

**Результат эксперимента Нейтрино-4,  
стерильные нейтрино, темная материя ,  
Стандартная Модель с правыми нейтрино,  
иерархия нейтринных масс и CP-нарушение**

**А. П. Серебров**

**Серебров А.П., Жеребцов О.М., Самойлов Р.М., Буданов Н.С.**

*<sup>1</sup>НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ, Гатчина*

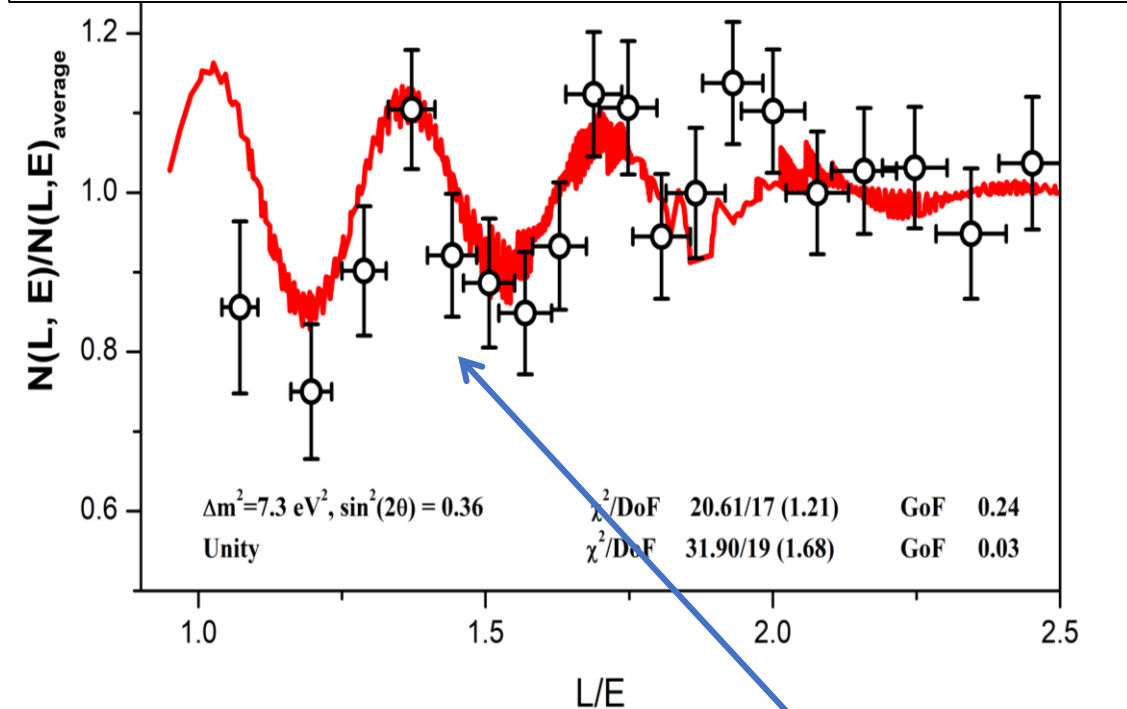
**Объединенный семинар ОФВЭ и ОТФ ПИЯФ 11-00 22 февраля 2024 Гатчина**

# Эффект осцилляций в эксперименте «Нейтрино-4»

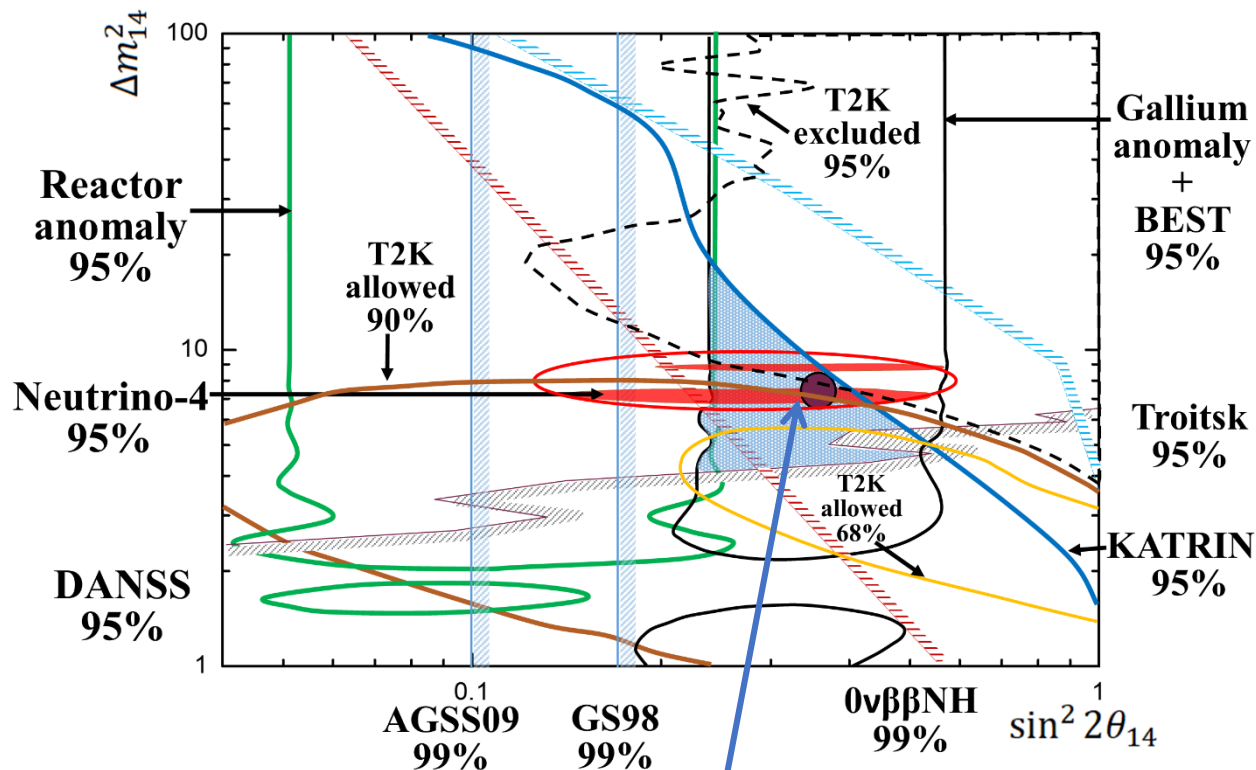
$$\Delta m_{14}^2 = (7.3 \pm 0.13_{st} + 1.16_{sys}) eV^2$$

$$\sin^2 2\theta_{14} = 0.36 \pm 0.12_{stat} (2.9\sigma).$$

$$P(\tilde{\nu}_e \rightarrow \tilde{\nu}_e) = 1 - \sin^2 2\theta_{14} \sin^2 \left( 1.27 \frac{\Delta m_{14}^2 [eV^2] L [m]}{E_{\tilde{\nu}} [MeV]} \right)$$



# Сравнение результатов эксперимента «Нейтрино-4» с результатами других экспериментов



$$m_4 = 2.7 \pm 0.2 eV$$

$$\Delta m_{14}^2 = 7.3 eV^2, \sin^2 2\theta_{14} = 0.36$$

A. P. Serebrov, et al, JETP, 2023, Vol. 137, No. 1, pp. 55–70.

# Анализ результатов эксперимента «Нейтрино-4» совместно с другими экспериментами по поиску стерильных нейтрино в рамках модели нейтрино 3+1

## **Выводы представленного анализа.**

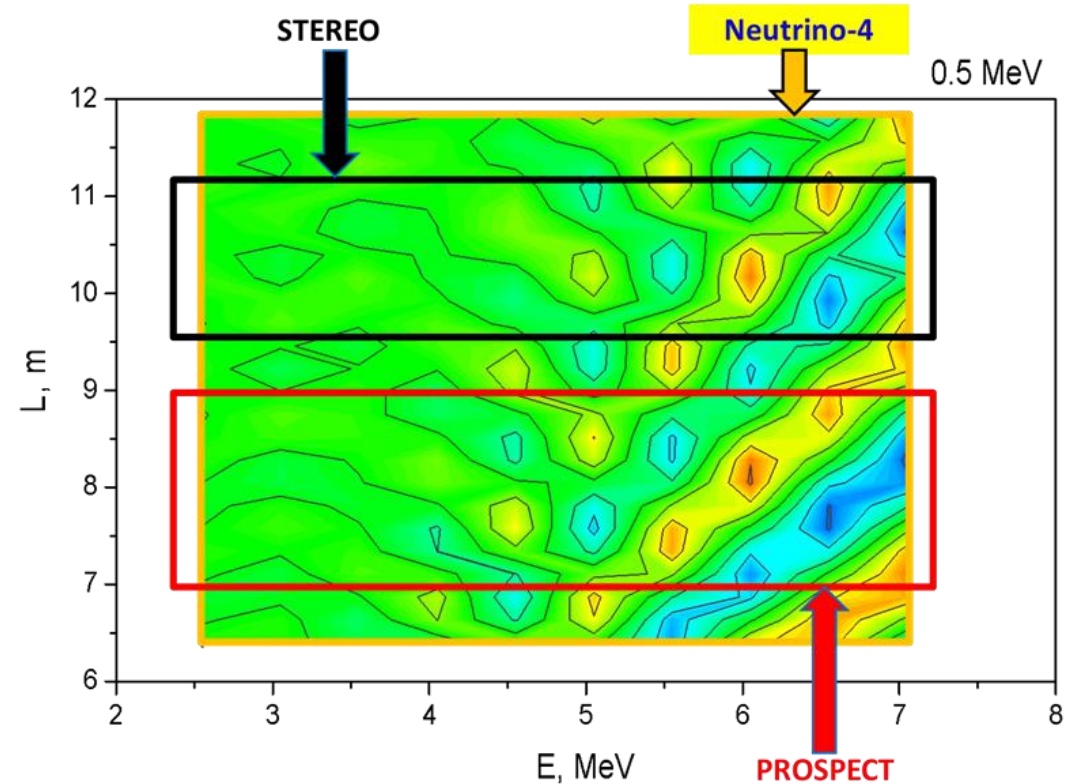
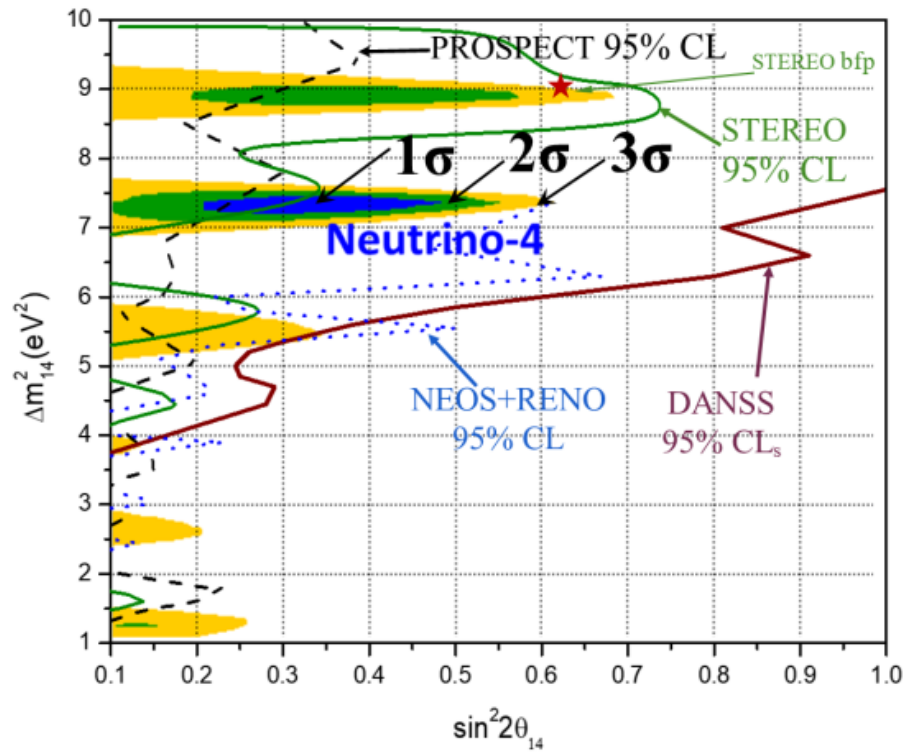
Результат Нейтрино-4 не закрыт другими экспериментами, и есть вопросы к некоторым из экспериментов.

A. P. Serebrov, et al, JETP, 2023,  
Vol. 137, No. 1, pp. 55–70.

1. Эксперименты СТЕРЕО, ПЕРСПЕКТИВА для корректного сравнения результатов с результатами эксперимента Нейтрино-4 необходимо рассматривать данные в виде зависимости  $L/E$ . (Недостаточно точности, чтобы опровергнуть).
2. Реакторная антинейтринная аномалия (RAA) (Требуется дальнейший анализ, включая энерговыделение реактора) Учет энергии, уносимой антинейтрино? Это 5%. Остаточная мощность после выключения реактора составляет 5%.
3. Солнечная модель. (Недостаточно точности, чтобы опровергнуть)

# Сравнение результатов Нейтрино-4 с результатами PROSPECT, STEREO, Эксперименты DANSS и NEOS

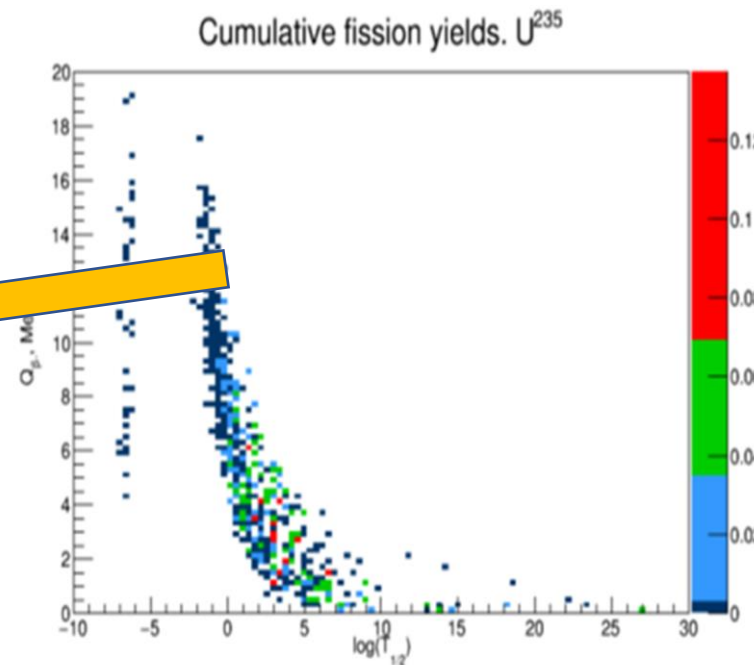
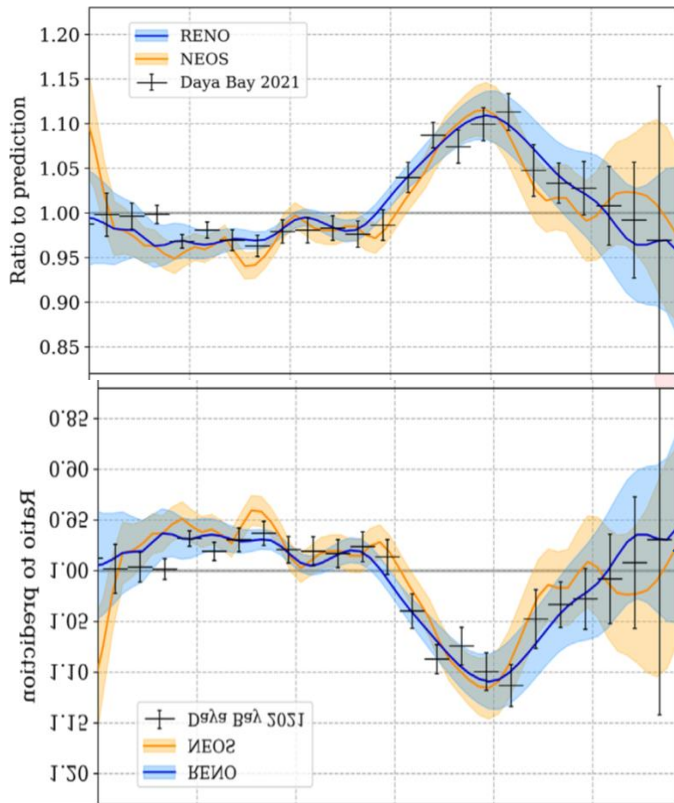
(Оснований говорить о закрытии результата эксперимента «Нейтрино-4» недостаточно.)



Эксперименты STEREO и PROSPECT должны представлять данные в виде зависимости  $L/E$ , чтобы корректно сравнивать их результаты с результатами эксперимента «Нейтрино-4». Только тогда можно будет говорить о закрытии результата эксперимента «Нейтрино-4».

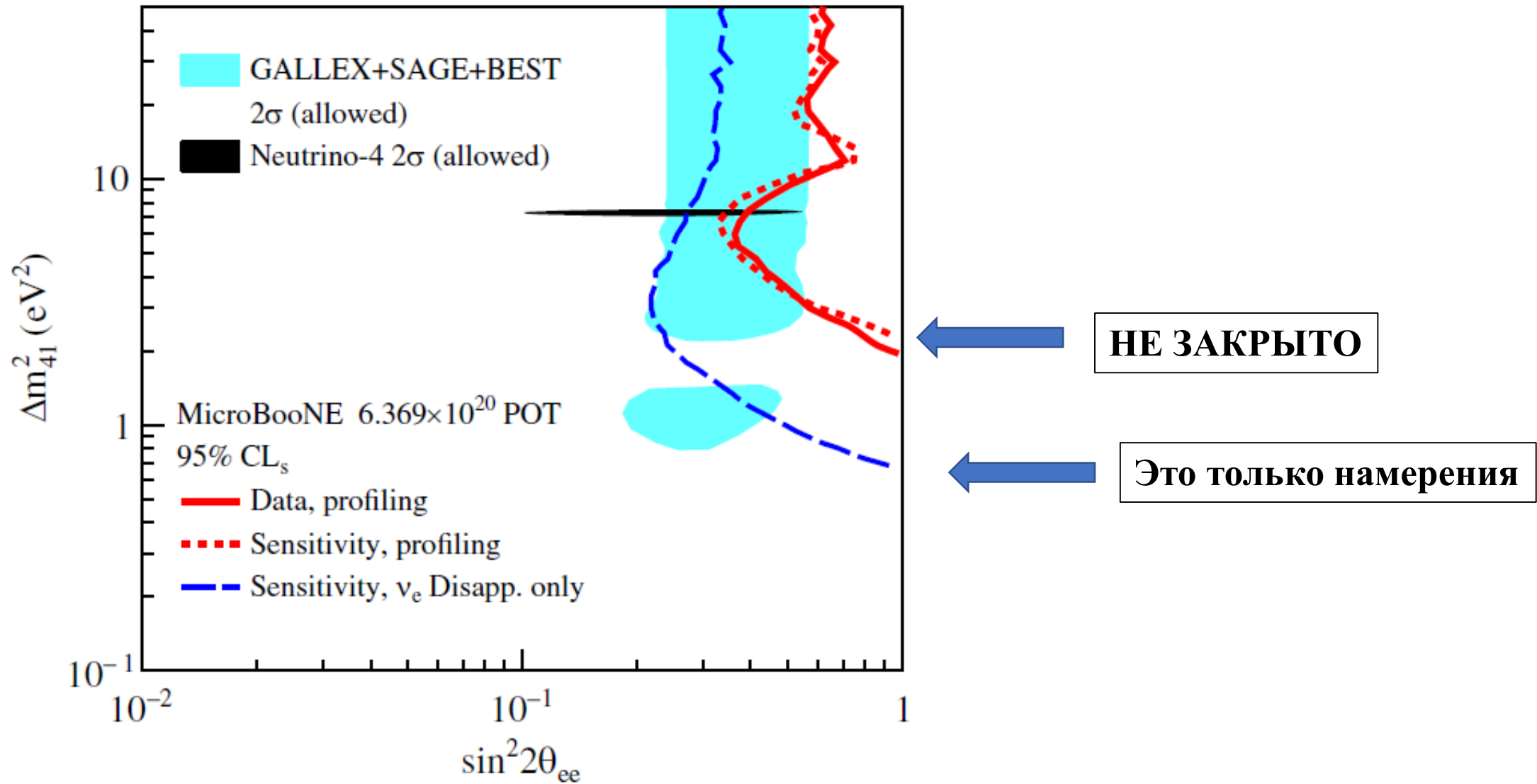
1. Например, энергия, уносимая антинейтрино, составляет 5%, но в публикациях нет указаний, что этот эффект был учтен.
2. Кроме того, остаточная мощность реактора сразу после выключения реактора составляет 5%, но этот вопрос также не обсуждается.

3. Есть неучтенные бета-распады с коротким временем жизни и высокой энергией распада, т.к. имеется искажение спектра по отношению к расчётному спектру. Оно даёт дефицит около 5%.

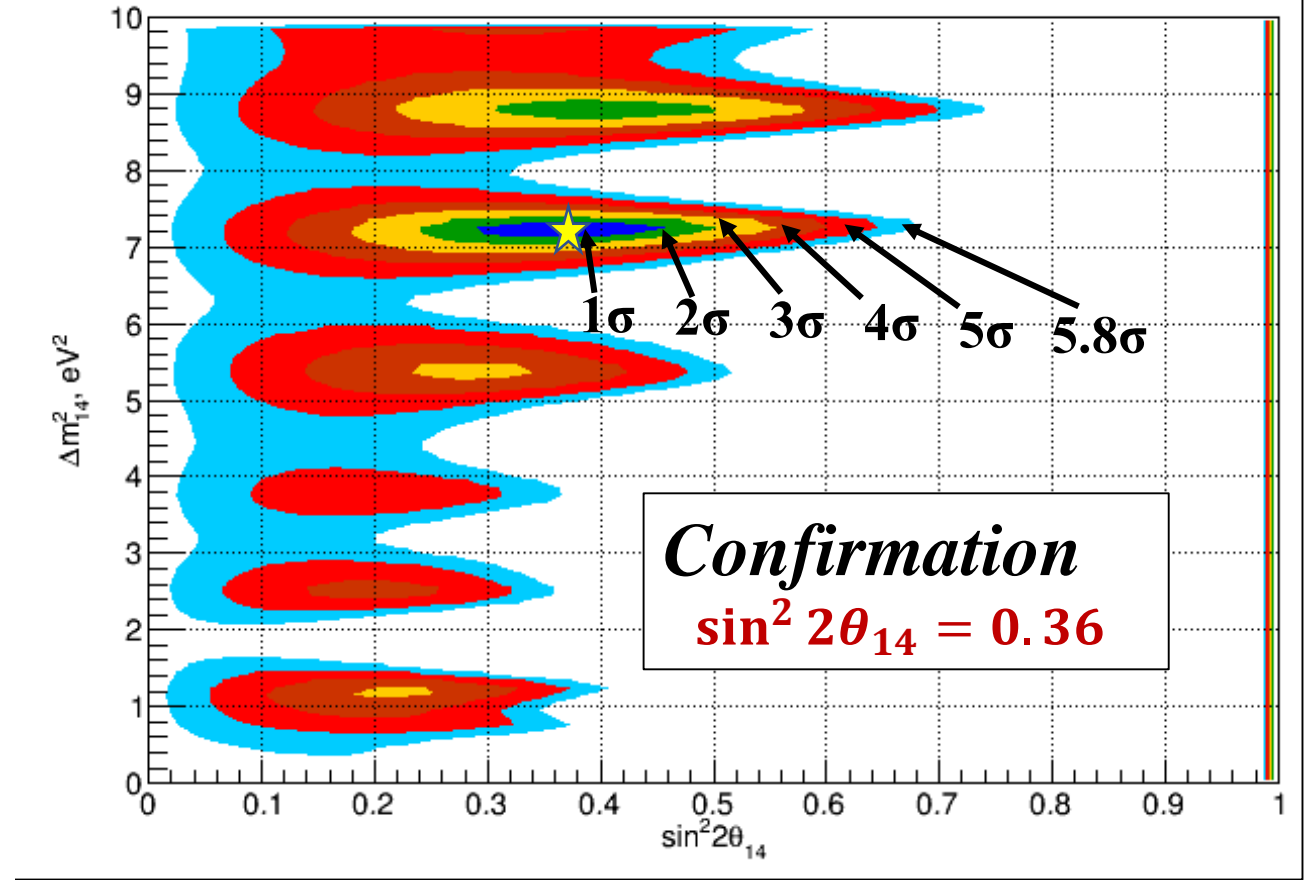
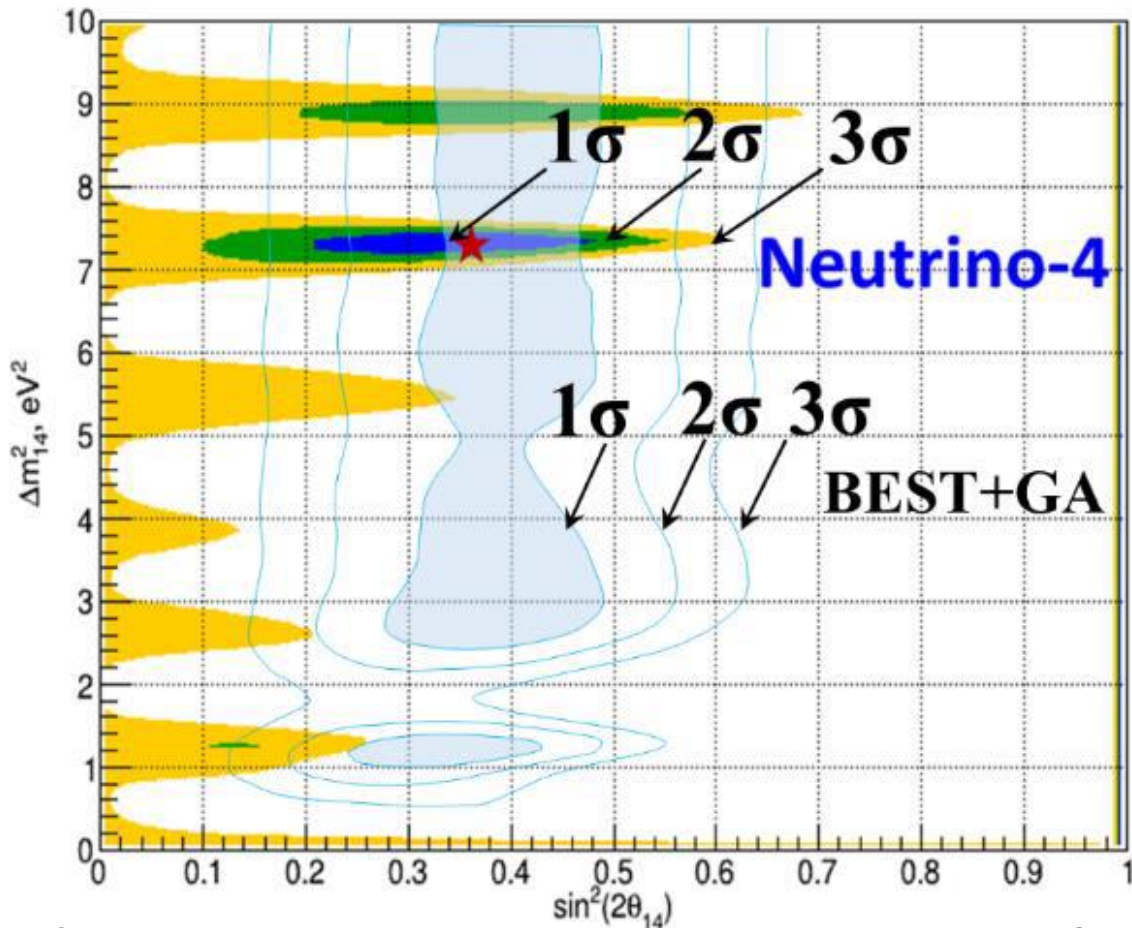


Это яма, которая указывает на то, что не учтены короткоживущие изотопы с высокой энергией распада.

