrix} \times \\ \times \begin{pmatrix} c_{23} & s_{23} & & \\ & 1 & & \\ -s_{23} & c_{23} & & \\ & & & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & & & \\ & c_{13} & \tilde{s}_{13} & \\ & -\tilde{s}_{13}^* & c_{13} & \\ & & & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & & \\ -s_{12} & c_{12} & & \\ & & & 1 \\ & & & & 1 \end{pmatrix}$$

# Основная часть. Ход работы

- Параметризация:

$$U^{3 \times 3} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & \tilde{s}_{13} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\tilde{s}_{13}^* & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$U^{4 \times 4} = \begin{pmatrix} 1 & & & \\ & 1 & & \\ & & c_{34} & \tilde{s}_{34} \\ & & -\tilde{s}_{34}^* & c_{34} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & & & \\ & c_{24} & & s_{24} \\ & -s_{24} & & c_{24} \\ & & & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{14} & & & \tilde{s}_{14} \\ & 1 & & \\ & & 1 & \\ & -\tilde{s}_{14}^* & & c_{14} \end{pmatrix} \times \\ \times \begin{pmatrix} c_{23} & & & s_{23} \\ & 1 & & \\ & -s_{23} & & c_{23} \\ & & & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & & & \\ & c_{13} & & \tilde{s}_{13} \\ & -\tilde{s}_{13}^* & & c_{13} \\ & & & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & & \\ -s_{12} & c_{12} & & \\ & & & 1 \\ & & & 1 \end{pmatrix}$$

$$c_{jk} = \cos \theta_{jk}, \quad s_{jk} = \sin \theta_{jk}, \quad \tilde{s}_{jk} = \sin(\theta_{jk}) e^{-i\delta_{jk}}$$

# Основная часть. Ход работы

- Вероятность перехода:



# Основная часть. Ход работы

- Вероятность перехода:

$$\mathcal{P}_{\alpha \rightarrow \beta} = \sum_k |U_{\alpha k}|^2 |U_{\beta k}|^2 + 2 \operatorname{Re} \sum_{k>j} U_{\alpha k}^* U_{\beta k} U_{\alpha j} U_{\beta j}^* e^{-i \frac{\Delta m_{jk}^2}{2E} L}$$

# Основная часть. Ход работы

- Вероятность перехода:

$$\mathcal{P}_{\alpha \rightarrow \beta} = \underbrace{\sum_k |U_{\alpha k}|^2 |U_{\beta k}|^2}_{\text{const}} + 2 \operatorname{Re} \sum_{k>j} U_{\alpha k}^* U_{\beta k} U_{\alpha j} U_{\beta j}^* e^{-i \frac{\Delta m_{jk}^2}{2E} L}$$

# Основная часть. Ход работы

- Вероятность перехода:

$$\mathcal{P}_{\alpha \rightarrow \beta} = \sum_k |U_{\alpha k}|^2 |U_{\beta k}|^2 + 2 \operatorname{Re} \underbrace{\sum_{k>j} U_{\alpha k}^* U_{\beta k} U_{\alpha j} U_{\beta j}^* e^{-i \frac{\Delta m_{jk}^2}{2E} L}}_{\text{зависит от фазы } \varphi_{jk}}$$

# Основная часть. Ход работы

- Вероятность перехода:

$$\mathcal{P}_{\alpha \rightarrow \beta} = \sum_k |U_{\alpha k}|^2 |U_{\beta k}|^2 + 2 \operatorname{Re} \sum_{k>j} U_{\alpha k}^* U_{\beta k} U_{\alpha j} U_{\beta j}^* e^{-i \frac{\Delta m_{jk}^2}{2E} L}$$

Источник	Ароматовый состав при рождении, ( $\nu_e : \nu_\mu : \nu_\tau$ )	Фаза осцилляции, $\varphi_{\min}$
Солнце		$> 10^6$
Бетельгейзе	(1 : 0 : 0)	$\sim 10^{12}$
SN1987a		$\sim 10^{14}$
AGN, $z = 1$	(1 : 2 : 0)	$10^{11} - 10^{13}$

**Таблица:** Рассматриваемые астрофизические источники.

# Основная часть. Ход работы

- Вероятность перехода:

$$\mathcal{P}_{\alpha \rightarrow \beta} = \sum_k |U_{\alpha k}|^2 |U_{\beta k}|^2 + 2 \operatorname{Re} \sum_{k>j} U_{\alpha k}^* U_{\beta k} U_{\alpha j} U_{\beta j}^* e^{-i \frac{\Delta m_{jk}^2}{2E} L}$$

Источник	Ароматовый состав при рождении, ( $\nu_e : \nu_\mu : \nu_\tau$ )	Фаза осцилляции, $\varphi_{\min}$
Солнце		$> 10^6$
Бетельгейзе	(1 : 0 : 0)	$\sim 10^{12}$
SN1987a		$\sim 10^{14}$
AGN, $z = 1$	(1 : 2 : 0)	$10^{11} - 10^{13}$

**Таблица:** Рассматриваемые астрофизические источники.

- Приближение Грибова-Понтекорво:

$$\langle \mathcal{P}_{\alpha \rightarrow \beta} \rangle = \sum_j |U_{\alpha j}|^2 |U_{\beta j}|^2$$