# Сравнение результатов Нейтрино-4 с нейтринными результатами на ускорителях



# Сравнение результатов эксперимента «Нейтрино-4» с галлиевой аномалией (ГА)



Слева – сравнение результата эксперимента BEST с ГА и результата эксперимента «Нейтрино-4». Справа – результат совместного анализа GA, BEST и Neutrino-4, где синим цветом обозначена область с CL 1σ, зеленым – 2σ, желтым – 3σ, темно-красным – 4σ, красным – 5σ и синим – 5,8σ. .

Результаты прямых экспериментов по поиску стерильных нейтрино – Neutrino-4 и BEST с GA указывают на существование стерильных нейтрино с осцилляционными параметрами:  $\Delta m_{14}^2 = 7.3 \text{ eV}^2$ ,  $\sin^2 2\theta_{14} = 0.36$ ,  $m_4 = 2.7 \pm 0.2 \text{ eV}$

## Эксперимент Нейтрино-4 и эксперимент BEST с ГА

Результаты прямых экспериментов по поиску стерильных нейтрино — Нейтрино-4 и BEST с ГА указывают на существование стерильного нейтрино с осцилляционными параметрами:

$$\Delta m_{14}^2 = 7.3 \text{ eV}^2, \sin^2 2\theta_{14} = 0.36$$

Подтверждение:  $\sin^2 2\theta_{14} = 0.36$  (5.8 $\sigma$ )

**Однако, необходимы новые подтверждения!**



# Два важных последствия для физики элементарных частиц из результата Нейтрино-4

1. Эффективная масса электронного нейтрино:  $m_{4\nu_e}^{eff} = (0.82 \pm 0.18)eV$ , ( $m_4 = 2.7 \pm 0.2 eV$ )
2. Майорановское или дираковское нейтрино? Более вероятно – нейтрино Дирака!

$$m_{4\nu_e}^{eff} = \sqrt{\sum m_i^2 |U_{ei}|^2}; \quad \sin^2 2\theta_{14} \approx 4|U_{14}|^2;$$

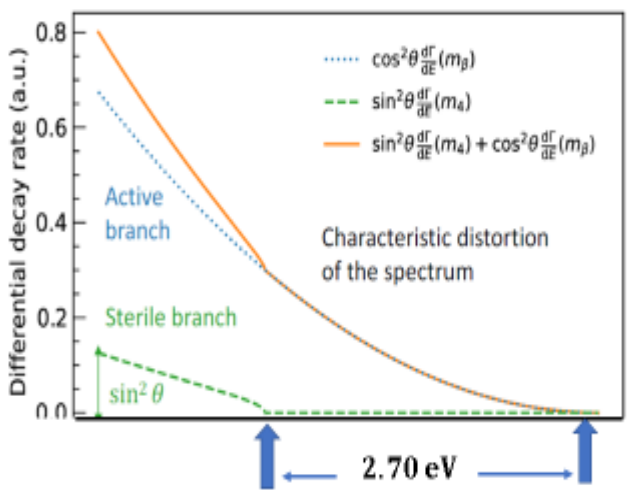
$$m_{4\nu_e}^{eff} \approx \sqrt{m_4^2 |U_{e4}|^2} \approx \frac{1}{2} \sqrt{m_4^2 \sin^2 2\theta_{14}}$$

$$m_4 = (2.70 \pm 0.22)eV$$

$$\sin^2 2\theta_{14} \approx 0.35 \pm 0.07 (4.9\sigma)$$

Effective mass of an electron neutrino from the Neutrino-4 experiment

$$m_{4\nu_e}^{eff} = (0.82 \pm 0.18)eV$$



Comparison with neutrino mass constraints from experiments searching for double beta decay without neutrinos

$$m(0\nu\beta\beta) = (0.25 \pm 0.09)eV$$

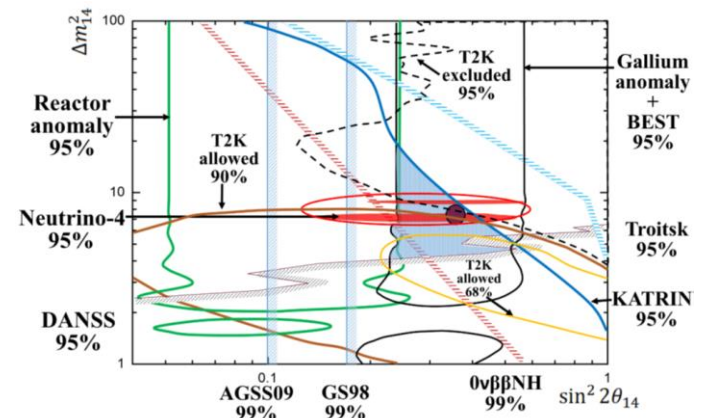
our estimation

$$m(0\nu\beta\beta) \approx m_4 U_{14}^2$$

$$m(0\nu\beta\beta) < [0.080 - 0.182]eV$$

experiments

The best weight limits for Majorana were obtained in the GERDA experiment. The value obtained with the Neutrino-4 oscillation parameters is  $m(0\nu\beta\beta) = (0.25 \pm 0.09) eV$ , which is three times the limit declared by the GERDA experiment. This is a significant discrepancy, but it is too early to draw reliable conclusions. If in the future the Majorana mass limit of the double beta decay experiment is lowered and the result of the Neutrino-4 experiment is confirmed, this will close the hypothesis that the neutrino is a Majorana-type particle.



**Effective mass of an electron neutrino from the Neutrino-4 experiment**

$$m_{4\nu_e}^{eff} = \sqrt{\sum m_i^2 |U_{ei}|^2}; \quad \sin^2 2\theta_{14} \approx 4|U_{14}|^2;$$

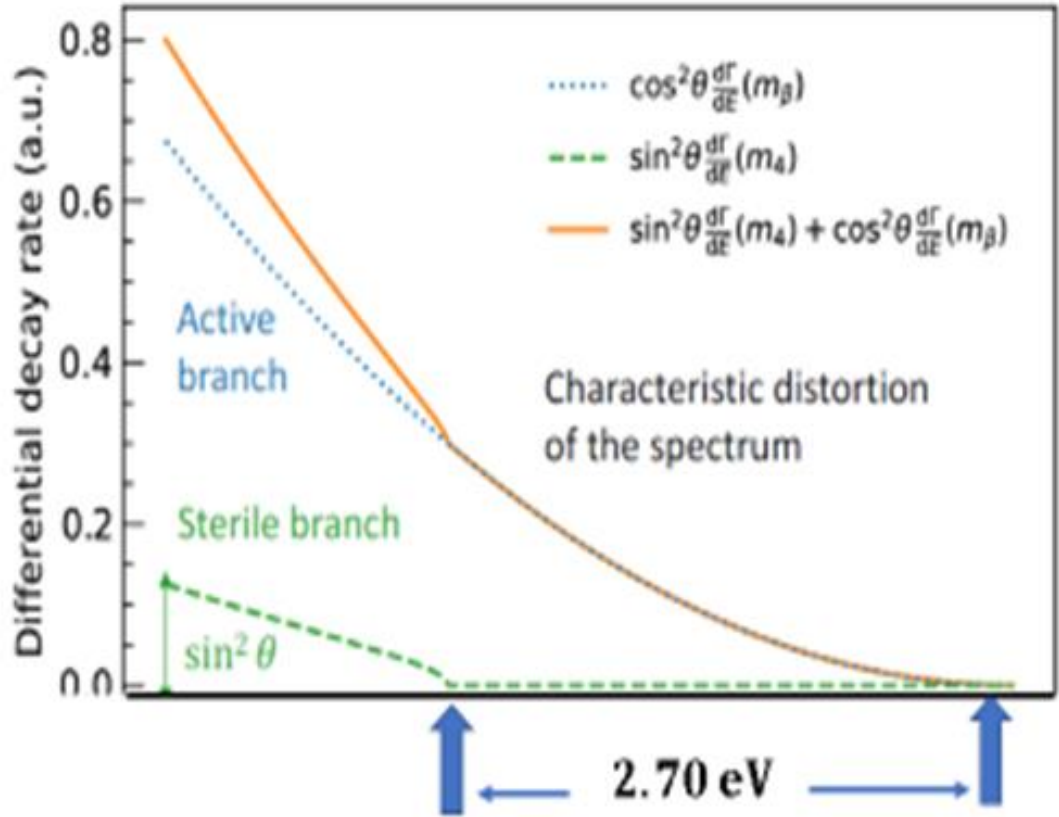
$$m_{4\nu_e}^{eff} = (0.82 \pm 0.18) \text{ eV}$$

$$m_{4\nu_e}^{eff} \approx \sqrt{m_4^2 |U_{e4}|^2}$$

$$\approx \frac{1}{2} \sqrt{m_4^2 \sin^2 2\theta_{14}}$$

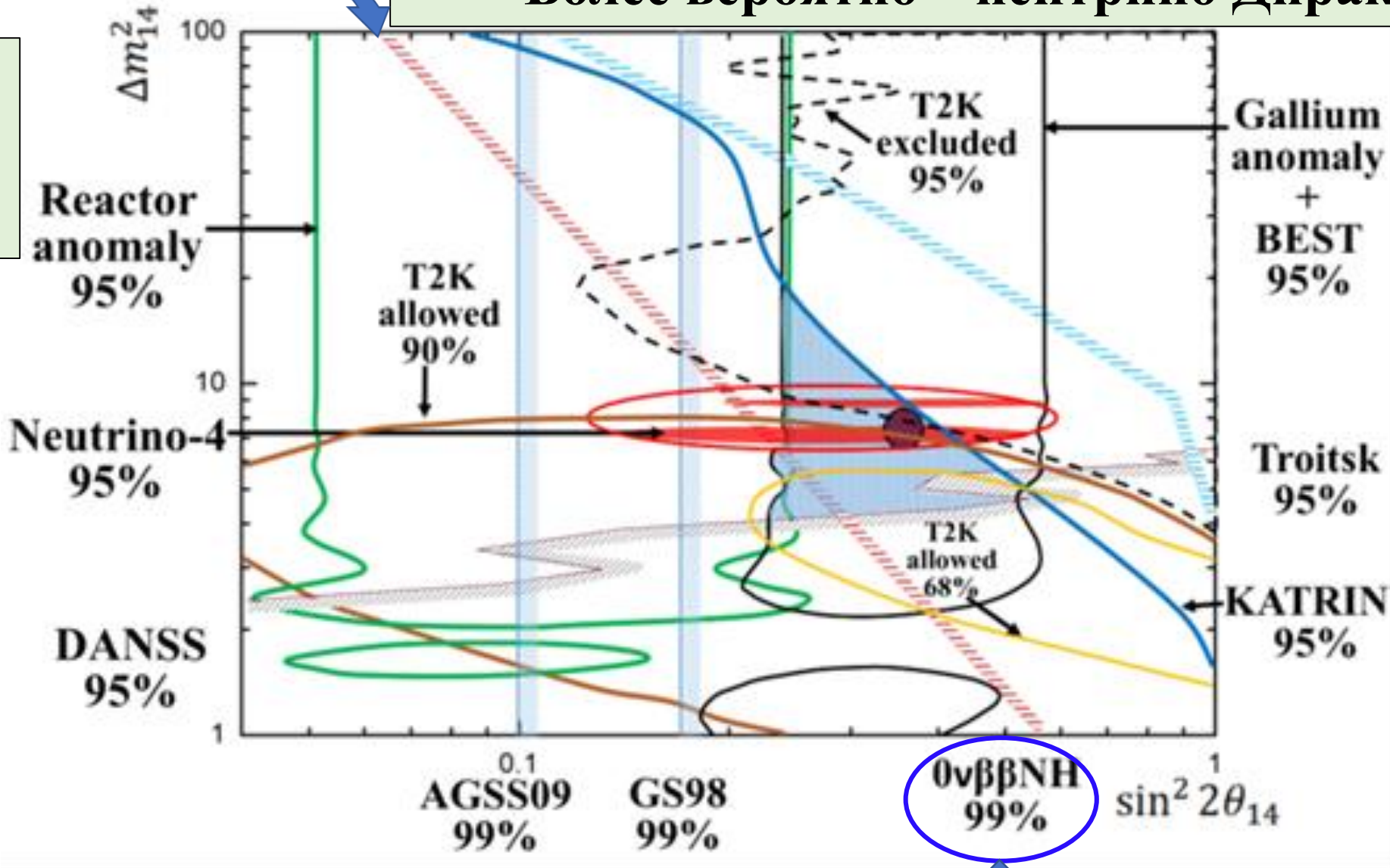
$$m_4 = (2.70 \pm 0.22) \text{ eV}$$

$$\sin^2 2\theta_{14} \approx 0.35 \pm 0.07 (4.9\sigma)$$



# Майорановское или дираковское нейтрино? Более вероятно – нейтрино Дирака!

Двойной  
 Бета Распад  
 Без нейтрино



Double Beta Decay

# Космология и стерильные нейтрино

Serebrov, A.P., Samoilov, R.M., Chaikovskii, M.E.,  
Zherebtsov, O.M., Result of the Neutrino-4 Experiment  
and the Cosmological Constraints on the Sterile Neutrino  
(Brief Review) JETP Letters , 2022, 116(10), стр. 669–  
682

# 3+1 neutrino model and cosmology

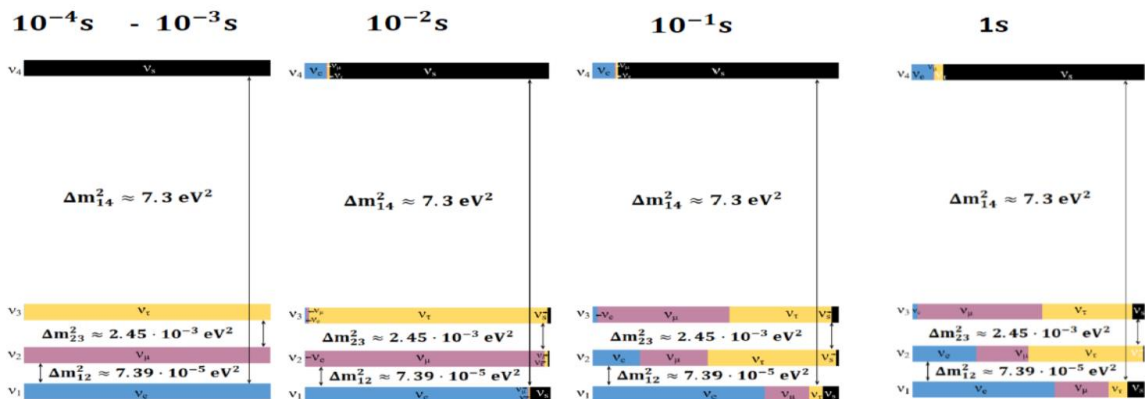
$$\begin{bmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \\ \nu_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} & U_{e4} \\ U_{\mu1} & U_{\mu2} & U_{\mu3} & U_{\mu4} \\ U_{\tau1} & U_{\tau2} & U_{\tau3} & U_{\tau4} \\ U_{s1} & U_{s2} & U_{s3} & U_{s4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \\ \nu_4 \end{bmatrix} \quad \begin{aligned} |U_{e4}|^2 &= \sin^2(\theta_{14}) \\ |U_{\mu4}|^2 &= \sin^2(\theta_{24}) \cdot \cos^2(\theta_{14}) \\ |U_{\tau4}|^2 &= \sin^2(\theta_{34}) \cdot \cos^2(\theta_{24}) \cdot \cos^2(\theta_{14}) \end{aligned}$$

$$P_{\nu_e \nu_e} = 1 - 4|U_{e4}|^2(1 - |U_{e4}|^2) \sin^2\left(\frac{\Delta m_{14}^2 L}{4E_{\nu_e}}\right) = 1 - \sin^2 2\theta_{ee} \sin^2\left(\frac{\Delta m_{14}^2 L}{4E_{\nu_e}}\right)$$

$$P_{\nu_\mu \nu_\mu} = 1 - 4|U_{\mu4}|^2(1 - |U_{\mu4}|^2) \sin^2\left(\frac{\Delta m_{14}^2 L}{4E_{\nu_\mu}}\right) = 1 - \sin^2 2\theta_{\mu\mu} \sin^2\left(\frac{\Delta m_{14}^2 L}{4E_{\nu_\mu}}\right)$$

$$P_{\nu_\mu \nu_e} = 4|U_{e4}|^2|U_{\mu4}|^2 \sin^2\left(\frac{\Delta m_{14}^2 L}{4E_{\nu_e}}\right) = \sin^2 2\theta_{\mu e} \sin^2\left(\frac{\Delta m_{14}^2 L}{4E_{\nu_e}}\right)$$

$$U_{PMNS}^{(3+1)} = \begin{pmatrix} 0.782^{+0.017}_{-0.016} & 0.524^{+0.017}_{-0.016} & 0.148^{+0.004}_{-0.004} & 0.301^{+0.035}_{-0.035} \\ 0.484^{+0.028}_{-0.034} & 0.473^{+0.027}_{-0.036} & 0.732^{+0.016}_{-0.025} & 0.074^{+0.021}_{-0.021} \\ 0.280 \div 0.330 & 0.678 \div 0.705 & 0.622 \div 0.657 & 0 \div 0.194 \\ 0.210 \div 0.273 & 0.060 \div 0.203 & 0.104 \div 0.236 & 0.931 \div 0.951 \end{pmatrix}$$



## The neutrino potential in cosmic plasma

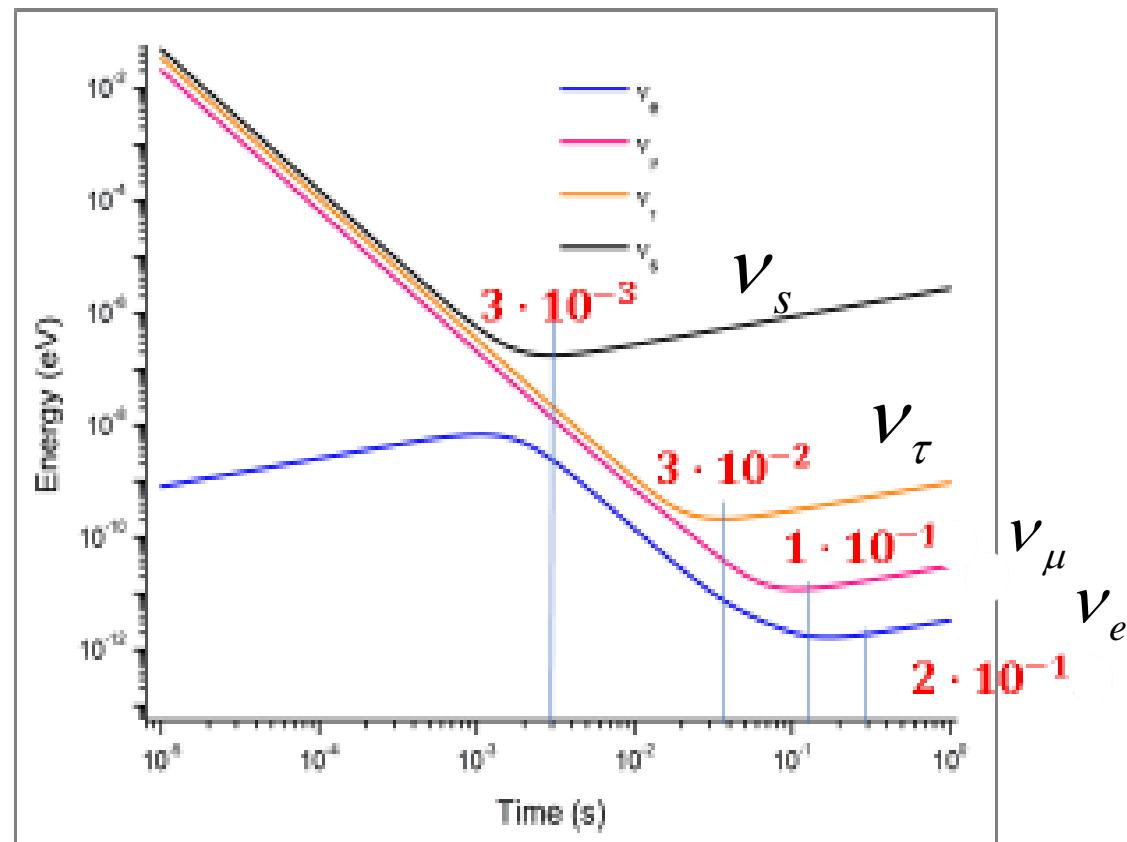
$$V = \pm C_1 \cancel{\eta} G_F T^3 - C_2 \frac{G_F^2 T^4 E}{\alpha}$$

$$V_e = -3.5 \times 25 \times G_f^2 \times T^4 \times E$$

$$V_\mu = -2 \times 25 \times G_f^2 \times T^4 \times E$$

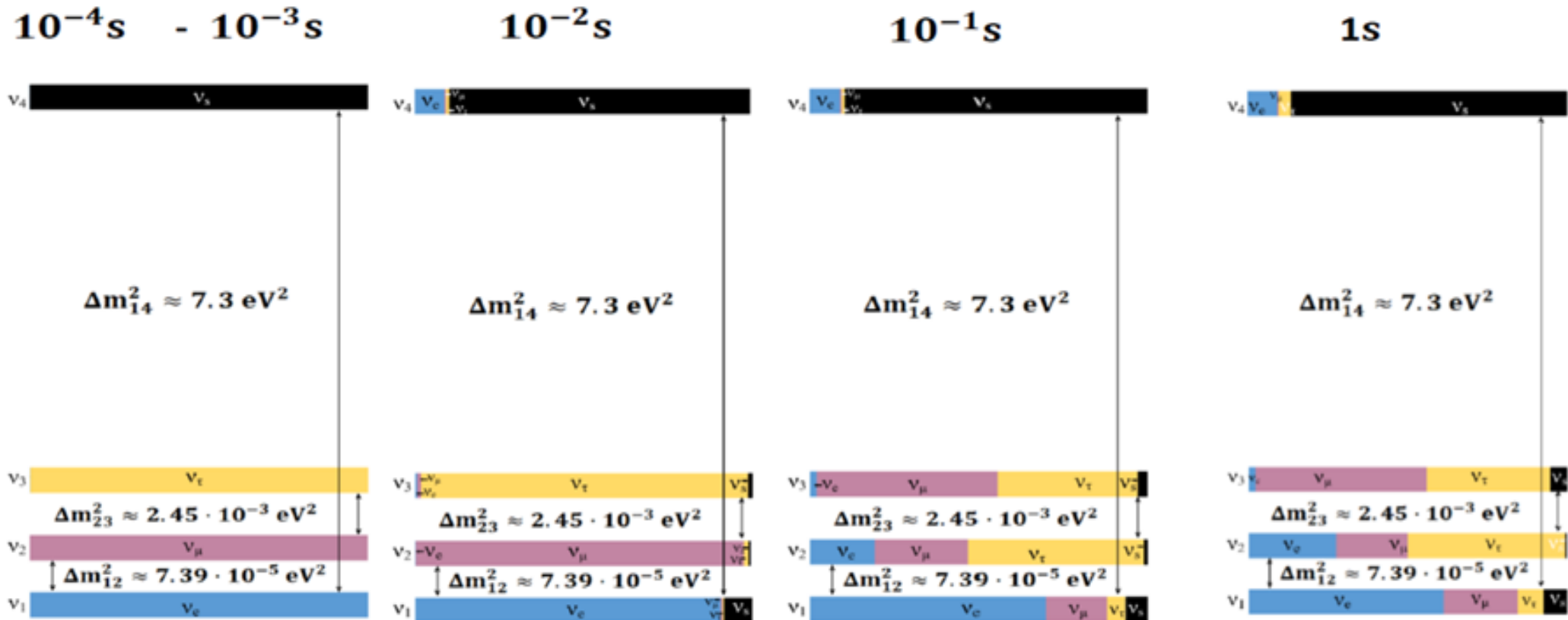
$$V_\tau = -25 \times G_f^2 \times T^4 \times E$$

$$T[\text{eV}] \sim \frac{887734}{\sqrt{t[\text{s}]}}$$

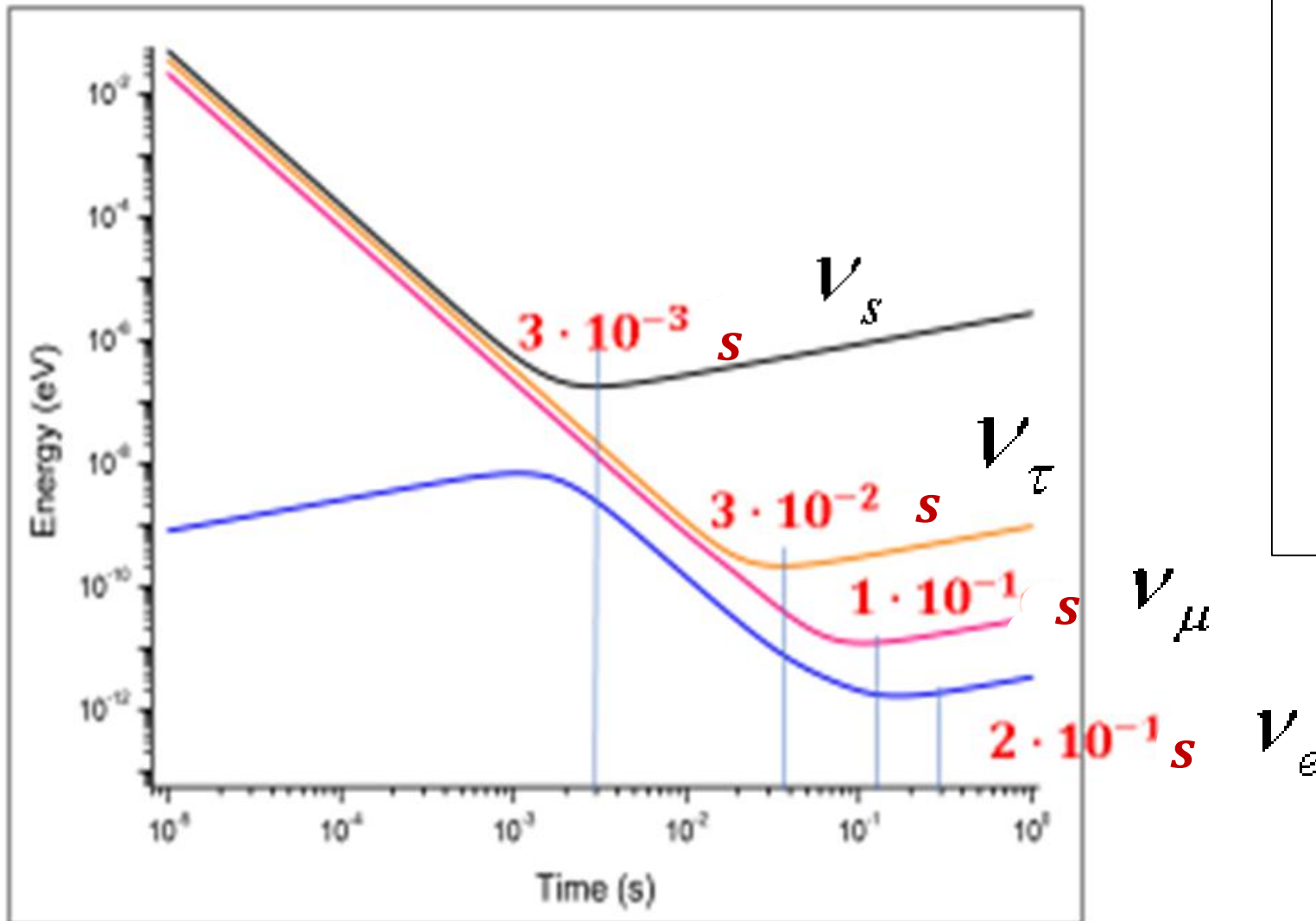


# Поведение смешивания нейтрино в расширяющейся Вселенной

time →



# Поведение адиабатических уровней энергии в расширяющейся Вселенной



For a sterile neutrino,  
at  $3 \cdot 10^{-3}$  s,  
For tau neutrinos,  
at  $3 \cdot 10^{-2}$  s,  
For the muon neutrino,  
at  $1 \cdot 10^{-1}$  s,  
For electron neutrinos,  
at  $2 \cdot 10^{-1}$  s,

# Уравнение рождения и уничтожения стерильных нейтрино

$$\frac{dn_{\nu_s}}{dt} + 3Hn_{\nu_s} = \frac{1}{2} \left( \frac{\sin^2 2\theta_{m14} n_{\nu_e}}{\tau_{\nu_e}} + \frac{\sin^2 2\theta_{m24} n_{\nu_\mu}}{\tau_{\nu_\mu}} + \frac{\sin^2 2\theta_{m34} n_{\nu_\tau}}{\tau_{\nu_\tau}} \right) -$$

$$E = 3.15T \quad H(T) = \frac{T^2}{M_{Pl}^*}$$

$$\frac{1}{2} \left( \frac{\sin^2 2\theta_{m14}}{\tau_{\nu_e}} + \frac{\sin^2 2\theta_{m24}}{\tau_{\nu_\mu}} + \frac{\sin^2 2\theta_{m34}}{\tau_{\nu_\tau}} \right) n_{\nu_s}$$

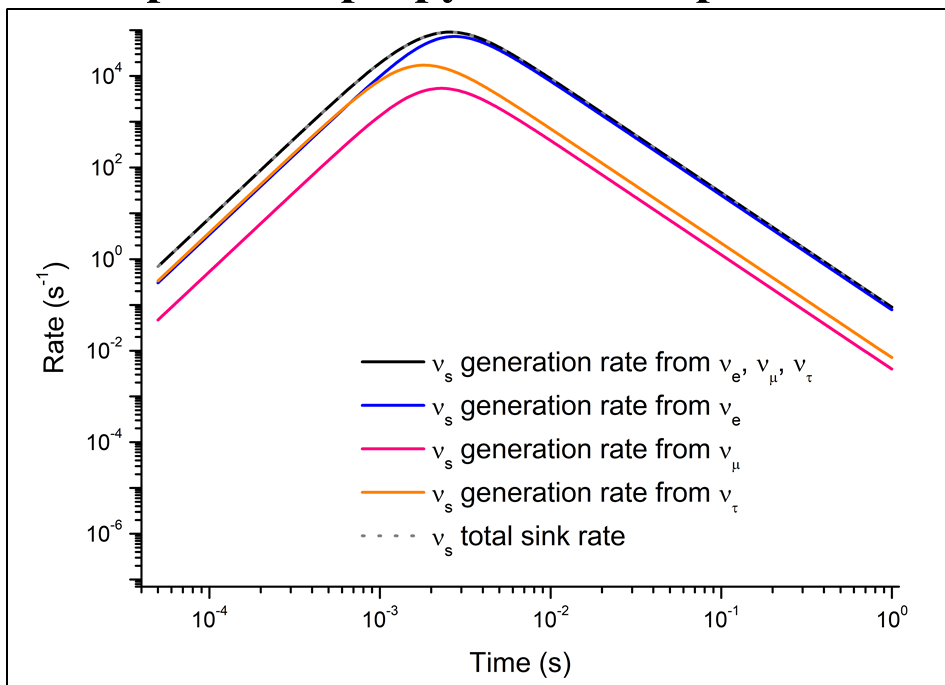
$$T[\text{eV}] \sim \frac{887734}{\sqrt{t[\text{s}]}}$$

$$\frac{1}{\tau_{\nu_e}} = \Gamma_{\nu_e} = \frac{137\pi}{9 \cdot 24} G_f^2 T^4 E$$

$$\frac{1}{\tau_{\nu_\mu}} = \frac{1}{\tau_{\nu_\tau}} = \Gamma_{\nu_\mu} = \frac{7\pi}{24} G_f^2 T^4 E$$

Генерация и разрушение стерильных нейтрино

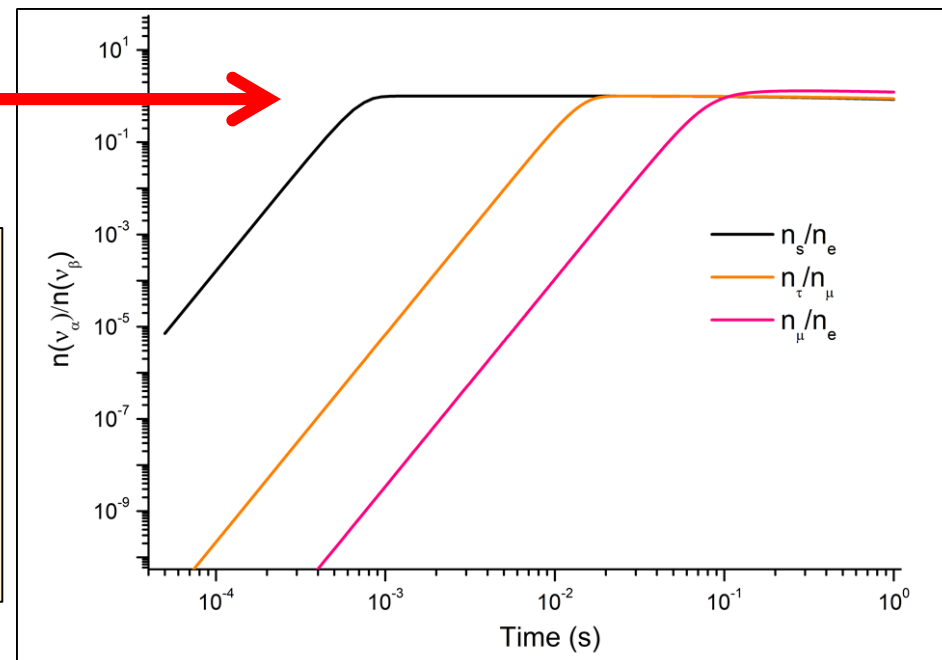
Плотности нейтрино разных типов одинаковы.



$$n_{\nu_s} / n_{\nu_e} = 1$$

**Thermalization  
of sterile neutrinos**

$$\Delta m_{14}^2 = 7.3 \text{ eV}^2, \quad \sin^2 2\theta_{14} = 0.36$$





## РЕЗУЛЬТАТ

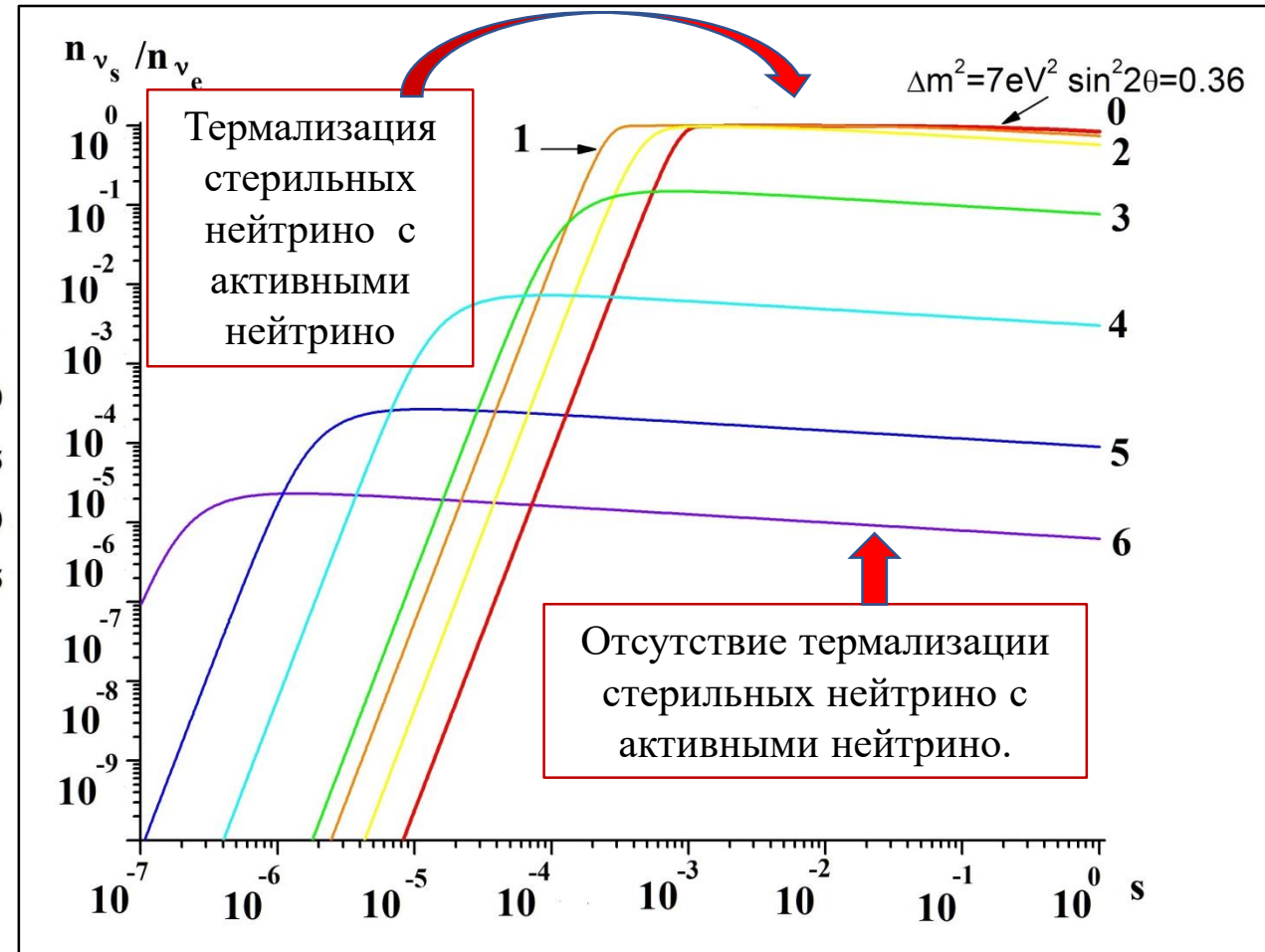
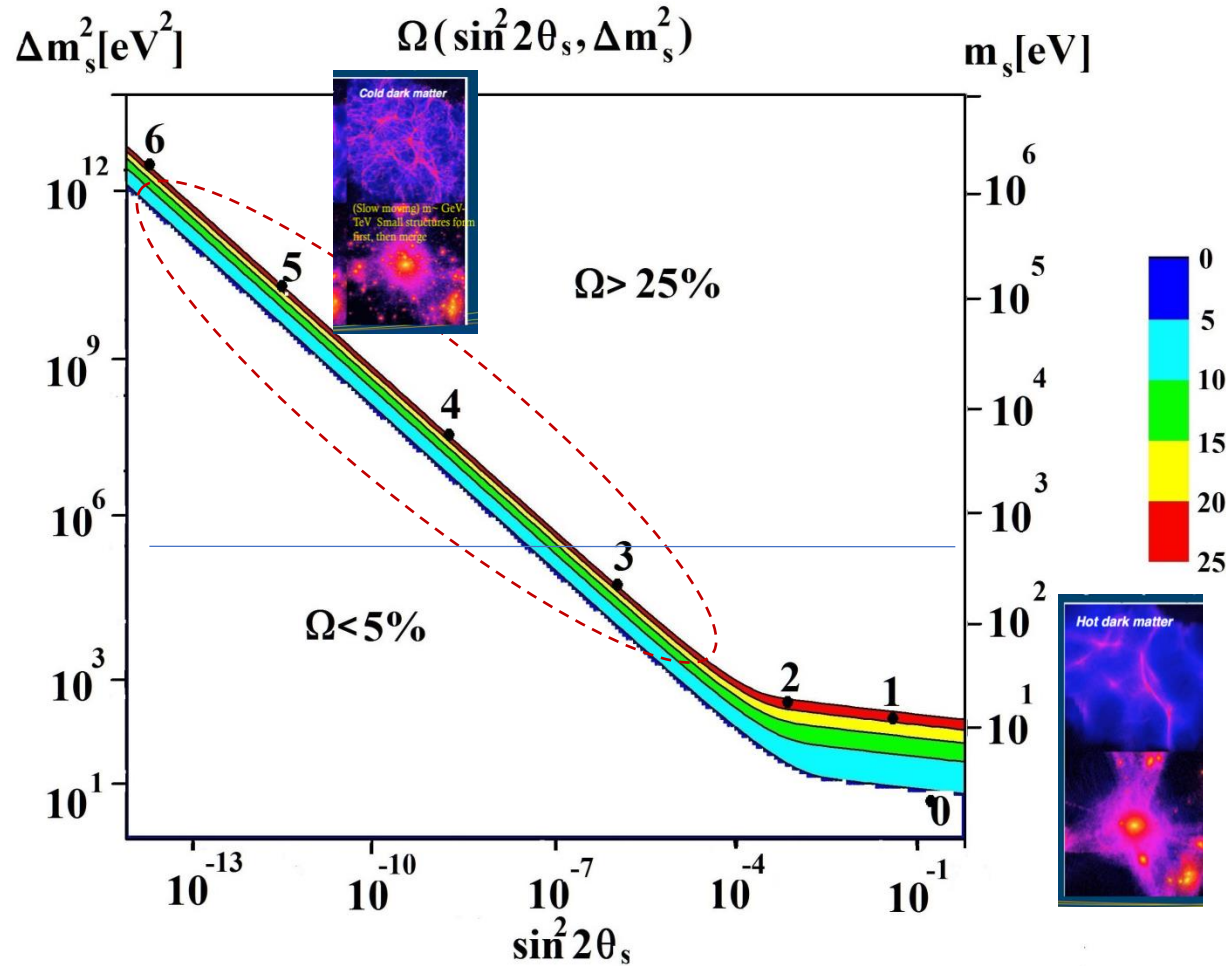
### Вклад стерильного нейтрино к плотности энергии Вселенной

$$\Omega_{\nu_4} \approx (\sum m_{\nu_i} / 1\text{eV}) 0.01 h^{-2} \cdot n_{\nu_4} m_{\nu_4} / \sum (n_{\nu_i} m_{\nu_i})$$

$$n_{\nu_i} = n_{\nu_e}, \quad \sum (n_{\nu_i} m_{\nu_i}) = n_{\nu_e} \sum m_{\nu_i}$$

$$\Omega_{\nu_4} \approx (2.7\text{eV} / 1\text{eV}) \cdot 0.01 h^{-2} \cdot n_{\nu_4} / n_{\nu_e} = 5\%$$

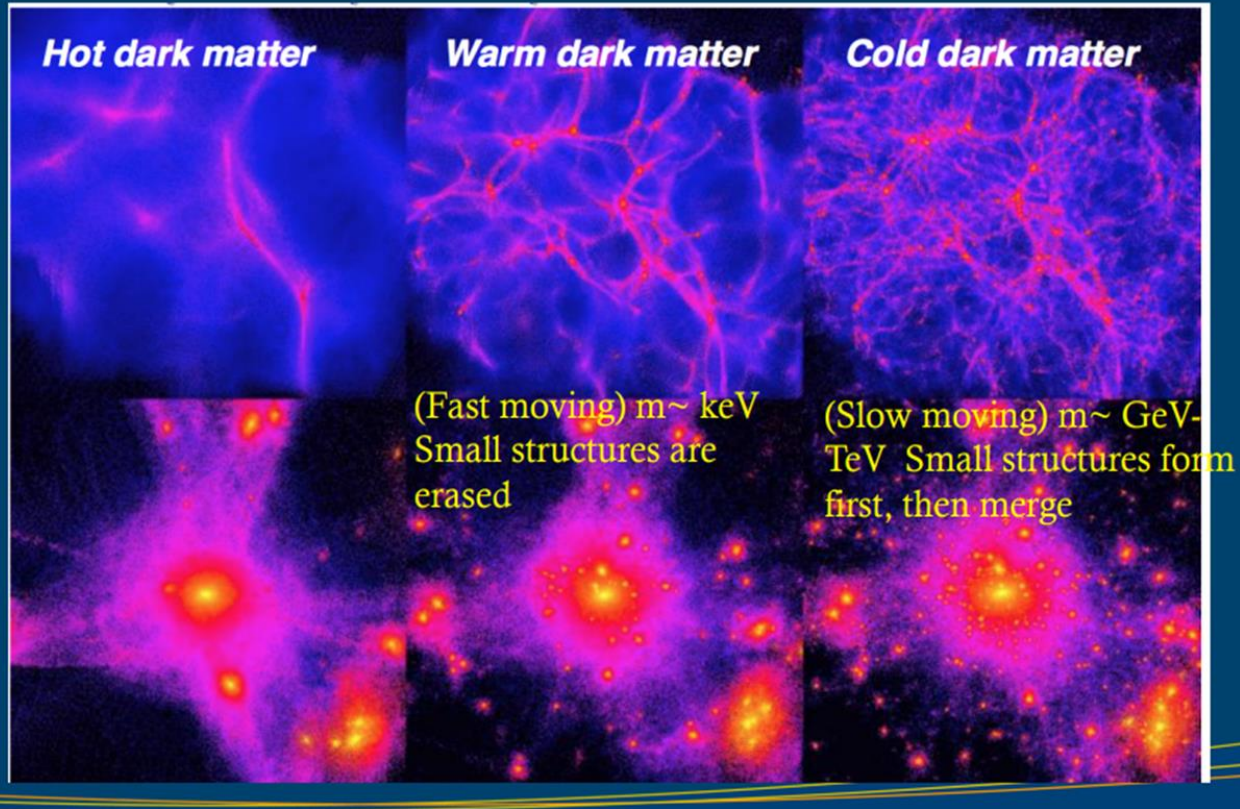
# Тяжелые стерильные (правые) нейтрино с очень малыми углами смешивания.



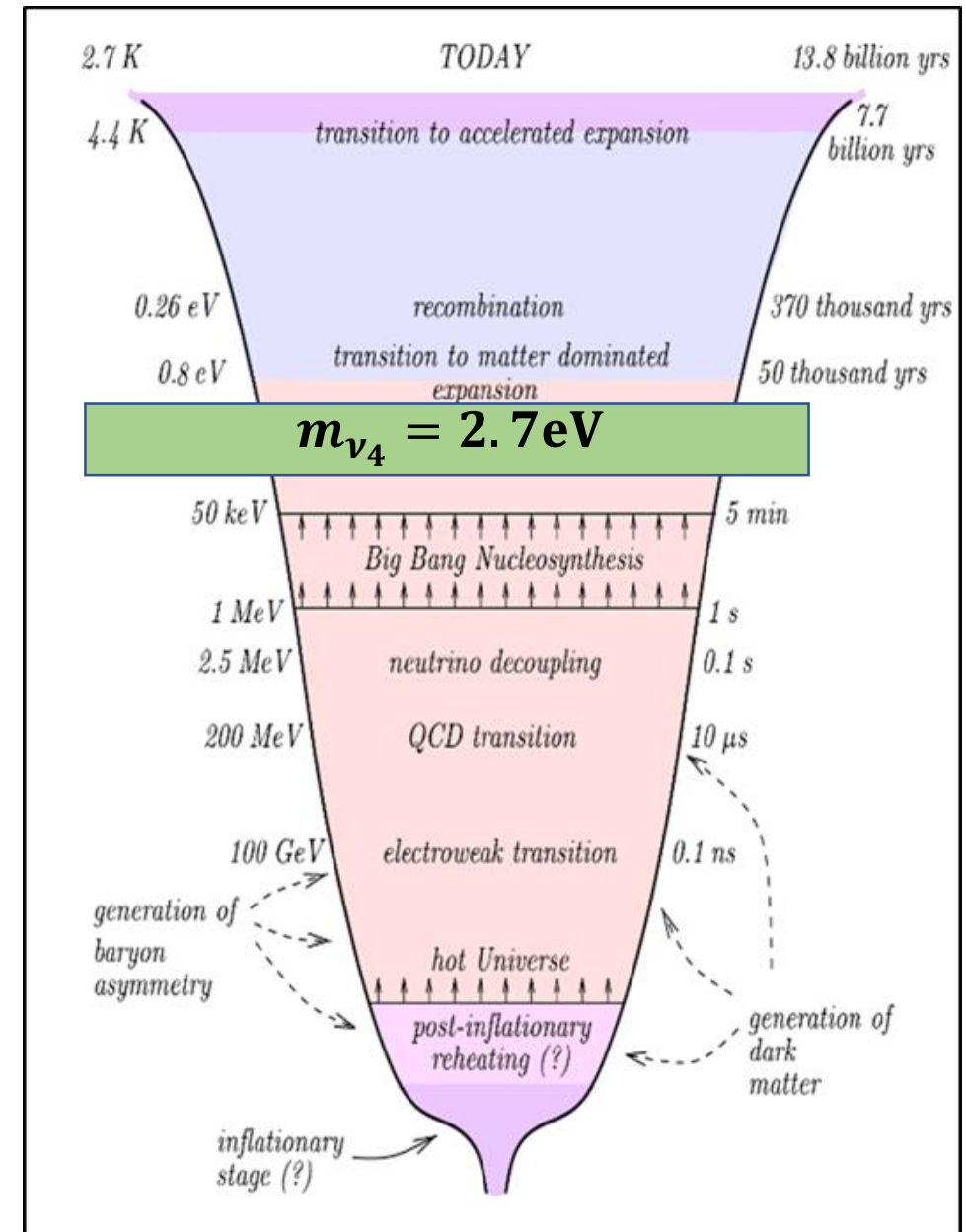
Тяжелые стерильные (правые) нейтрино с очень малыми углами смешивания можно рассматривать как темную материю и объяснять строение Вселенной!