# Основная часть. Ход работы

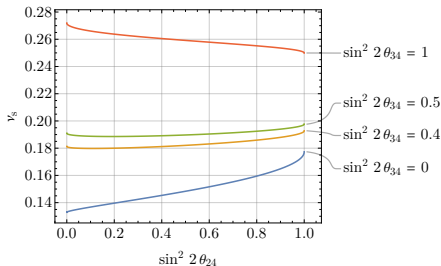
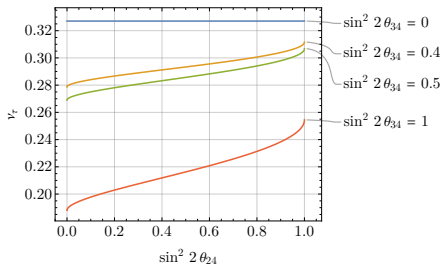
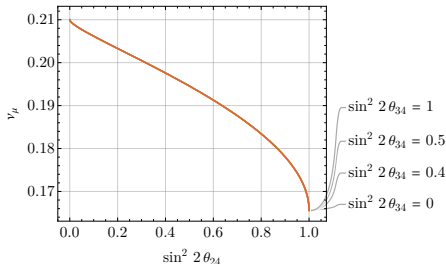
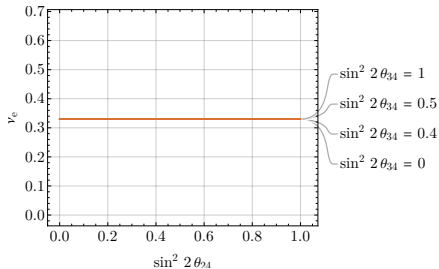


Рис.: Состав при рождении  $\nu_e : \nu_\mu : \nu_\tau = 1 : 0 : 0$

# Основная часть. Ход работы

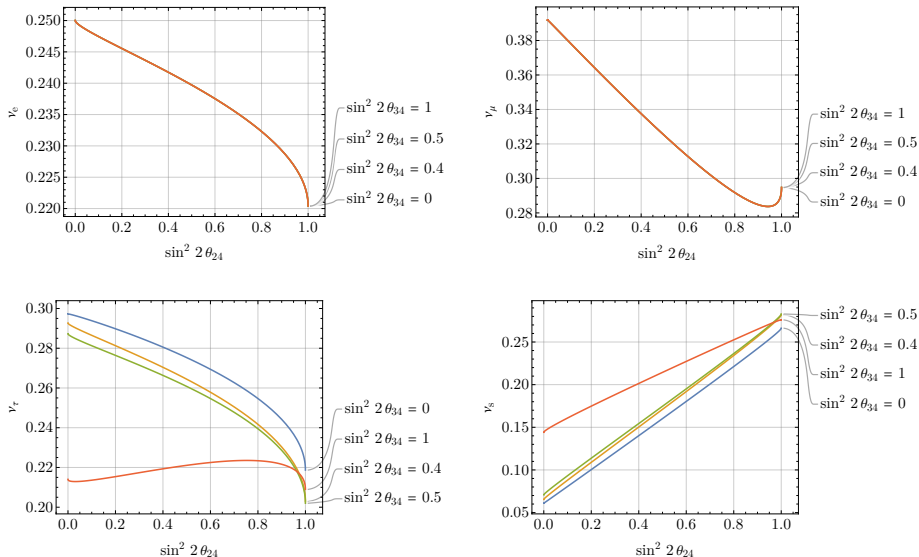


Рис.: Состав при рождении  $\nu_e : \nu_\mu : \nu_\tau = 1 : 2 : 0$

## Основная часть. Ход работы

$\Delta m_{14}^2$	$\sin^2 2\theta_{14}$	$\sin^2 2\theta_{24}$	$\sin^2 2\theta_{34}$
10 эВ <sup>2</sup>	0.380	0.006	0.400

**Таблица:** Предполагаемые параметры стерильного нейтрино.

$\nu_e : \nu_\mu : \nu_\tau$	$3 \times 3$	$4 \times 4$
1 : 0 : 0	(0.55, 0.20, 0.25)	(0.33, 0.21, 0.28, 0.18)
1 : 2 : 0	(0.32, 0.34, 0.34)	(0.25, 0.39, 0.29, 0.07)

**Таблица:** Сравнение потоков нейтрино.



# Заключение. Итоги

- Изучена элементарная теория нейтринных осцилляций

# Заключение. Итоги

- Изучена элементарная теория нейтринных осцилляций
- Изучена параметризация матрицы смешивания

# Заключение. Итоги

- Изучена элементарная теория нейтринных осцилляций
- Изучена параметризация матрицы смешивания
- Приближение Грибова-Понтекорво, анализ экспериментов, оценка параметров стерильного нейтрино

# Заключение. Итоги

- Изучена элементарная теория нейтринных осцилляций
- Изучена параметризация матрицы смешивания
- Приближение Грибова-Понтекорво, анализ экспериментов, оценка параметров стерильного нейтрино
- Влияние стерильного нейтрино:

# Заключение. Итоги

- Изучена элементарная теория нейтринных осцилляций
- Изучена параметризация матрицы смешивания
- Приближение Грибова-Понтекорво, анализ экспериментов, оценка параметров стерильного нейтрино
- Влияние стерильного нейтрино:
  - Значительное уменьшение электронной компоненты для инъекции  $1 : 0 : 0$

# Заключение. Итоги

- Изучена элементарная теория нейтринных осцилляций
- Изучена параметризация матрицы смешивания
- Приближение Грибова-Понтекорво, анализ экспериментов, оценка параметров стерильного нейтрино
- Влияние стерильного нейтрино:
  - Значительное уменьшение электронной компоненты для инъекции  $1 : 0 : 0$
  - Возрастание отношения  $\frac{\nu_\mu}{\nu_e + \nu_\tau}$  для инъекции  $1 : 2 : 0$

	$3 \times 3$	$4 \times 4$
$\frac{\nu_\mu}{\nu_e + \nu_\tau}$	0.51	0.63