# Structure formation depends on DM type

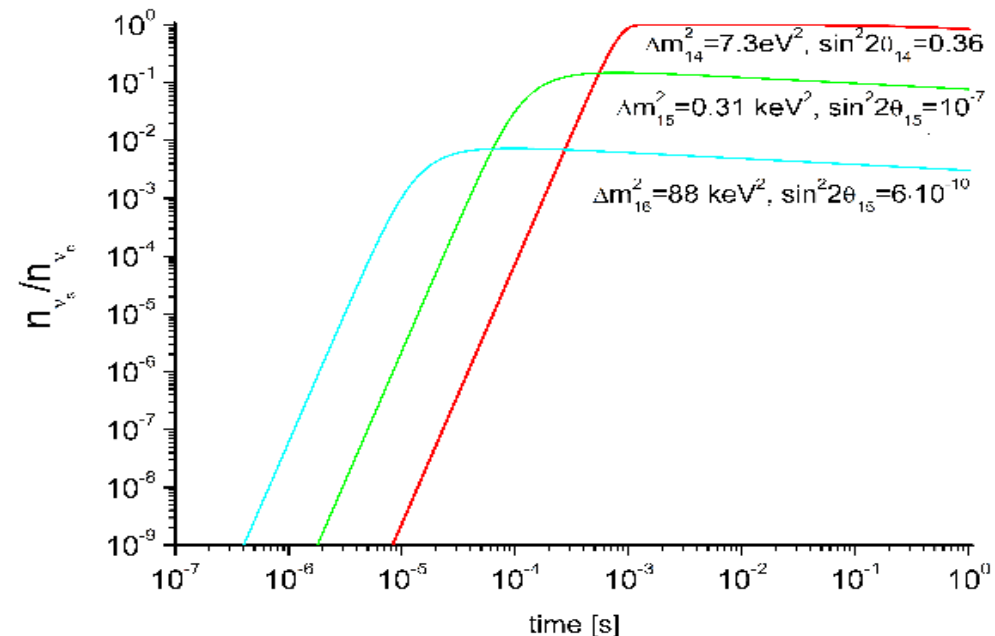
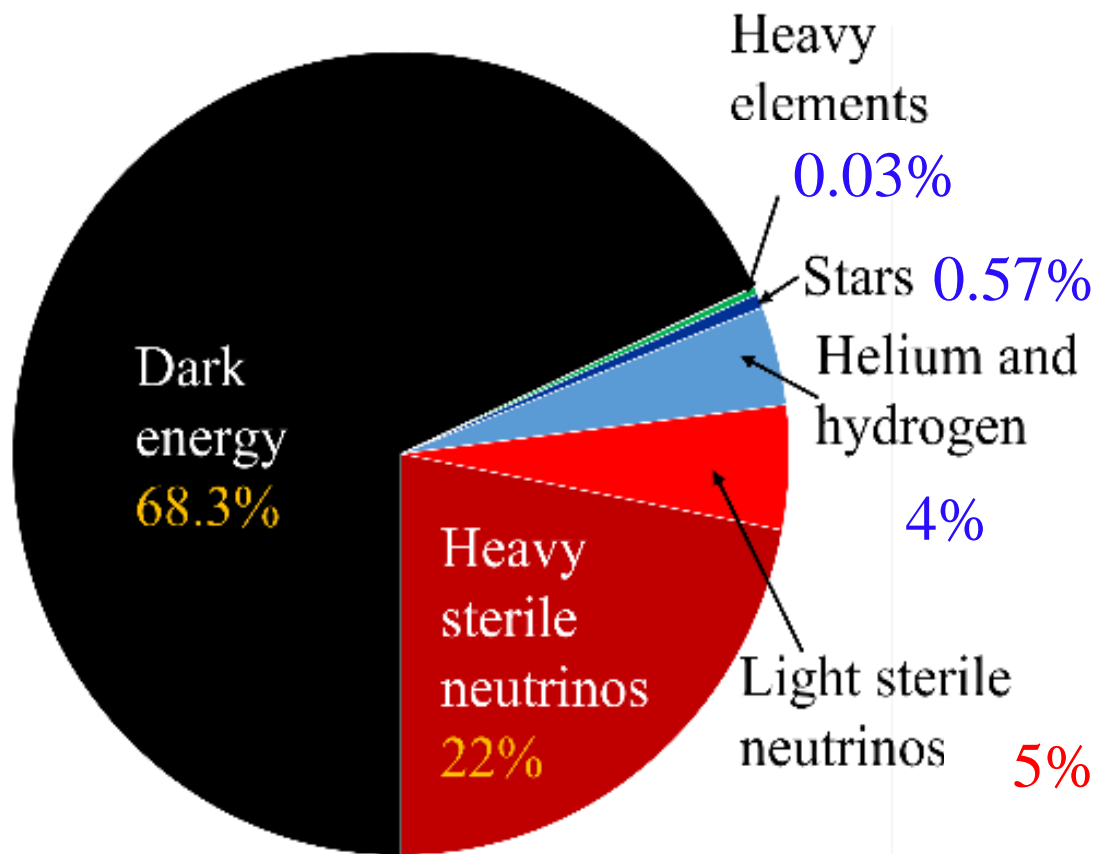
ΛCDM is the standard cosmological model of structure formation, based on weakly Interacting massive particles (WIMPs), a.k.a. Cold dark matter (CDM)



Тяжелые стерильные (правые) нейтрино с массой в несколько кэВ могут образовывать структуры за счет гравитационных сил и сил притяжения между правыми нейтрино и правыми антинейтрино.



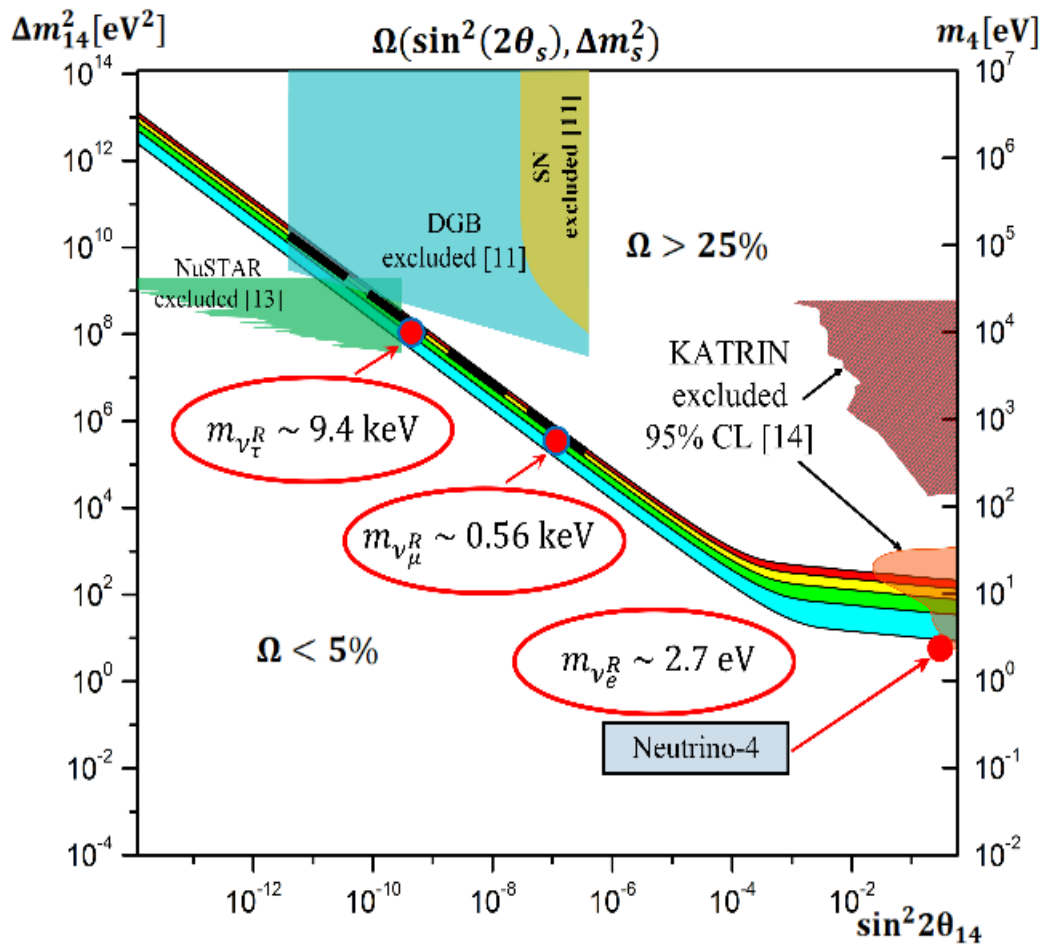
# Общая картина состава плотности энергии и массы Вселенной



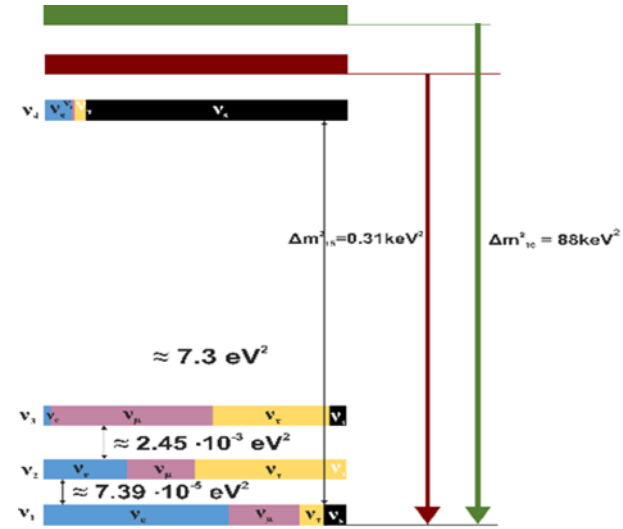
**Динамика генерации темной материи  
состояла из трех правых нейтрино и  
правых антинейтрино.**

**Тяжелые стерильные (правые) нейтрино с массой  
в несколько кэВ могут образовывать структуры за  
счет гравитационных сил и сил притяжения  
между правыми нейтрино и правыми  
антинейтрино.**

# **Иерархия масс правых нейтрино?**



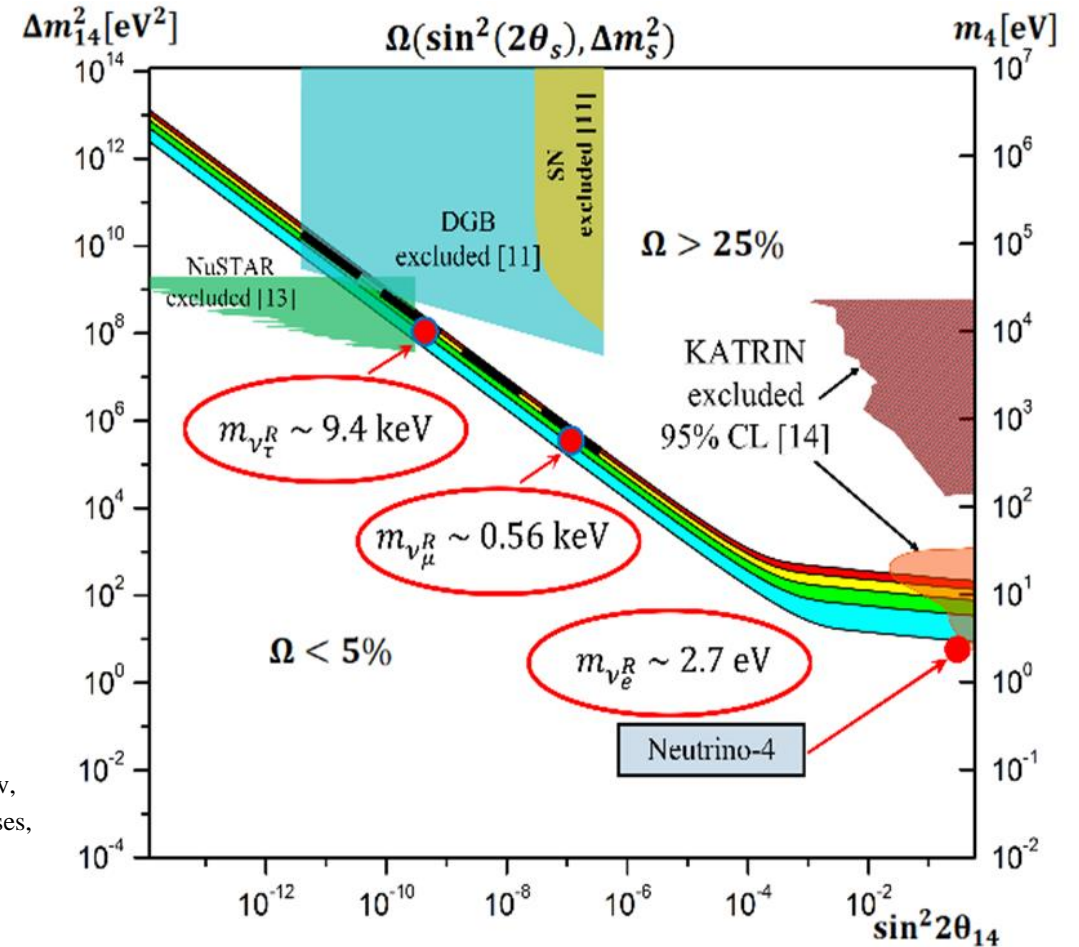
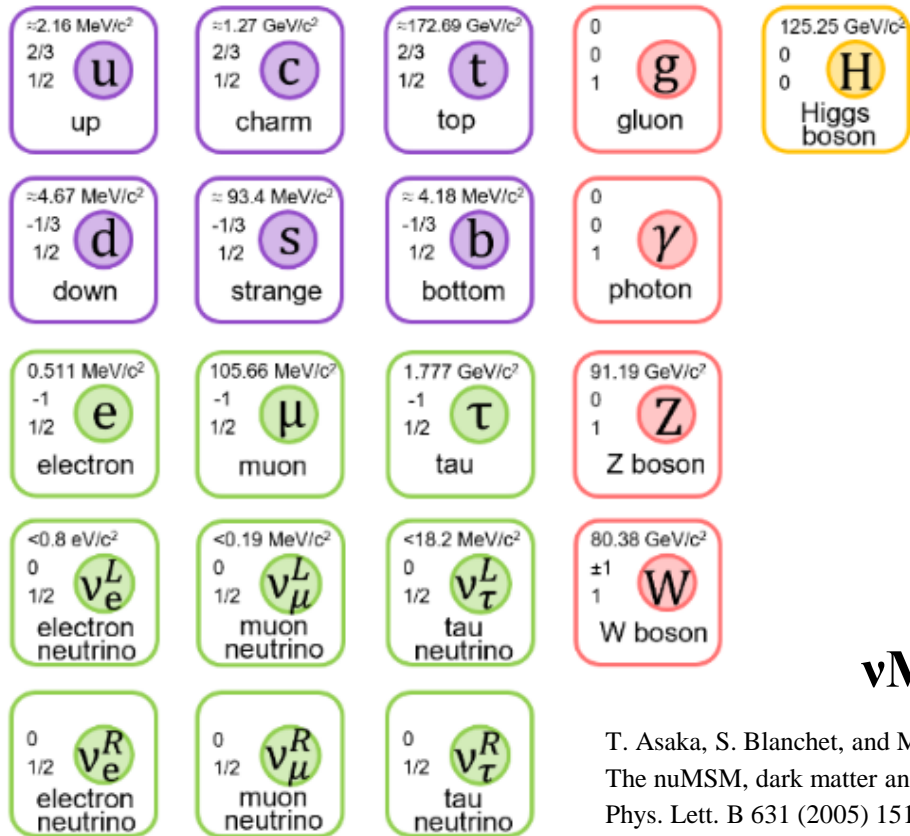
## Иерархия масс правых нейтрино?



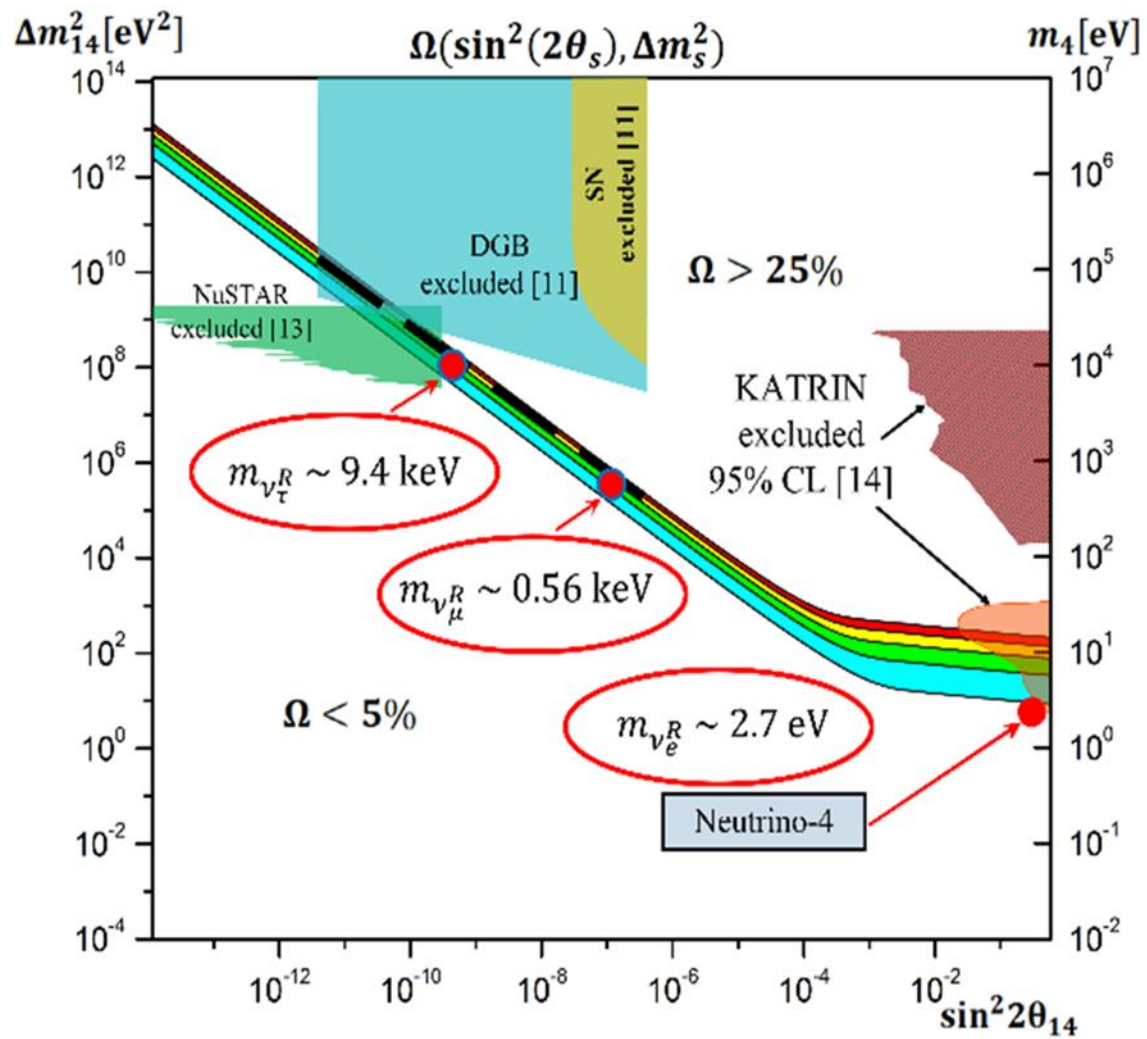
Можно предположить, что правая иерархия масс нейтрино каким-то образом коррелирует с иерархией масс лептонов, т.е.  $m_e, m_\mu, m_\tau$ .

Лабораторные и астрофизические ограничения на параметры стерильных нейтрино. 1) Красные пятна – результат эксперимента «Нейтрино-4» и возможные массы тяжелых правых нейтрино; 2)  $\Omega_s$  в пределах 5-25%; 3) DGB – экспериментальные ограничения по гамма-фону [11]; 4) SN – экспериментальные ограничения из наблюдений SN1987, 5) ограничения из эксперимента NuSTAR [12]; 6) KATRIN исключил 95% CL – ограничения на стерильные нейтрино в масштабе эВ из эксперимента KATRIN [13]; 7) исключен 95% CL – ограничения из эксперимента по измерению массы нейтрино из [13];

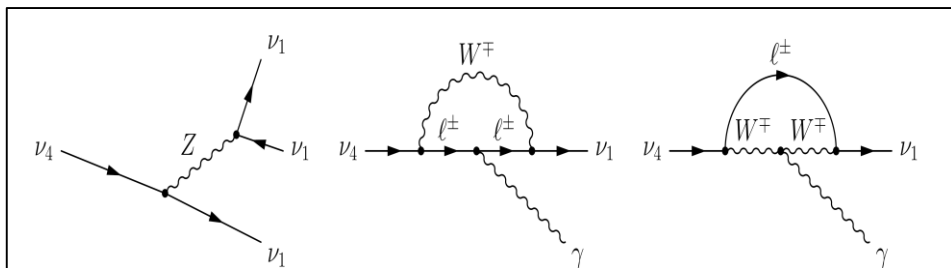
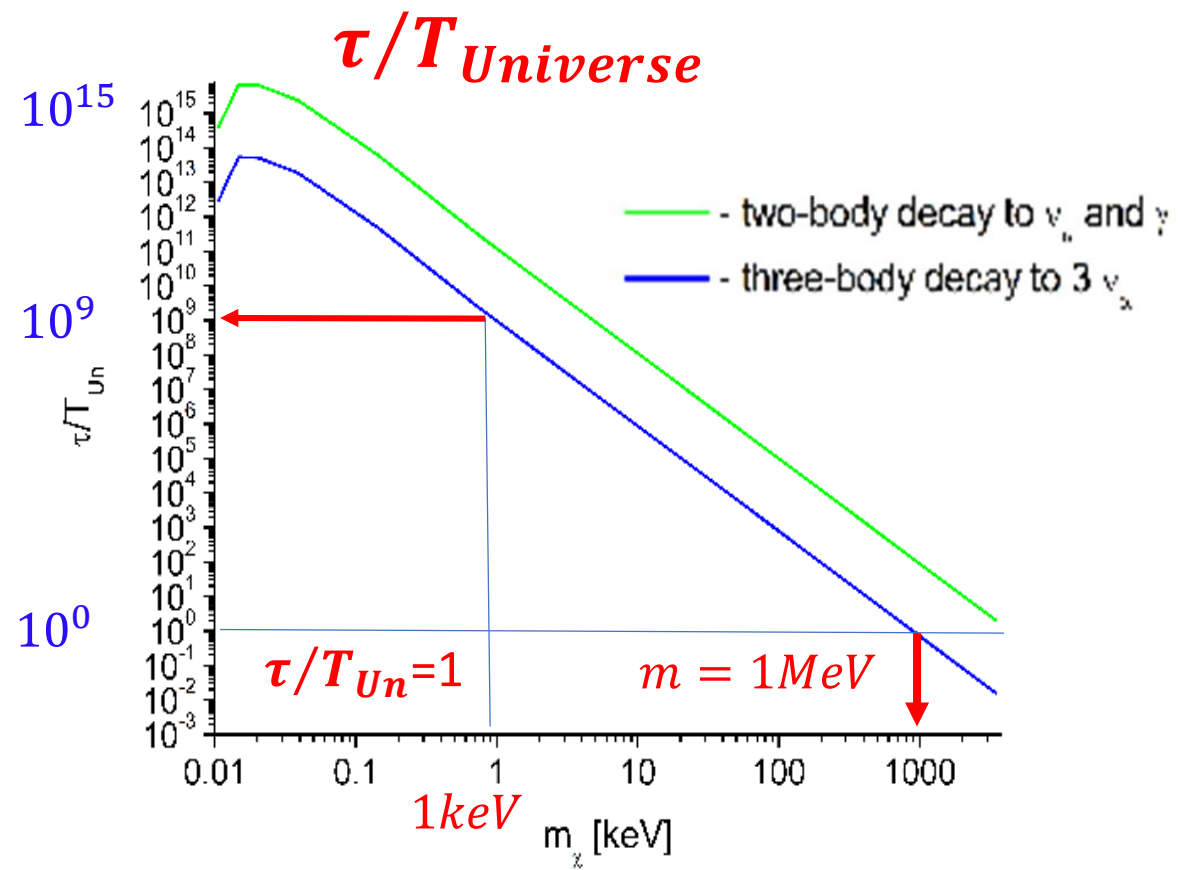
# Схема расширения Стандартной модели за счет введения дополнительных элементарных частиц - правых нейтрино, так называемая Расширенная Стандартная Модель (ESM)



Если предположить, что масса легкого правого нейтрино определена, то массы тяжелых правых нейтрино неизвестны. Можно предположить, что правая иерархия масс нейтрино каким-то образом коррелирует с иерархией масс лептонов, т.е.  $m_e, m_\mu, m_\tau$ . Тогда можно предположить следующую прямую иерархию масс правых нейтрино:  $m_{\nu_e^R} = 2.7 \text{ eV}$ ,  $m_{\nu_\mu^R} = 0.56 \text{ keV}$ ,  $m_{\nu_\tau^R} = 9.4 \text{ keV}$ .



# Время распада правых нейтрино в канале двухчастичного и трехчастичного распада.



Время жизни тяжелого нейтрино как функция его массы.  
 Время жизни нормировано к времени существования Вселенной.

Dasgupta and J. Kopp, Phys. Rept. **928** (2021) 1-63, [arXiv:2106.05913v1](https://arxiv.org/abs/2106.05913v1)

arxiv.2306.09962  
 The result of the Neutrino-4 experiment, sterile neutrinos, dark matter and the Standard Model [A. P. Serebrov](#), [R. M. Samoilov](#), [O. M. Zhrebtsov](#)



**Таким образом, темная материя с массами правых нейтрино  $m_{\nu R} < 7$  кэВ достаточно стабильна, т.к. время распада на 10 порядков величины больше времени существования Вселенной.**

**Противоречит ли легкое правое нейтрино ( $2.7eV$ ) астрофизическим данным по измерению массового содержания  $4He$ ?**

**Насколько точны экспериментальные ограничения числа нейтрино, основанные на астрофизических данных по измерению массового содержания  $4He$ ?**

При переходе от  $N_\nu = 3$  к  $N_\nu = 4$  массовое содержание  $^4\text{He}$  увеличивается на 4.9%.

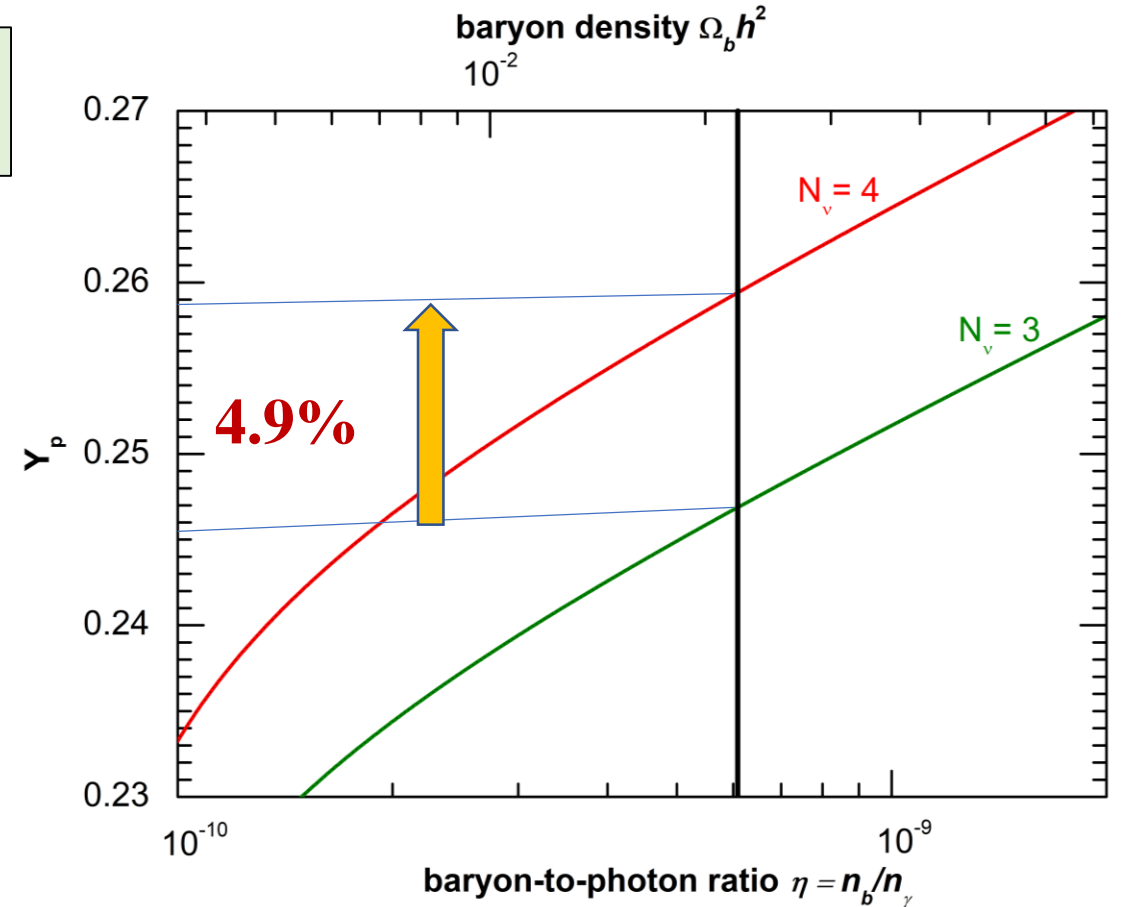
**Число степеней свободы на момент заковки нейтронов равно:**  $g_*^{Tn} = 2 + \frac{7}{8} \cdot 4 + \frac{7}{8} \cdot 2 \cdot N_\nu$

Первый вклад возникает благодаря фотонам, второй благодаря электронам и позитронам, третий связан с лёгкими нейтрино, которые успели термализоваться.

Соответственно для  $N_\nu = 3$ ,  $g_*^{Tn} = 10.75$  и для  $N_\nu = 4$ ,  $g_*^{Tn} = 12.5$ . Хотя число степеней свободы увеличивается на 16.3%, но темп расширения плазмы увеличивается на 7.8%, т.к. зависимость корневая.

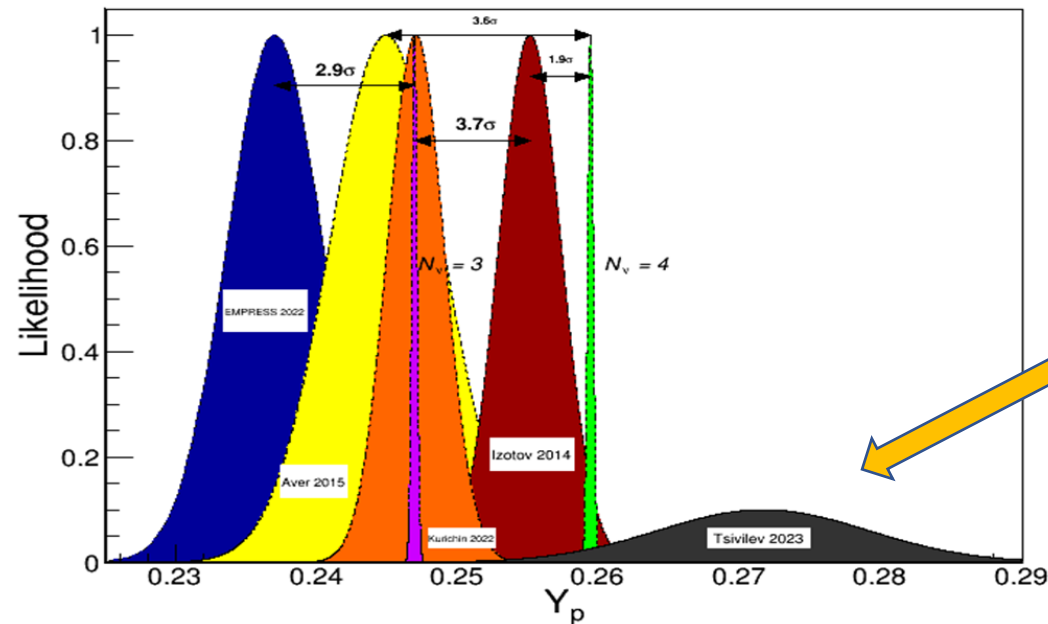
**Число степеней свободы на момент нуклеосинтеза равно:**  $g_*^{Tn} = 2 + 78 \cdot 2 \cdot N_\nu \cdot 4134/3$

Соответственно, для  $N_\nu=3$ ,  $g_*^{Tn}=3.36$ , а для  $N_\nu=4$ ,  $g_*^{Tn}=3.81$ . Хотя число степеней свободы увеличивается на 13.5%, но темп расширения плазмы увеличивается на 6.5%, т.к. зависимость корневая. Таким образом, темп расширения плазмы в период нуклеосинтеза при переходе от анализа схемы с тремя нейтрино к схеме с четырьмя нейтрино увеличивается на 6.5%. **Среднее значение фактора увеличения числа степеней свободы за интервал от 1.2 с до 265 с приблизительно 7%.**



Содержания  $Y_p$  зависимости от значения барионной асимметрии при  $N_\nu = 3$  и 4 соответственно. Толщина линий определяется экспериментальной точностью измерения времени жизни нейтрона ( $\tau n = 879.4 \pm 0.6$  с). Вертикальная линия соответствует значению барионной асимметрии  $(6.090 \pm 0.060) \cdot 10^{-1}$ , а её толщина соответствует одному стандартному отклонению.

# Экспериментальные оценки числа нейтрино на основе астрофизических данных по измерению массового содержания ${}^4\text{He}$



*АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2023,  
том 100, № 3, с. 258–271*

К ВОПРОСУ О ПЕРВОНАЧАЛЬНОМ СОДЕРЖАНИИ ГЕЛИЯ  
ПО НАБЛЮДЕНИЯМ РРЛ В ОРИОНЕ А

© 2023 г. А. П. Цивилев<sup>1, \*</sup>, В. В. Краснов<sup>1</sup>

Следовательно, можно ожидать, что первичное содержание гелия ( $Y_p$ , отношение  $\text{He}/\text{H}$  по массе) может составлять не менее интервала значений  $\approx 24.93\text{--}29.40\%$ , что допускает отклонения от выводов Стандартной модели, например, допускает присутствие неизвестных легких частиц во время первичного нуклеосинтеза

Сравнение расчетных предсказаний содержания  ${}^4\text{He}$  с известным временем жизни нейтрона и величиной барионной асимметрии в модели  $N_\nu = 3$  и  $N_\nu = 4$  (фиолетовый и зеленый пики соответственно) с результатами астрофизических наблюдений: Изотов 2014, Авер 2015, Куричин 2022 и ИМПЕРАЦИЯ 2022, Цивилёв 2023 (красное, желтое, оранжевое, синее и чёрное распределение соответственно)

**Сделать однозначный вывод в пользу моделей  
трёх или четырёх нейтрино невозможно.**

## Роль лептонной асимметрии в анализе первичного нуклеосинтеза

Предположение, что лептонная асимметрия так же мала, как и барионная асимметрия. Однако это условие может быть нарушено.

В начале BBN нейтроны и протоны находятся в равновесии до тех пор, пока равновесие не будет нарушено слабым взаимодействием. Если процесс  $p + \bar{\nu}_e \rightarrow n + e^+$  подавлен по отношению к процессу  $n + \nu_e \rightarrow p + e^-$  из-за меньшего числа электронных антинейтрино, то это подавляет нейтрон-протонное отношение и, как в результате  $Y_p$  уменьшается. Это уменьшение  $Y_p$  можно компенсировать увеличением числа степеней свободы  $N_\nu^{\text{eff}}$ , чтобы сохранить то же значение  $Y_p$ .

Таким образом, наличие лептонной асимметрии маскирует наличие четвертого нейтрино.

lepton asymmetry  
decrease  $Y_p$

$$p + \bar{\nu}_e \rightarrow n + e^+ \neq n + \nu_e \rightarrow p + e^-$$

$$\frac{n_\nu - n_{\bar{\nu}}}{n_\nu + n_{\bar{\nu}}} = \frac{\pi^2}{9\zeta(3)} \frac{\mu_\nu}{T} \approx \xi_a = \mu_{\nu_a}/T_\nu$$

$$\frac{n_n}{n_p} = \exp \left\{ -\frac{\Delta m}{T_n} - \frac{\mu_{\nu_e}}{T_n} \right\}$$

lepton asymmetry  $\xi_a = \mu_{\nu_a}/T_\nu$

**NEUTRINO DISPERSION AT FINITE TEMPERATURE  
AND DENSITY**

Dirk NÖTZOLD

*Max-Planck-Institut für Physik und Astrophysik, Postfach 401212, 8000 München 40, FRG*

Georg RAFFELT

*Astronomy Department, University of California, Berkeley, CA 94720, USA  
and Institute for Geophysics and Planetary Physics, LLNL, Livermore, CA 94550, USA*

Received 9 February 1988

$$V_{\nu_e} = \pm C1 \left( 2\eta_{\nu_e} + \eta_{\nu_\mu} + \eta_{\nu_\tau} + \eta_e - \frac{1}{2}\eta_n \right) G_F T^3 - C2 \alpha^{-1} G_F^2 T^4 E_\nu$$

$$V_{\nu_\mu} = \pm C1 \left( \eta_{\nu_e} + 2\eta_{\nu_\mu} + \eta_{\nu_\tau} - \frac{1}{2}\eta_n \right) G_F T^3 - C3 \alpha^{-1} G_F^2 T^4 E_\nu$$

$$V_{\nu_\tau} = \pm C1 \left( \eta_{\nu_e} + \eta_{\nu_\mu} + 2\eta_{\nu_\tau} - \frac{1}{2}\eta_n \right) G_F T^3 - C3 \alpha^{-1} G_F^2 T^4 E_\nu$$

**Потенциалы в  
космической  
плазме**

$$\eta = \frac{n - \bar{n}}{n_\gamma}$$

$$c_1 = 11\zeta(3) / \pi^2 \sqrt{2} \approx 0.95$$

$$c_2 = \frac{14}{45} \pi (3 - \sin^2 \theta_w) \sin^2 \theta_w \approx 0.61$$

$$c_3 = \frac{14}{45} \pi (1 - \sin^2 \theta_w) \sin^2 \theta_w \approx 0.17$$

# Появление нейтрино-антинейтринной асимметрии в процессе первичного нуклеосинтеза

$$P_{\nu_\alpha \nu_\beta}(L, E) = \delta_{\alpha\beta} - 4 \sum_{i < j} \text{Re}[U_{\alpha i} U_{\beta i}^* U_{\alpha j}^* U_{\beta j}] \sin^2 \left( \frac{\Delta m_{ij}^2 L}{4E} \right) + 2 \sum_{i < j} \text{Im}[U_{\alpha i} U_{\beta i}^* U_{\alpha j}^* U_{\beta j}] \sin \left( \frac{\Delta m_{ij}^2 L}{2E} \right)$$

$$V_{\nu_e}^\pm = \pm c_1 \frac{3}{4} \xi_{\nu_e \bar{\nu}_e} G_F T^3 - c_2 \alpha^{-1} G_F^2 T^4 E_{\nu_e}$$

$$V_{\nu_\mu}^\pm = \pm c_1 \frac{3}{4} \xi_{\nu_\mu \bar{\nu}_\mu} G_F T^3 - c_3 \alpha^{-1} G_F^2 T^4 E_{\nu_\mu}$$

$$V_{\nu_\tau}^\pm = \pm c_1 \frac{3}{4} \xi_{\nu_\tau \bar{\nu}_\tau} G_F T^3 - c_3 \alpha^{-1} G_F^2 T^4 E_{\nu_\tau}$$

$$\xi_{\nu_e \bar{\nu}_e} + \xi_{\nu_\mu \bar{\nu}_\mu} + \xi_{\nu_\tau \bar{\nu}_\tau} = 0$$

$$c_1 = 11\zeta(3) / \pi^2 \sqrt{2} \approx 0.95$$

$$c_2 = \frac{14}{45} \pi (3 - \sin^2 \theta_w) \sin^2 \theta_w \approx 0.61$$

$$c_3 = \frac{14}{45} \pi (1 - \sin^2 \theta_w) \sin^2 \theta_w \approx 0.17$$

$$\xi_{\nu_e \bar{\nu}_e} = (n_{\nu_e} - n_{\bar{\nu}_e}) / \Sigma n$$

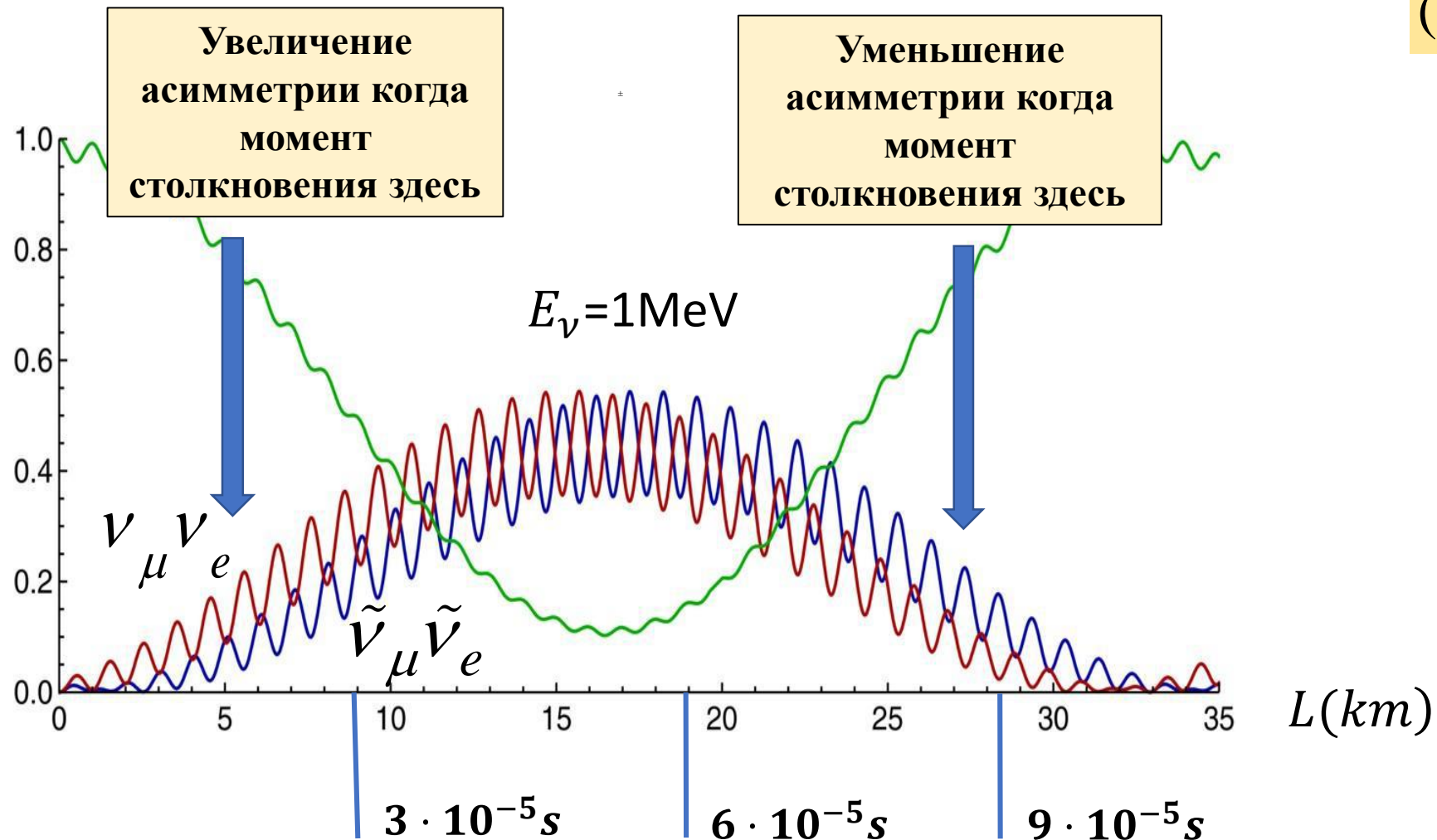
$$\xi_{\nu_\mu \bar{\nu}_\mu} = (n_{\nu_\mu} - n_{\bar{\nu}_\mu}) / \Sigma n$$

$$\xi_{\nu_\tau \bar{\nu}_\tau} = (n_{\nu_\tau} - n_{\bar{\nu}_\tau}) / \Sigma n$$

# Механизм возникновения нейтринной асимметрии

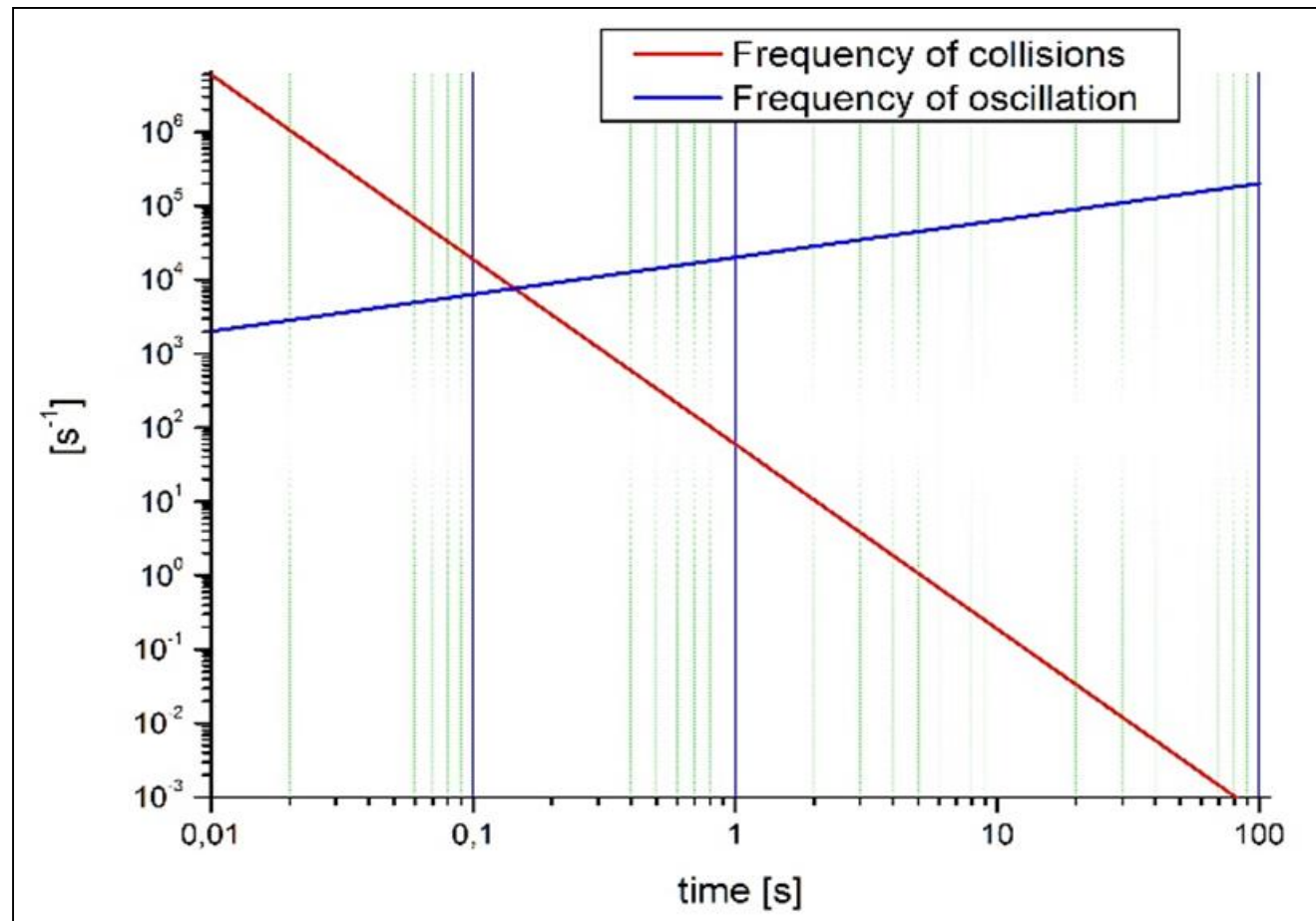
Фазовый сдвиг из-за СР-нарушения между нейтрино и антинейтрино

$$\delta_{13} = 270^\circ$$
$$(-\pi / 2)$$





## Зависимость частоты столкновений и частоты осцилляций от времени в процессе расширения Вселенной



# Частота соударений нейтрино между собой в нейтринной плазме

Связь потенциала и амплитуды рассеяния даётся следующим выражением для нейтрино и антинейтрино:

$$V^{\pm} = \frac{1}{k} N b_{\pm}^{coh}$$

Частота соударений нейтрино между собой в нейтринной плазме даётся следующим выражением:

$$\omega_{\pm} = t_{\pm}^{-1} = cN\sigma_{tot}^{\pm} \quad \text{или с учётом оптической теоремы} \quad \omega_{\pm} = t_{\pm}^{-1} = cN\sigma_{tot}^{\pm} = 2V^{\pm}$$

## Частота соударений

$$\omega_{coh}^{\nu_e} = 1.22\alpha^{-1} G_F^2 T^4 E_{\nu_e}$$

$$\omega_{coh}^{\nu_{\mu}} = 0.34\alpha^{-1} G_F^2 T^4 E_{\nu_{\mu}}$$

$$\omega_{coh}^{\nu_{\tau}} = 0.34\alpha^{-1} G_F^2 T^4 E_{\nu_{\tau}}$$

## Сечение и частота некогерентного рассеяния

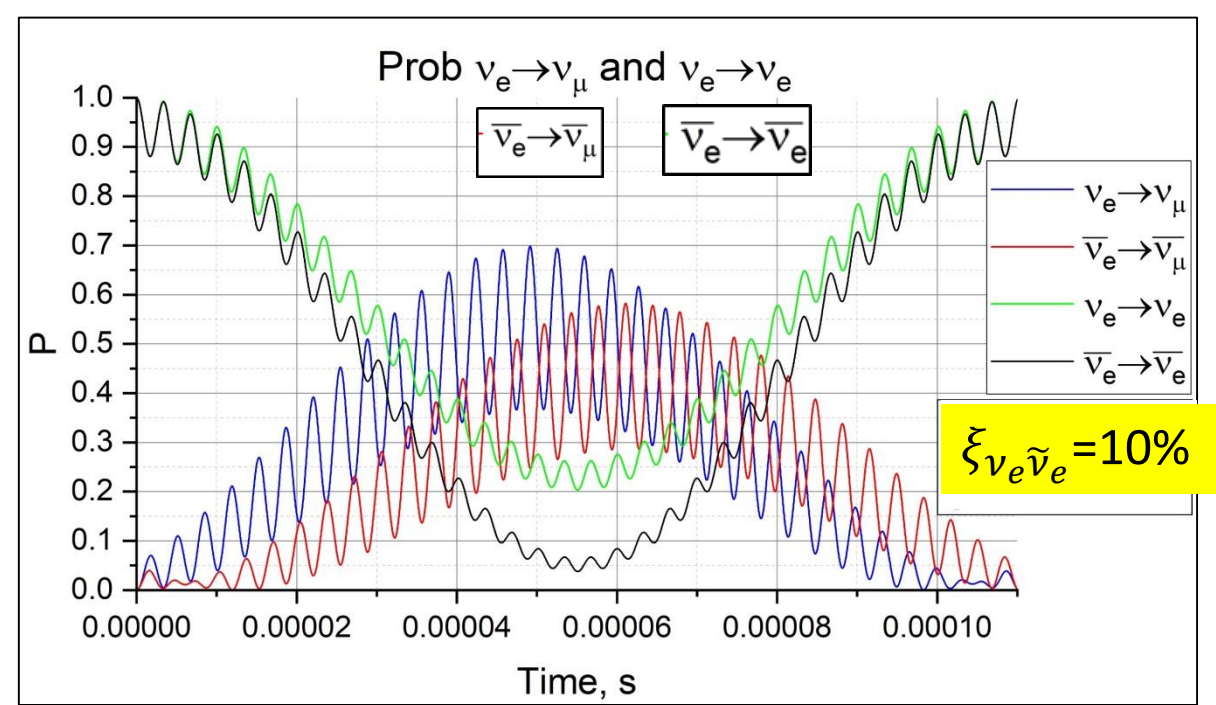
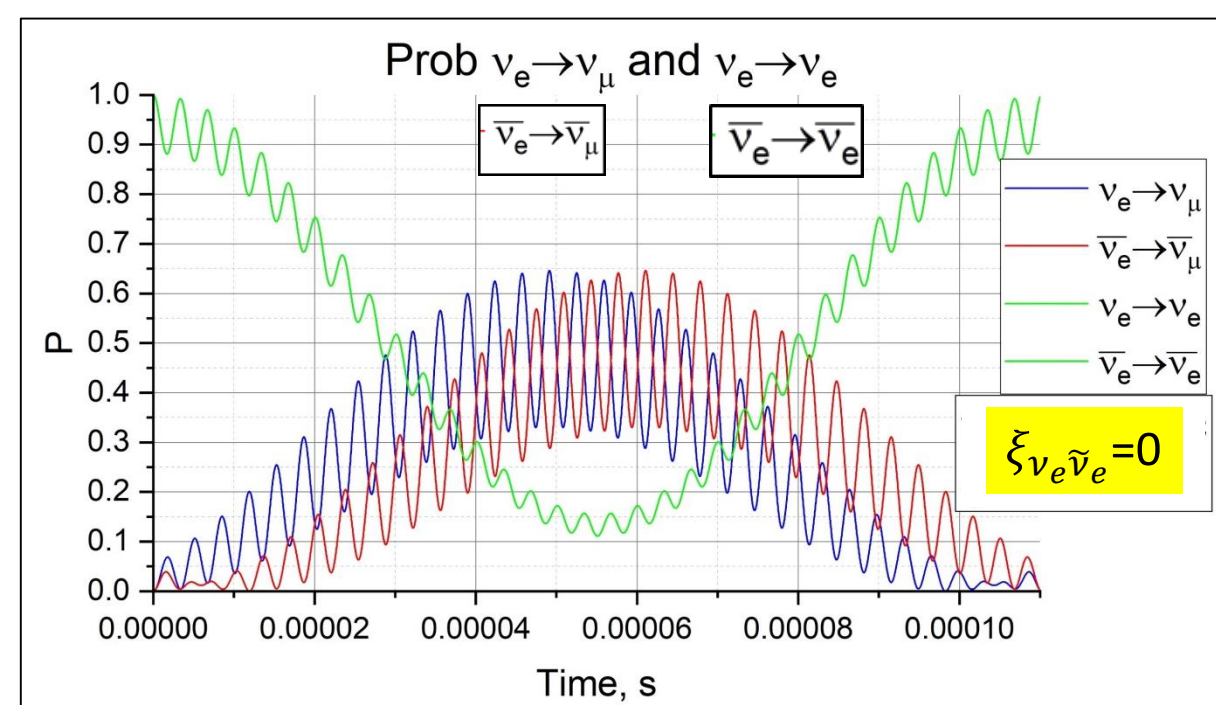
Оценим вклад частоты некогерентного рассеяния по отношению к частоте когерентного рассеяния для электронного нейтрино, используя соотношение:

$$\omega_{nc}^{\nu_e} + \omega_{coh}^{\nu_e} = 3.26 \cdot 10^4 G_F^2 T^5 [2 \cdot 10^{-3} (1 - \xi_{\nu_e}^2) \xi_{\nu_e}^2 + 1]$$

Таким образом, некогерентным рассеянием можно пренебречь, т.к. его вклад порядка  $10^{-3}$ .

Как выглядит сдвиг фазы осцилляций за счёт CP-нарушения?  $\delta_{13} = 270^\circ$   $(-\pi/2)$

Роль электронной нейрино-антинейтринной асимметрии  $\xi_{\nu_e \tilde{\nu}_e} = (n_{\nu_e} - n_{\tilde{\nu}_e}) / (n_{\nu_e} + n_{\tilde{\nu}_e})$



**Эта картинка для вакуумных осцилляций, без учёта столкновений нейтрино между собой.**  
**В нейтринной плазме картина осцилляций значительно сложнее.**

## Для решения задачи применим метод интегрирования дифференциальных уравнений

Для электронных нейтрино, мюонных нейтрино и тау нейтрино можно написать:

$$\Delta n_{\nu_e} + 3Hn_{\nu_e}\Delta t = -n_{\nu_e}N_{\nu_e}(P_{\nu_e\nu_\mu} + P_{\nu_e\nu_\tau}) + n_{\nu_\mu}N_{\nu_\mu}P_{\nu_\mu\nu_e} + n_{\nu_\tau}N_{\nu_\tau}P_{\nu_\tau\nu_e}$$

$$\Delta n_{\nu_\mu} + 3Hn_{\nu_\mu}\Delta t = -n_{\nu_\mu}N_{\nu_e}(P_{\nu_\mu\nu_\tau} + P_{\nu_\mu\nu_e}) + n_{\nu_\tau}N_{\nu_\tau}P_{\nu_\tau\nu_\mu} + n_{\nu_e}N_{\nu_e}P_{\nu_e\nu_\mu}$$

$$\Delta n_{\nu_\tau} + 3Hn_{\nu_\tau}\Delta t = -n_{\nu_\tau}N_{\nu_\tau}(P_{\nu_\tau\nu_e} + P_{\nu_\tau\nu_\mu}) + n_{\nu_e}N_{\nu_e}P_{\nu_e\nu_\tau} + n_{\nu_\mu}N_{\nu_\mu}P_{\nu_\mu\nu_\tau}$$

**и такие же уравнениями для антинейтрино**

$P_{\nu_\mu\nu_e}$ ;  $P_{\nu_e\nu_\mu}$ ;  $P_{\nu_e\nu_\mu}$ ;  $P_{\nu_\mu\nu_e}$ ;  $P_{\nu_\tau\nu_e}$ ;  $P_{\nu_\tau\nu_\mu}$  вероятности перехода в моменты столкновений

$N_{\nu_e}$   $N_{\nu_\mu}$   $N_{\nu_\tau}$  число столкновений за время  $\Delta t$

Такие уравнения записываются для каждого участка фермиевского спектра и складываются с весами.

Приведённые выше уравнения позволяют рассчитать нейтрино-антинейтринные асимметрии. Затем из этих асимметрий вычисляются потенциалы. С этими потенциалами вычисляются углы смешивания в среде. После этого снова вычисляются значения нейтринных плотностей для нового интервала времени и таким образом, может быть получено описание процесса в расширяющейся Вселенной.

$$6 \quad P_{\nu_\alpha \nu_\beta}(L, E) = \delta_{\alpha\beta} - 4 \sum_{i < j} \text{Re}[U_{\alpha i} U_{\beta i}^* U_{\alpha j}^* U_{\beta j}] \sin^2 \left( \frac{\Delta m_{ij}^2 L}{4E} \right) + 2 \sum_{i < j} \text{Im}[U_{\alpha i} U_{\beta i}^* U_{\alpha j}^* U_{\beta j}] \sin \left( \frac{\Delta m_{ij}^2 L}{2E} \right)$$

$$5 \quad \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu 1} & U_{\mu 2} & U_{\mu 3} \\ U_{\tau 1} & U_{\tau 2} & U_{\tau 3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_{23}^m & \sin \theta_{23}^m \\ 0 & -\sin \theta_{23}^m & \cos \theta_{23}^m \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta_{13}^m & 0 & \sin \theta_{13}^m e^{-i\delta_{CP}} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_{13}^m e^{i\delta_{CP}} & 0 & \cos \theta_{13}^m \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta_{12}^m & \sin \theta_{12}^m & 0 \\ -\sin \theta_{12}^m & \cos \theta_{12}^m & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

4

$\sin^2 2\theta_{12}^m = \frac{\sin^2 2\theta_{12}}{\left( \cos 2\theta_{12} + \frac{2E(V_{\nu_e} - V_{\nu_\mu})}{\Delta m_{12}^2} \right)^2 + \sin^2 2\theta_{12}}$	$\sin^2 2\theta_{13}^m = \frac{\sin^2 2\theta_{13}}{\left( \cos 2\theta_{13} + \frac{2E(V_{\nu_e} - V_{\nu_\tau})}{\Delta m_{13}^2} \right)^2 + \sin^2 2\theta_{13}}$	$\sin^2 2\theta_{23}^m = \frac{\sin^2 2\theta_{23}}{\left( \cos 2\theta_{23} + \frac{2E(V_{\nu_\mu} - V_{\nu_\tau})}{\Delta m_{23}^2} \right)^2 + \sin^2 2\theta_{23}}$
--	---	---

$$3. \quad V_{\nu_e}^\pm = \pm c_1 \frac{3}{4} \xi_{\nu_e \bar{\nu}_e} G_F T^3 - c_2 \alpha^{-1} G_F^2 T^4 E_{\nu_e}$$

$$\xi_{\nu_e \bar{\nu}_e} = (n_{\nu_e} - n_{\bar{\nu}_e}) / \Sigma n$$

1.

$$V_{\nu_\mu}^\pm = \pm c_1 \frac{3}{4} \xi_{\nu_\mu \bar{\nu}_\mu} G_F T^3 - c_3 \alpha^{-1} G_F^2 T^4 E_{\nu_\mu}$$

2.

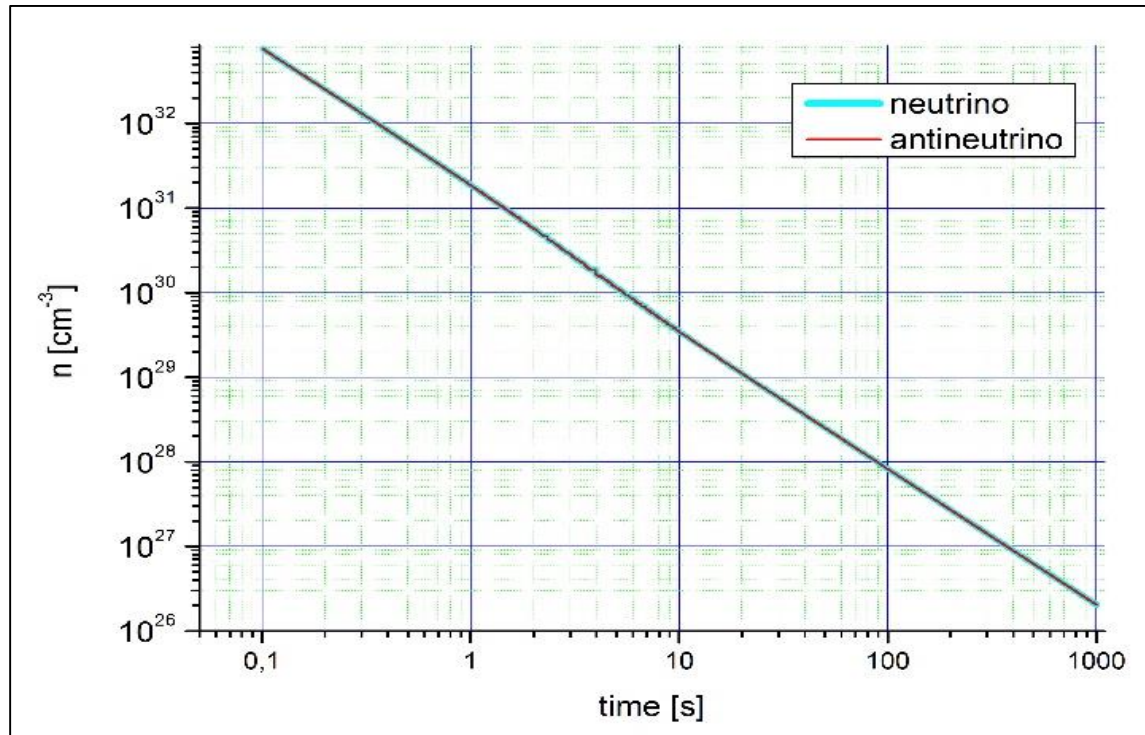
$$\xi_{\nu_\mu \bar{\nu}_\mu} = (n_{\nu_\mu} - n_{\bar{\nu}_\mu}) / \Sigma n$$

n

$$V_{\nu_\tau}^\pm = \pm c_1 \frac{3}{4} \xi_{\nu_\tau \bar{\nu}_\tau} G_F T^3 - c_3 \alpha^{-1} G_F^2 T^4 E_{\nu_\tau}$$

$$\xi_{\nu_\tau \bar{\nu}_\tau} = (n_{\nu_\tau} - n_{\bar{\nu}_\tau}) / \Sigma n$$

Для контроля правильности расчётов нужно, прежде всего показать, что зависимость суммы плотностей всех типов нейтрино изменяется в соответствии законом Хаббла и совпадает для нейтрино и антинейтрино.



$$n_{\nu_e} + n_{\nu_\mu} + n_{\nu_\tau}$$

сохраняется в каждый момент времени

$$n_{\nu_e} + n_{\nu_\mu} + n_{\nu_\tau} = n_{\tilde{\nu}_e} + n_{\tilde{\nu}_\mu} + n_{\tilde{\nu}_\tau}$$

Результат вычислений зависимости плотности всех типов нейтрино и антинейтрино от времени, демонстрирующий соответствие с законом сохранения лептонного для нейтрино и антинейтрино. Зависимости для нейтрино и антинейтрино совпадают.

Зависимость суммы плотностей всех типов нейтрино от времени в процессе расширения Вселенной. Зависимости для нейтрино и антинейтрино одинаковые.

## Резонансы в потенциалах нейтринной плазмы

$$\sin^2 2\vartheta_{13}^m = \frac{\sin^2 2\vartheta_{13}}{\left( \cos 2\vartheta_{13} + \frac{2E(V_e - V_\tau)}{\Delta m_{13}^2} \right)^2 + \sin^2 2\vartheta_{13}}$$

$$\sin^2 2\vartheta_{13} \approx 0.095$$

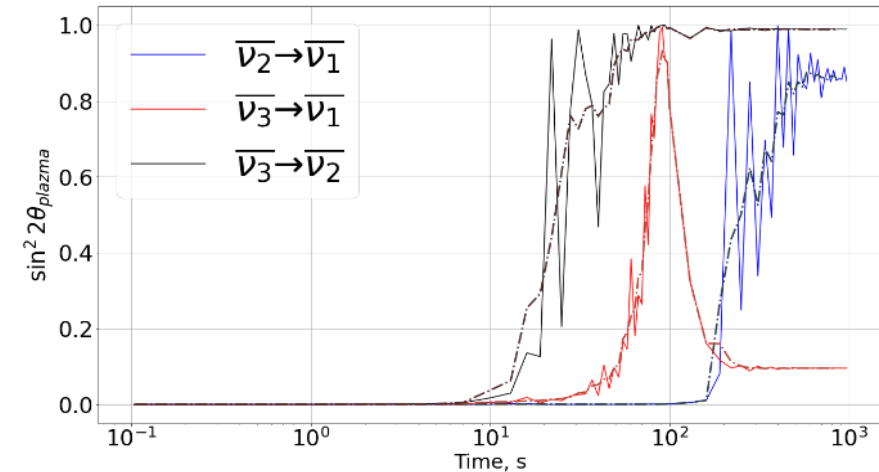
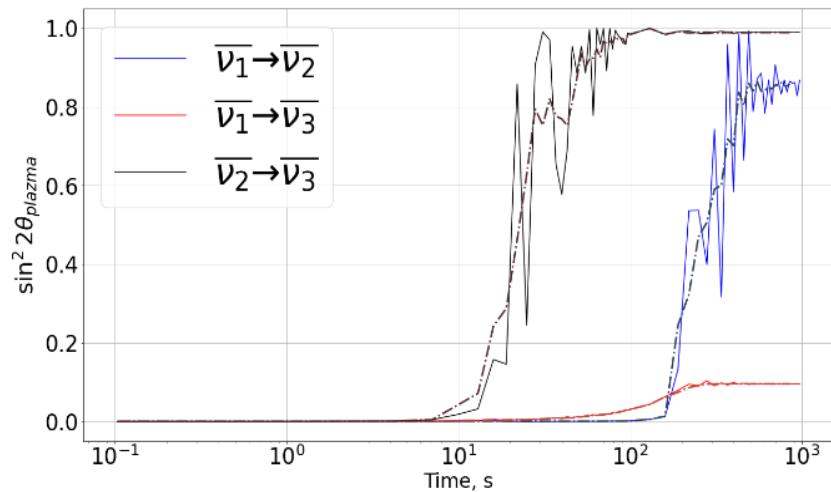
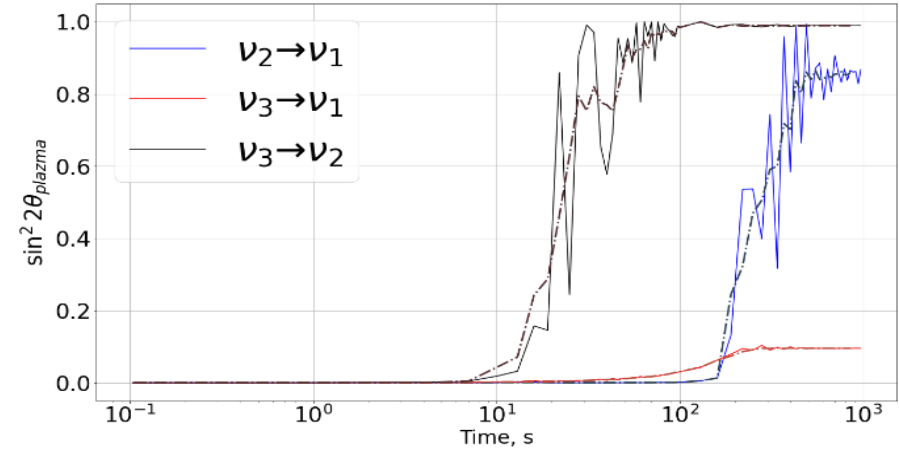
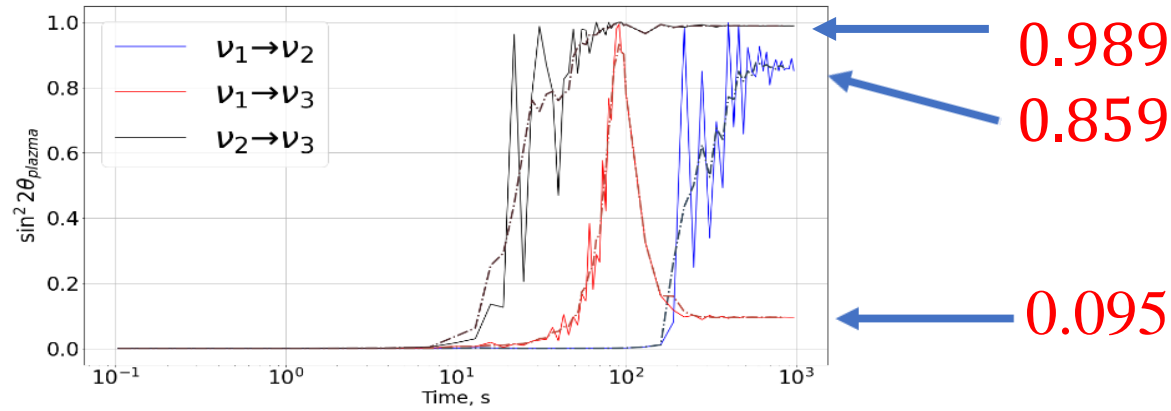
$$\sin^2 2\vartheta_{23}^m = \frac{\sin^2 2\vartheta_{0,23}}{\left( \cos 2\vartheta_{0,23} + \frac{2E(V_\mu - V_\tau)}{\Delta m_{23}^2} \right)^2 + \sin^2 2\vartheta_{0,23}}$$

$$\sin^2 2\vartheta_{0,23} \approx 0.989$$

$$\sin^2 2\vartheta_{12}^m = \frac{\sin^2 2\vartheta_{12}}{\left( \cos 2\vartheta_{12} + \frac{2E(V_e - V_\mu)}{\Delta m_{12}^2} \right)^2 + \sin^2 2\vartheta_{12}}$$

$$\sin^2 2\vartheta_{0,12} \approx 0.859$$

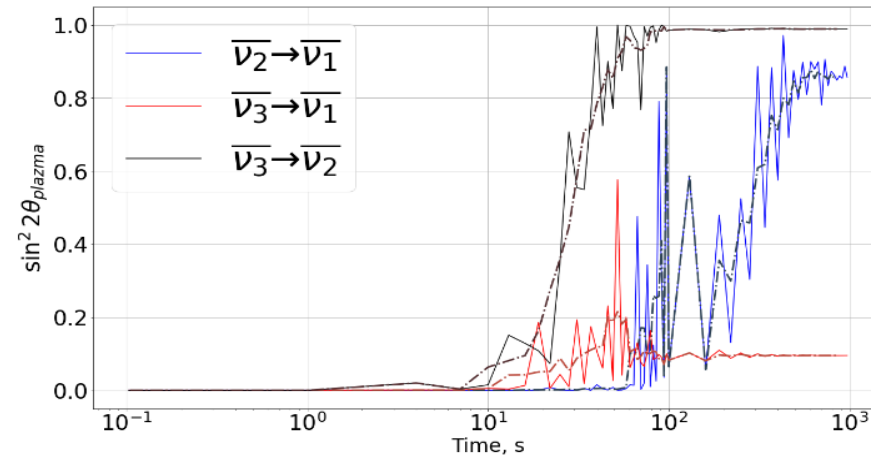
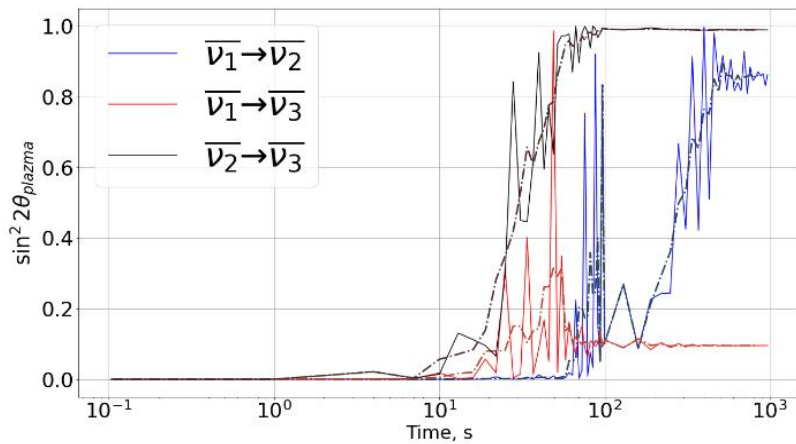
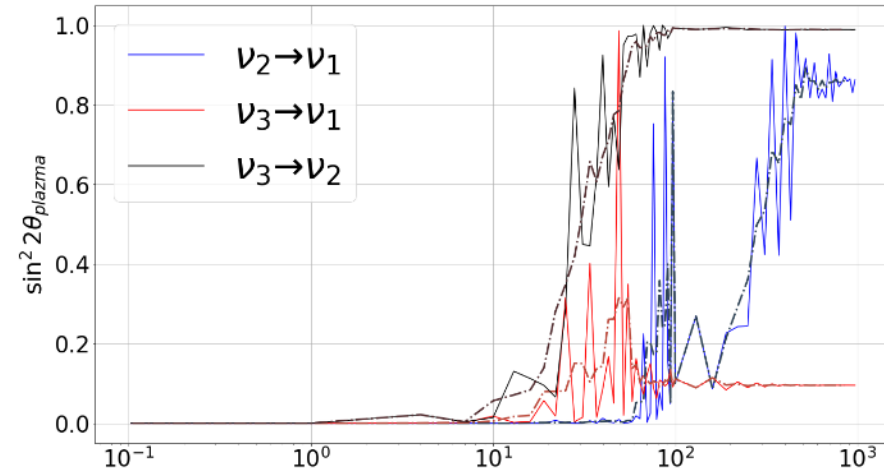
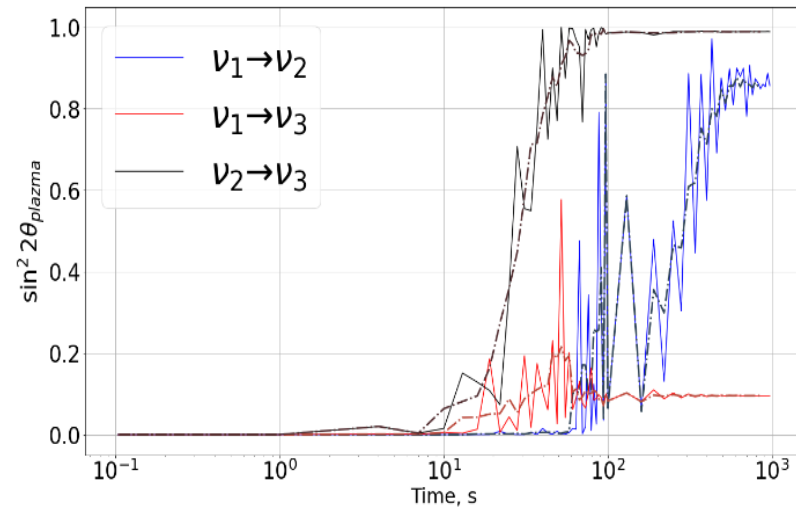
# Результаты расчётов процессов нейтринных осцилляций для случая инверсной иерархии нейтринных масс



Поведение плазменного угла смешивания для нейтрино (наверху) и антинейтрино (внизу), для прямых (слева) и обратных (справа) переходов между массовыми состояниями для случая инверсной иерархии нейтринных масс. Синяя кривая соответствует переходам 1-2 или 2-1, красная кривая соответствует переходам 1-3 или 3-1 и чёрная кривая соответствует переходам 2-3 или 3-2. Штрих пунктирная кривая показывает поведение среднего значения плазменного угла.

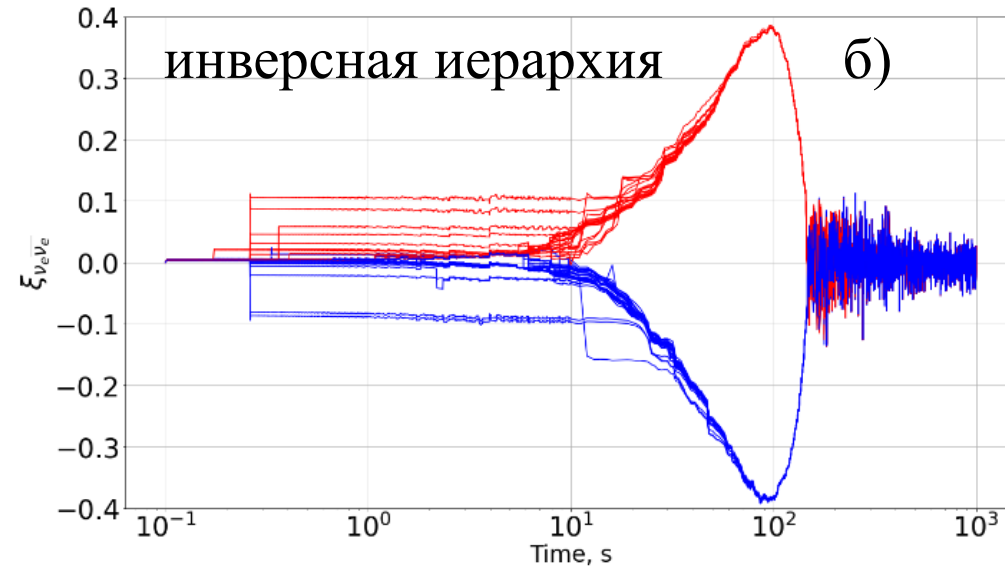
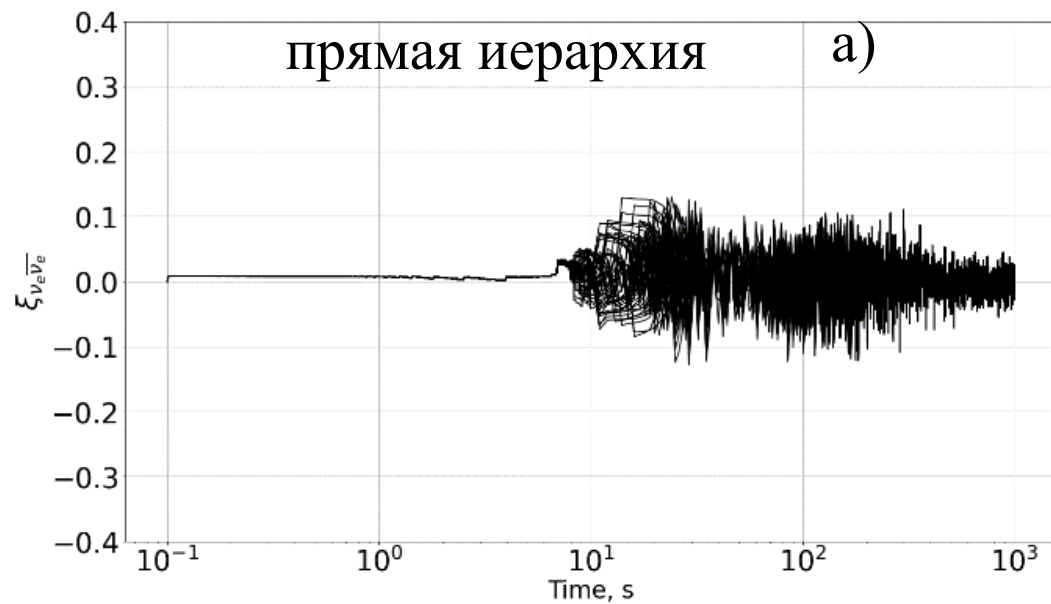


# Результаты расчётов процессов нейтринных осцилляций для случая **прямой** иерархии нейтринных масс.



Поведение плазменного угла смешивания для нейтрино (наверху) и антинейтрино (внизу), для прямых (слева) и обратных (справа) переходов между массовыми состояниями для случая **прямой** иерархии нейтринных масс. Синяя кривая соответствует переходам 1-2 или 2-1, красная кривая соответствует переходам 1-3 или 3-1 и чёрная кривая соответствует переходам 2-3 или 3-2. Штрих пунктирная кривая показывает поведение среднего значения плазменного угла.

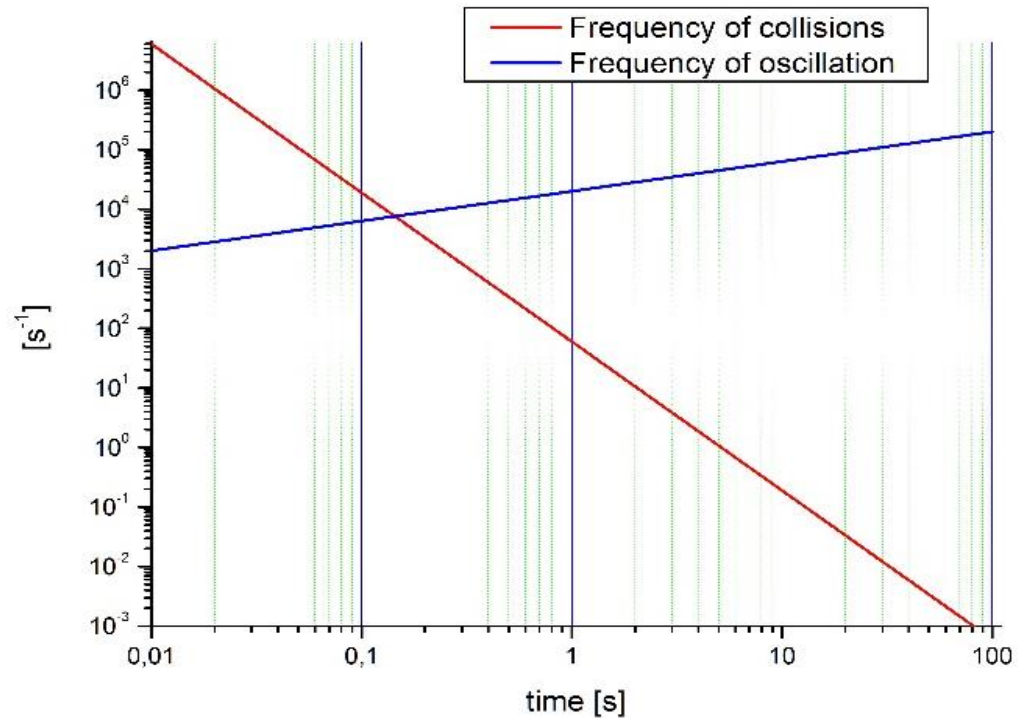
# Результаты расчётов процессов нейтринных осцилляций с учётом СР-нарушения и учётом нейтринных столкновений



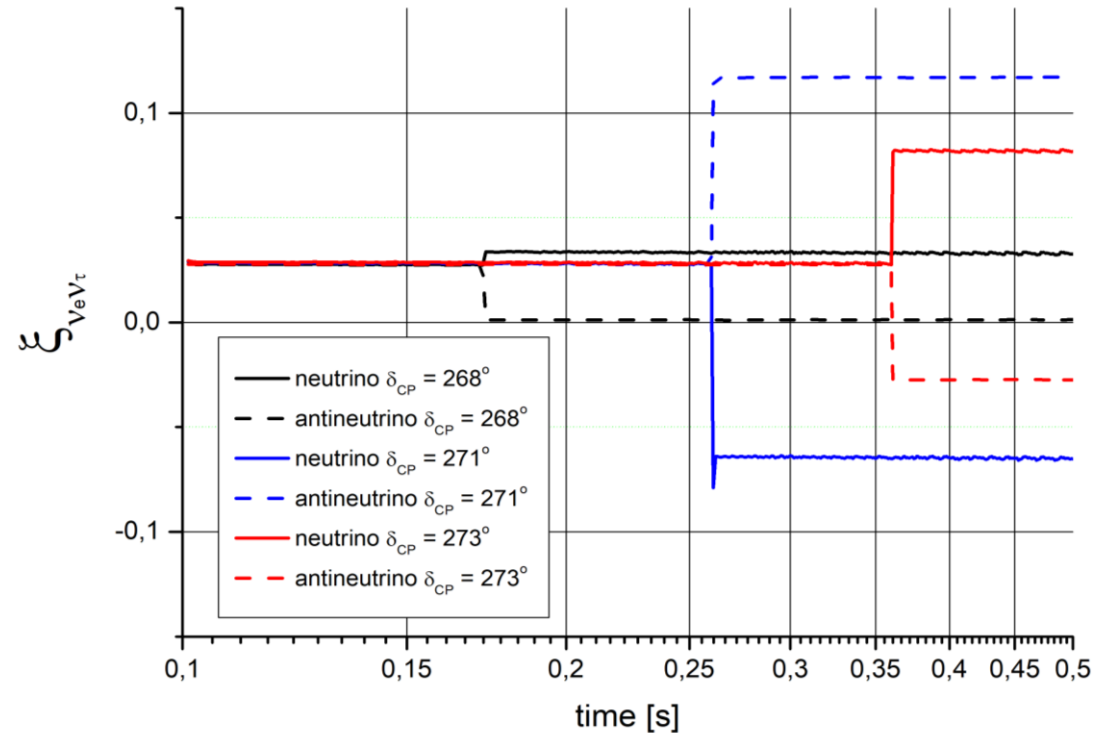
Зависимость электронной нейтрино антинейтринной асимметрии от времени в процессе расширения Вселенной – а) для прямой иерархии нейтринных масс, б) для инверсной иерархии нейтринных масс.

В результате расчётов выяснилось, что в процесс расширения вселенной **наблюдается бифуркация асимметрии**, причём прямой иерархии масс соответствует неустойчивое состояние, а для инверсной иерархии масс возникает два устойчивых состояния с противоположными знаками асимметрии. Таким образом, можно сделать исключительно важное заключение, что в **природе реализуется инверсная иерархия масс**.

**Зависимость частоты столкновений и частоты осцилляций от времени в процессе расширения Вселенной.**

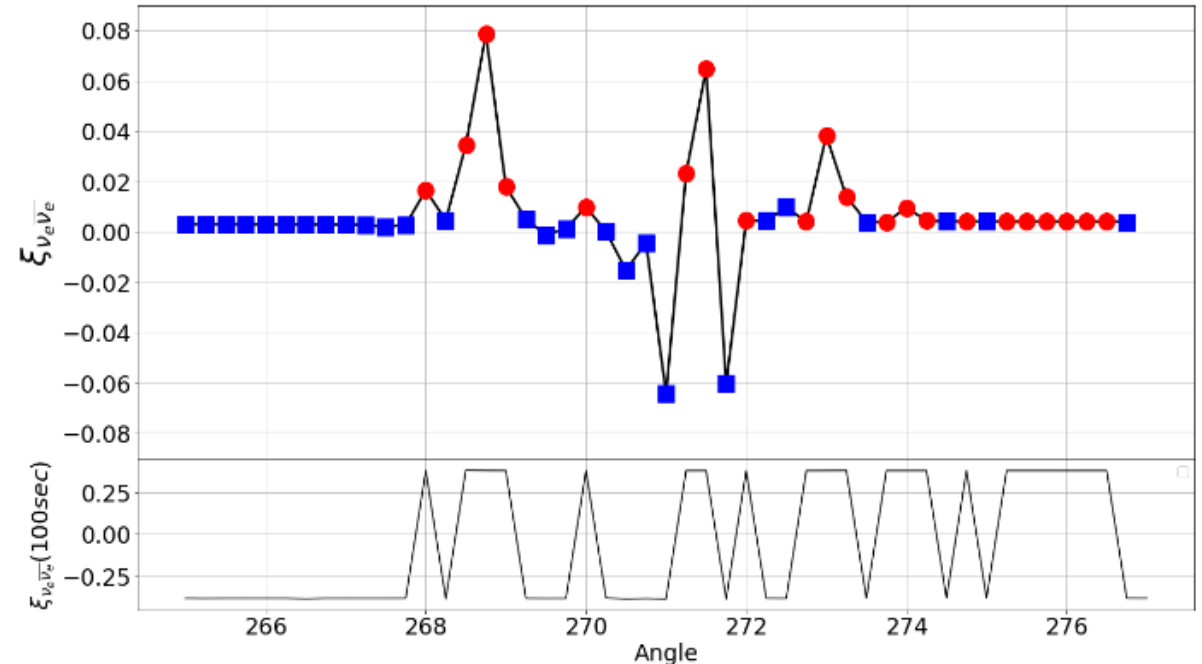
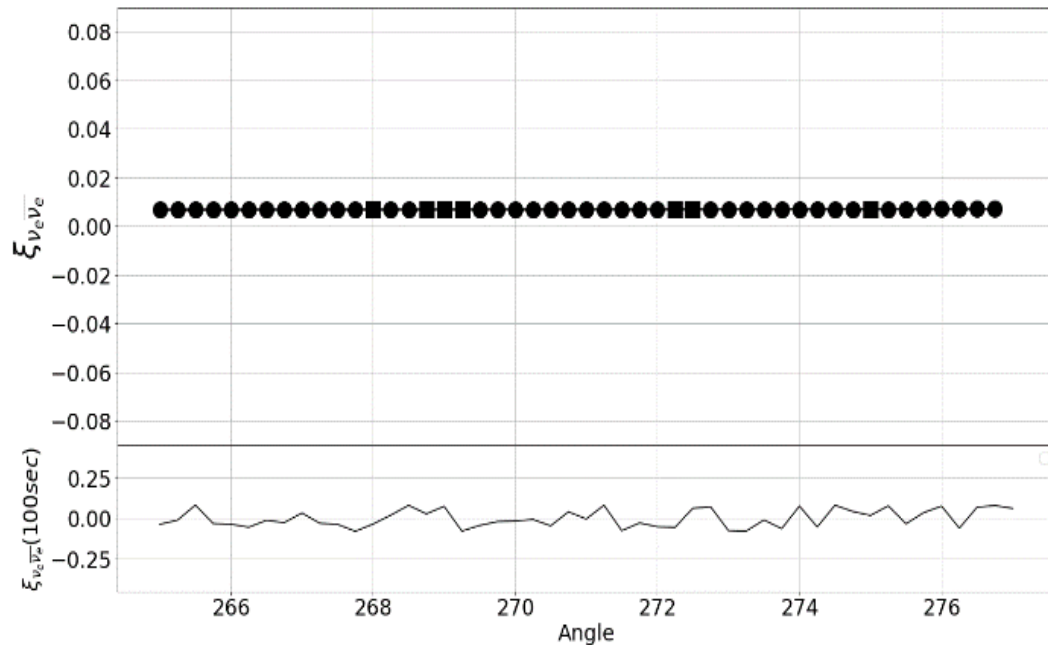


**Поведение асимметрии между электронным и тау нейтрино, а также между электронным и тау антинейтрино во временном интервале 0.1 – 0.5 секунды.**



**Здесь имеет место быть классическое выполнение резонансных условий, а именно, совпадение частот при фазовом сдвиге  $-\pi / 2$**

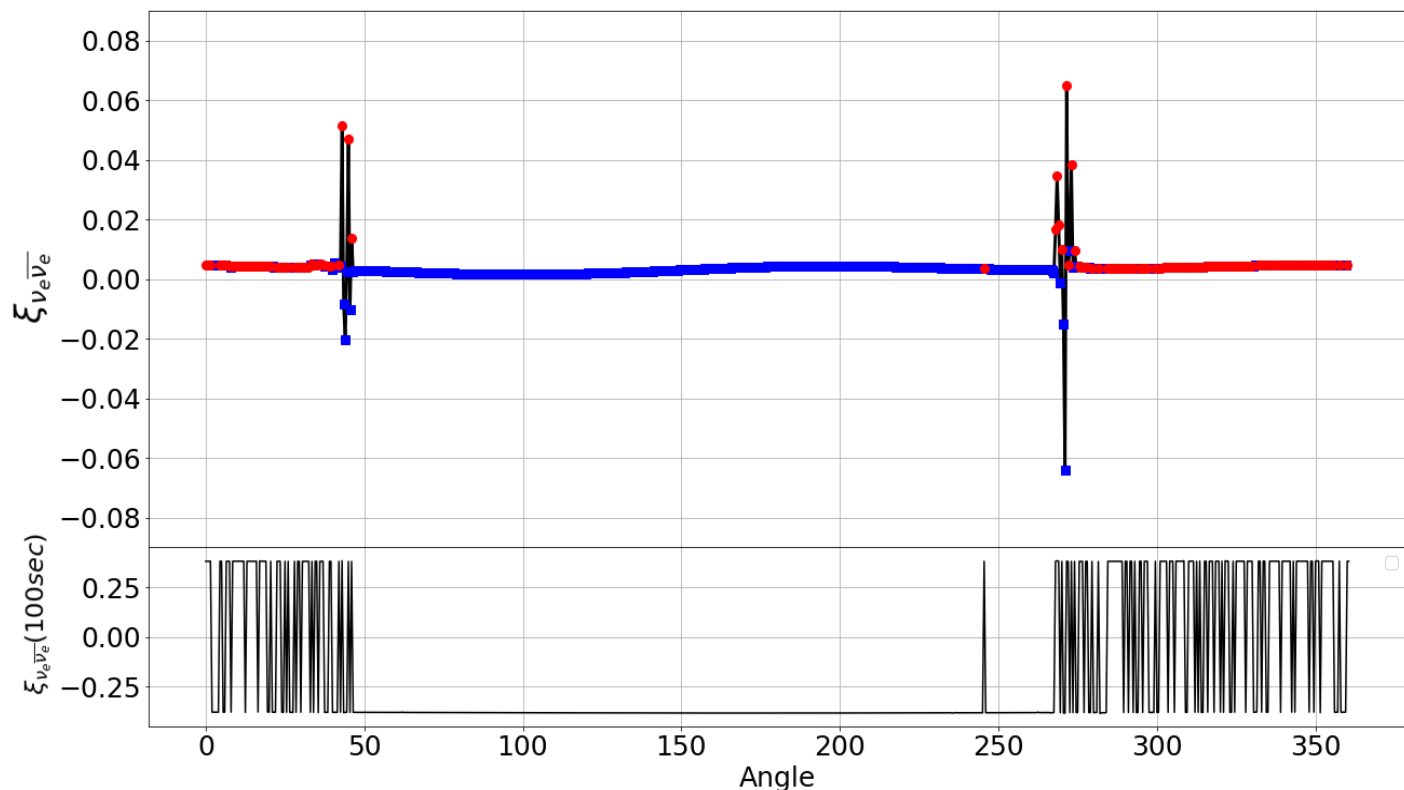
## Зависимость электронной нейтрино-антинейтринной асимметрии от фазы CP-нарушения



Зависимость электронной нейтрино антинейтринной асимметрии от фазы CP-нарушения– а) для прямой иерархии нейтринных масс, б) для инверсной иерархии нейтринных масс.

Наличие процесса **резонансного усиления CP-нарушения** может быть проверено по дисперсии в астрофизических данных массового содержания He4.

# Зависимость электронной нейтрино-антинейтринной асимметрии от фазы CP-нарушения для инверсной иерархии нейтринных масс в диапазоне от $0-2\pi$



**Возникает вопрос выбора между двумя решениями математической задачи.** Судя по всему, предпочтение следует отдать фазе запаздывания минус 90 градусов, т.к. фаза плюс 45 градусов является опережающей и противоречит причинно-следственным отношениям. **После столкновения процесс осцилляций возникает в новом состоянии с фазой CP-нарушения.**

## Уравнения баланса между плотностью нейтронов и протонов в расширяющейся Вселенной

$$\frac{dn_n}{dt} + 3Hn_n = n_p \sigma_{\bar{\nu}p} cn_{\bar{\nu}} - n_n \sigma_{\nu n} cn_{\nu} - n_n / \tau_n$$

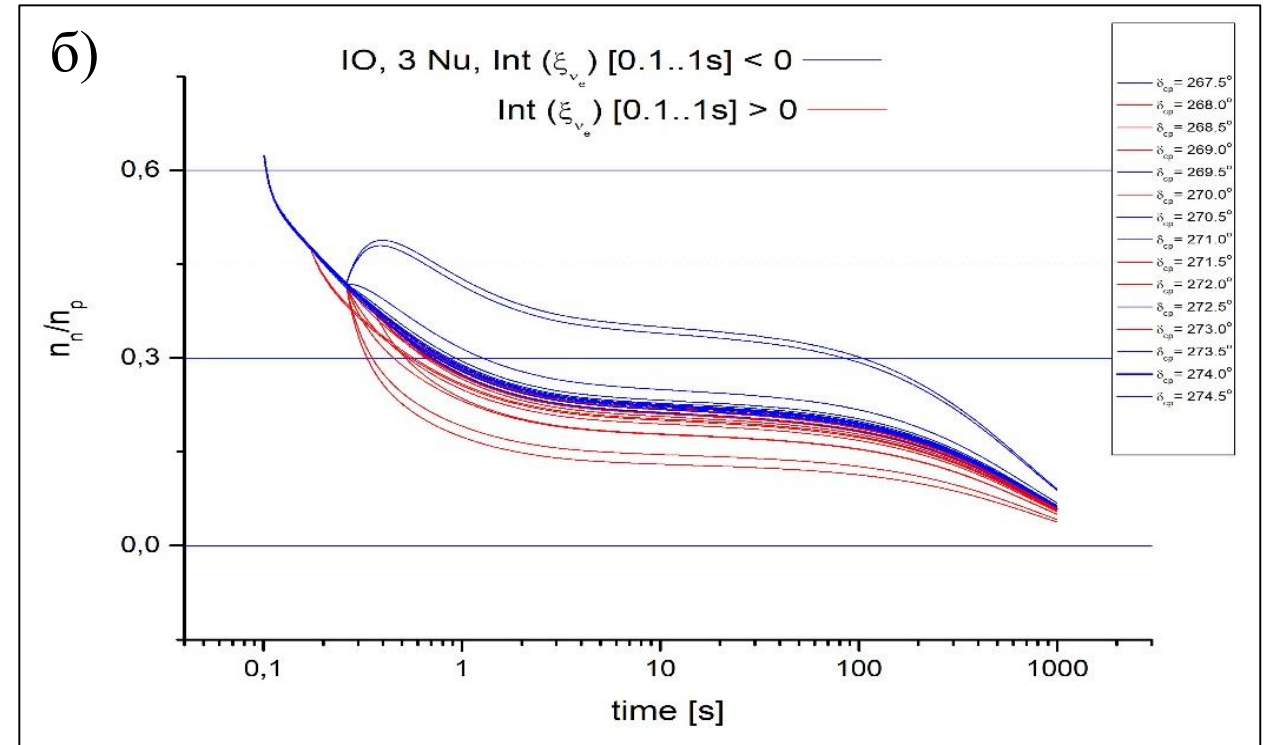
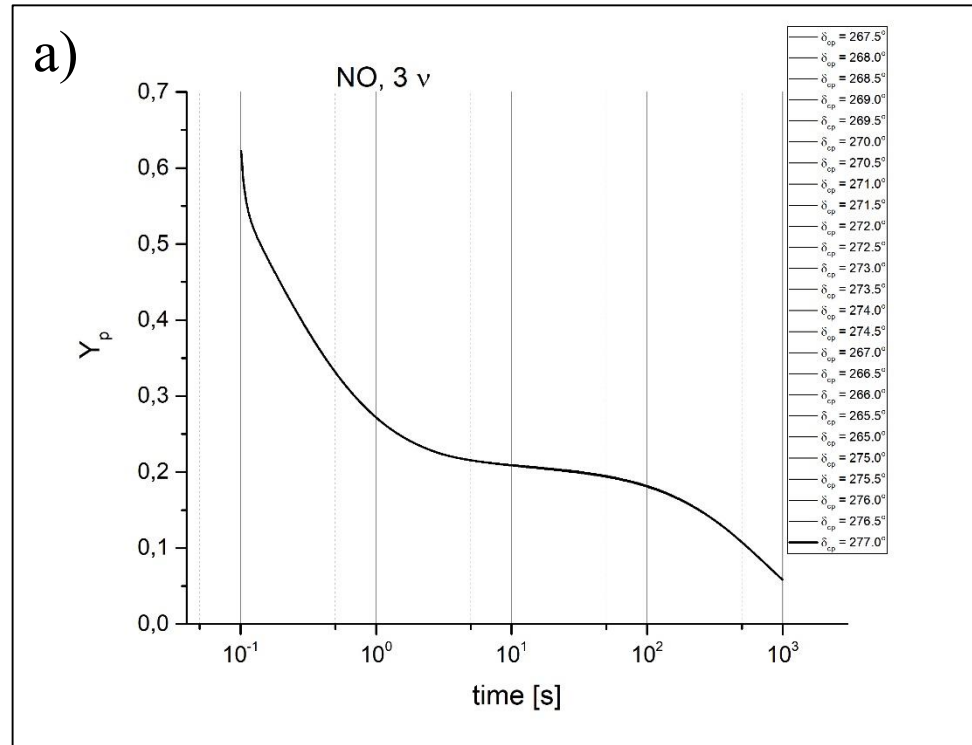
$$\frac{dn_p}{dt} + 3Hn_p = -n_p \sigma_{\bar{\nu}p} cn_{\bar{\nu}} + n_n \sigma_{\nu n} cn_{\nu} + n_n / \tau_n$$

$n_n$      $n_p$     плотностью нейтронов и протонов

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} \approx \frac{16}{(8\pi)^2} (1 + 3g_A^2) G_F^2 |p_{e^-}| \varepsilon_{e^-} \quad \nu + n \rightarrow p + e^- \quad \varepsilon_{e^-} \quad p_{e^-} \quad \text{- энергия и импульс электрона}$$

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} \approx \frac{16}{(8\pi)^2} (1 + 3g_A^2) G_F^2 |p_{e^+}| \varepsilon_{e^+} \quad \bar{\nu} + p \rightarrow n + e^+ \quad \varepsilon_{e^+} \quad p_{e^+} \quad \text{энергия и импульс позитрона}$$

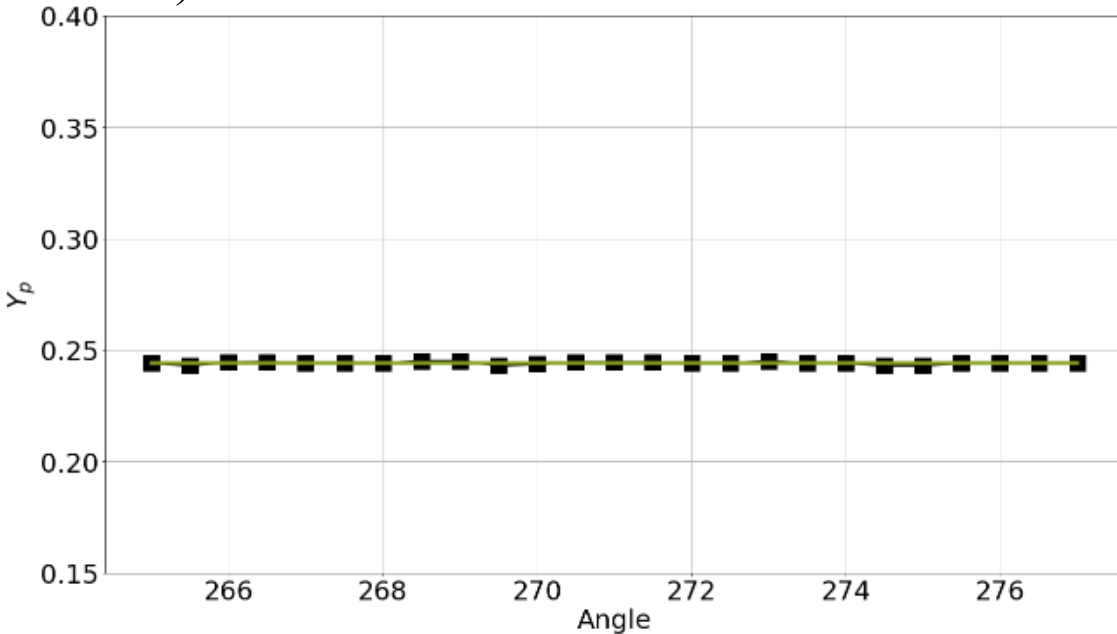
# Зависимость нейтрон протонного отношения от фазы CP-нарушения для прямой иерархии нейтринных масс и для инверсной иерархии нейтринных масс



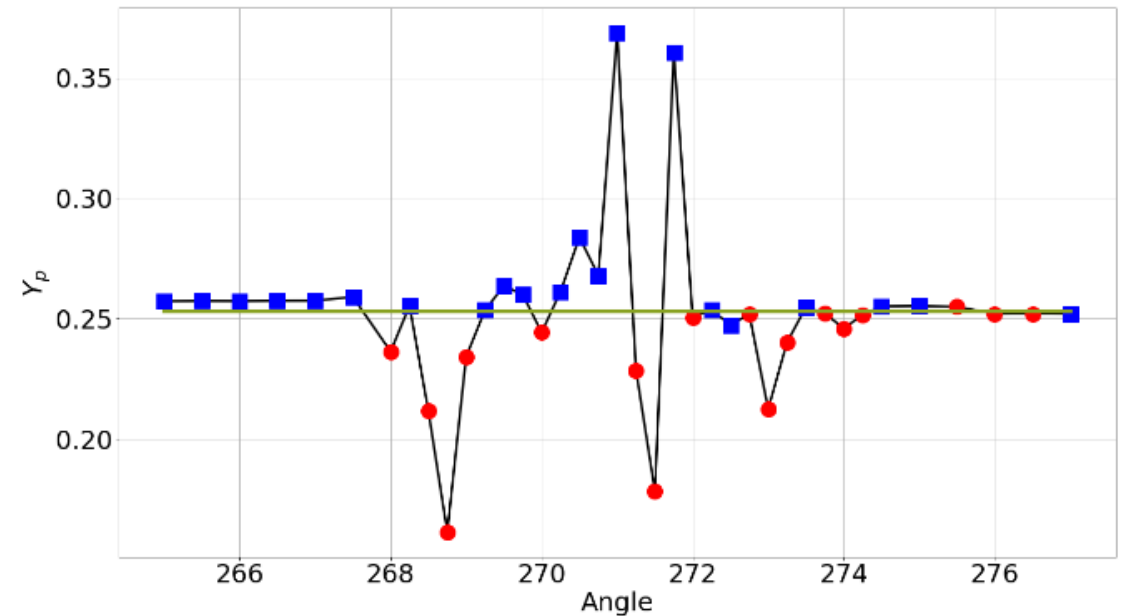
Зависимость нейтрон протонного отношения от фазы CP-нарушения для прямой иерархии нейтринных масс и для инверсной иерархии нейтринных масс представлена на рис а) и б).

# Зависимость массового содержания $He4$ из-за резонансного поведения электронной нейтрино антинейтринной асимметрии для инверсной иерархии нейтринных масс

а).



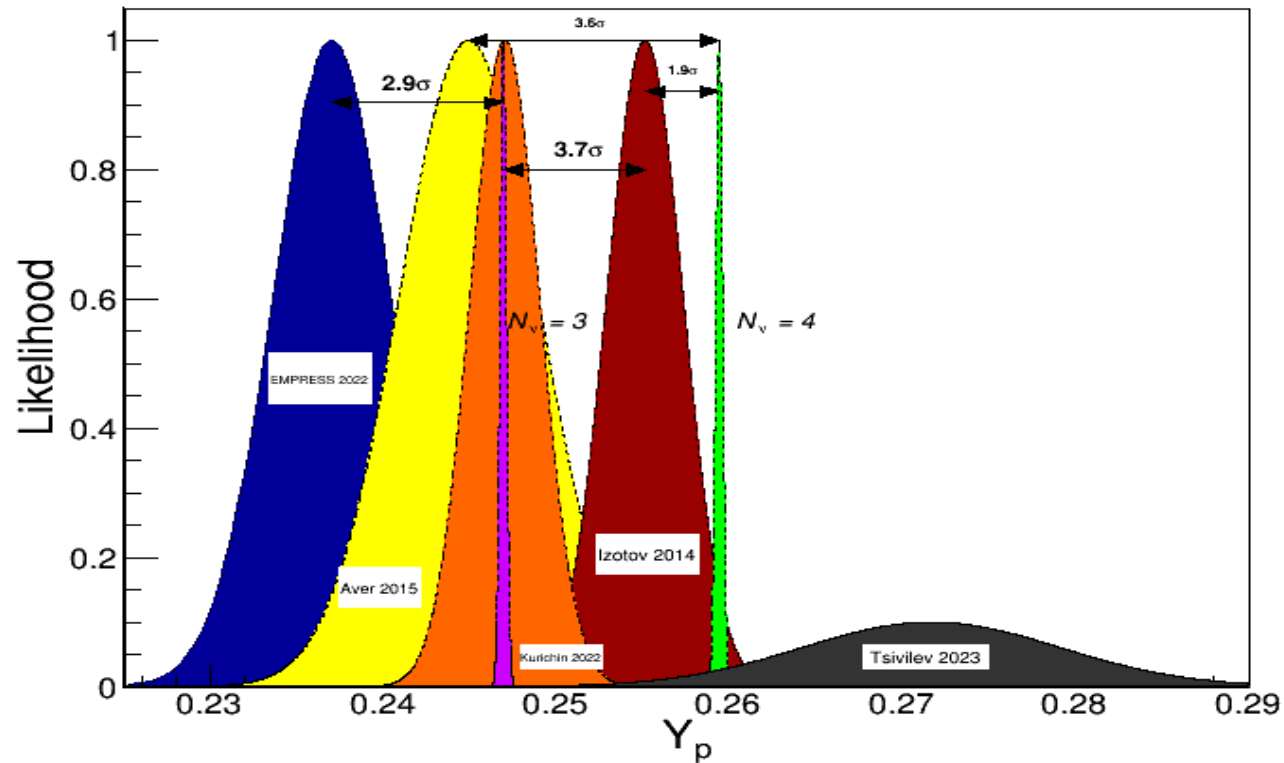
б).



Зависимость массового содержания  $He4$  **из-за резонансного поведения электронной нейтрино антинейтринной асимметрии** для инверсной иерархии нейтринных масс для инверсной иерархии нейтринных масс б). и отсутствие резонансного поведения для прямой иерархии масс а).

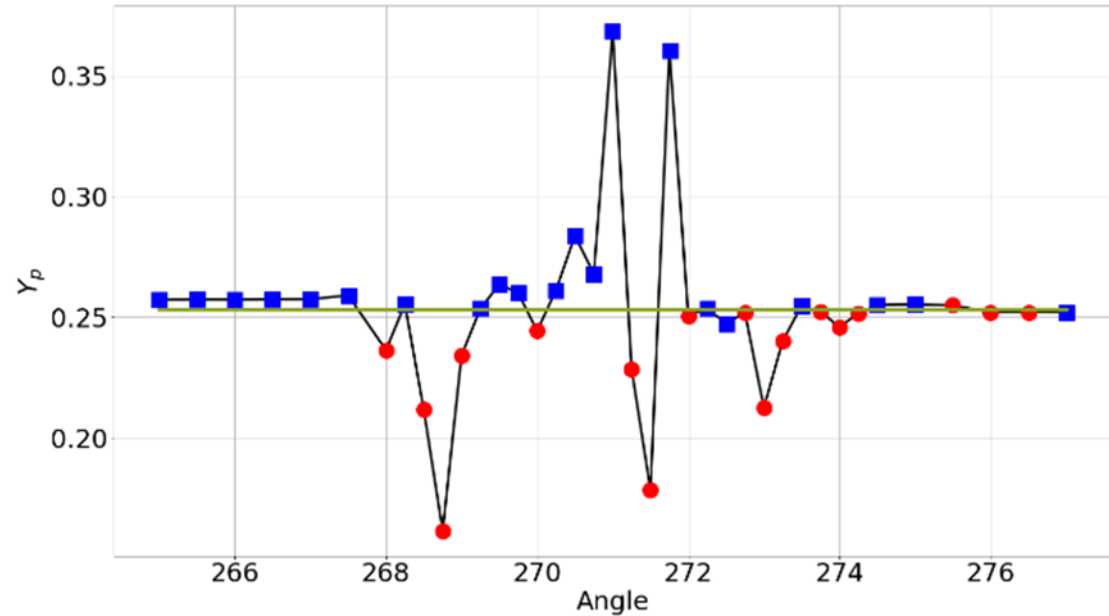
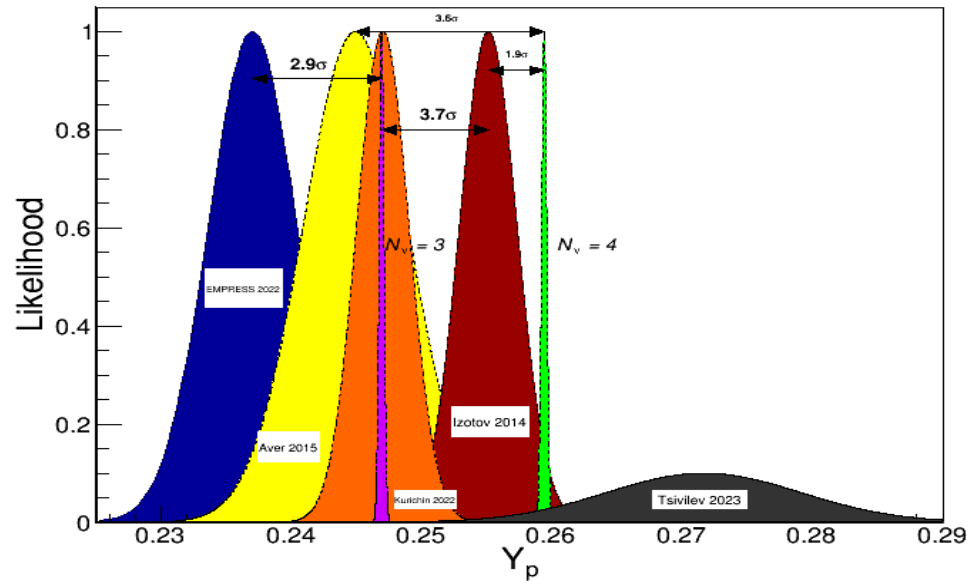


# Анализ астрофизических данных



Сравнение расчетных предсказаний содержания  $^4\text{He}$  с известным временем жизни нейтрона и величиной барионной асимметрии в модели  $N_\nu = 3$  и  $N_\nu = 4$  (фиолетовый и зеленый пики соответственно) с результатами астрофизических наблюдений: Изотов 2014, Авер 2015, Куричин 2022 и ИМПЕРАЦИЯ 2022, Tsivilev 2023 (красное, желтое, оранжевое, синее и чёрное распределение соответственно)

# Анализ астрофизических расчётных данных



Теперь следует сравнить результаты расчётов с результатами астрофизических данных для массового содержания  $^4\text{He}$ . **Рисунок показывает, что разброс экспериментальных астрофизических данных значительно превосходит точность измерений, а максимальное отклонение составляет 13% при точности измерений 2-3%.** Дисперсия расчётных результатов массового содержания  $^4\text{He}$  из-за резонансного поведения электронной нейтрино антинейтринной асимметрии для инверсной иерархии нейтринных масс составляет приблизительно 20-30%. Для прямой иерархии нейтринных масс дисперсия массового содержания  $^4\text{He}$  отсутствует.

# Интерпретация расхождения данных массового содержания He4 в разных измерениях

Для интерпретации расхождения данных массового содержания He4 в разных измерениях следует привлечь следующие аргументы. **Дело в том, что, хотя расширение пространства происходило одновременно, но оно происходило в разных точках пространства, которые могли быть не связаны причинно-следственными отношениями из-за конечной скорости света.** Поэтому формирование разных асимметрий и как следствие разного массового содержания He4 представляется возможным. Для подтверждения этих соображений необходим детальный анализ астрофизических данных на предмет того, из каких звёздных скоплений получены данные результаты. Этот вопрос может быть адресован астрофизикам. Но уже сейчас можно утверждать из публикаций, что данные группы Импрес и данные Tsivilev 2023 относятся к разным созвездиям: Импресс - созвездие «Субару», а данные Цивилёв 2023 относятся к созвездию «Орион». **Эти созвездия находятся в разных полушариях звёздного неба.** «Орион» это наша галактика.

**В результате проведённых расчётов показано, что резонансным образом реализуется максимальное CP-нарушение, которое влияет на дисперсию массового содержание He4. Дисперсия массового содержание He4 подтверждается в астрофизических наблюдениях.**

**Заключение по второй части доклада:**  
**Возникновение нейтринных асимметрий**  
**в процессе расширения Вселенной, иерархия нейтринных масс и CP-нарушение**

1. Обнаружено, что **происходит бифуркация асимметрии** на два состояния с положительной и отрицательной асимметрией **для инверсной иерархии нейтринных масс**. Состояние с нормальной иерархией нейтринных масс является неустойчивым и не реализуется.
2. Проведены расчёты для прямой и обратной иерархии масс в зависимости от фазы CP-нарушения.
3. Рассчитано влияние этого процесса на **дисперсию массового содержания He4**, которое подтверждается в астрофизических наблюдениях.

## ОБЩЕЕ ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Анализ результатов эксперимента Нейтрино-4 и данных экспериментов GALLEX, SAGE и BEST подтверждает параметры нейтринных осцилляций, заявленные экспериментом Нейтрино-4 ( $\Delta m_{14}^2 = 7.3 \text{ эВ}^2$  и  $\sin^2 2\theta_{14} \approx 0.36$ ) и увеличивает достоверность до  $5.8\sigma$ .

2.

Такое стерильное нейтрино термализуется в космической плазме, даёт вклад **в плотность энергии Вселенной 5%** и может объяснить **15-20%** тёмной материи.

Введением ещё двух тяжёлых стерильных нейтрино позволяет довести вклад стерильных нейтрино в **тёмную материю Вселенной до уровня 27%** и объяснить крупномасштабную структуру Вселенной.

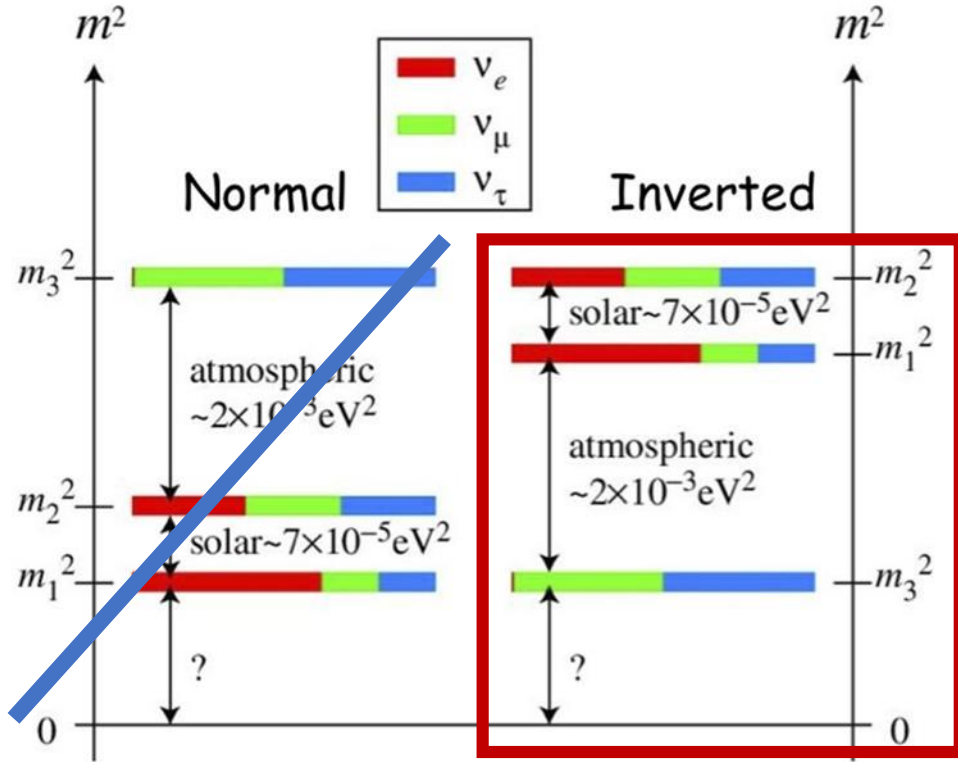
3.

Обнаружено, что в процессе расширения Вселенной происходит **бифуркация асимметрии** на два состояния с положительной и отрицательной асимметрией для инверсной иерархии нейтринных масс. **Состояние с нормальной иерархией нейтринных масс является неустойчивым и не реализуется.**

3.

Neutrino mass

?

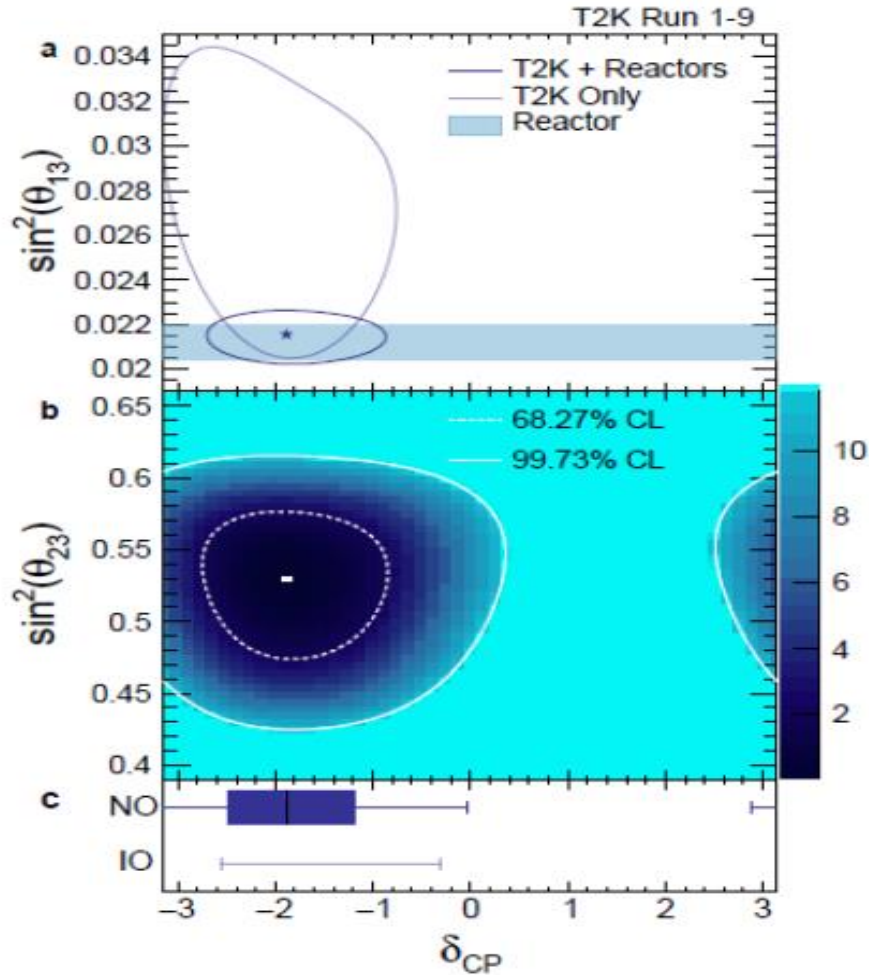


Вывод о том, что в природе реализуется **инверсная иерархии** масс является очень ответственным и требует дальнейшего более детального анализа расчётов.

**Утверждение о максимальном CP-нарушение не является однозначно доказанным.**



# Эксперименте Т2К



**В связи с этим следует отметить, что в эксперименте Т2К на уровне двух стандартных отклонений наблюдается эффект CP-нарушения в нейтринных осцилляциях. Полученные данные свидетельствуют о максимальном нарушении CP, параметр  $\delta_{CP}$  близок к  $-90^\circ$ .**

K. Abe, R. Akutsu, A. Ali et al., T2K collaboration, Constraint on the Matter-Antimatter Symmetry-Violating Phase in Neutrino Oscillations, Nature 580, 339-344 (2020), <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2177-0>

## Сопутствующие выводы

Эффективная масса электронного нейтрино:

$$m_{4\nu_e}^{\text{eff}} = (0.82 \pm 0.18) \text{eV}, (m_4 = 2.7 \pm 0.2 \text{eV})$$

Майорановское или дираковское нейтрино?  
Более вероятно – нейтрино Дирака!

Темная материя обеспечивается массами правых  
нейтрино  $m_{\nu_R} < 7$  кэВ.

**Что будет дальше покажет эксперимент!**

*Спасибо за Ваше  
внимание*