

Стерильные нейтрино, темная материя, Стандартная Модель с правыми нейтрино

НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ, Гатчина

А. П. Серебров

Научная сессия, посвященная 300-летию Российской Академии Наук.
1 по 5 апреля 2024 г. Дубна

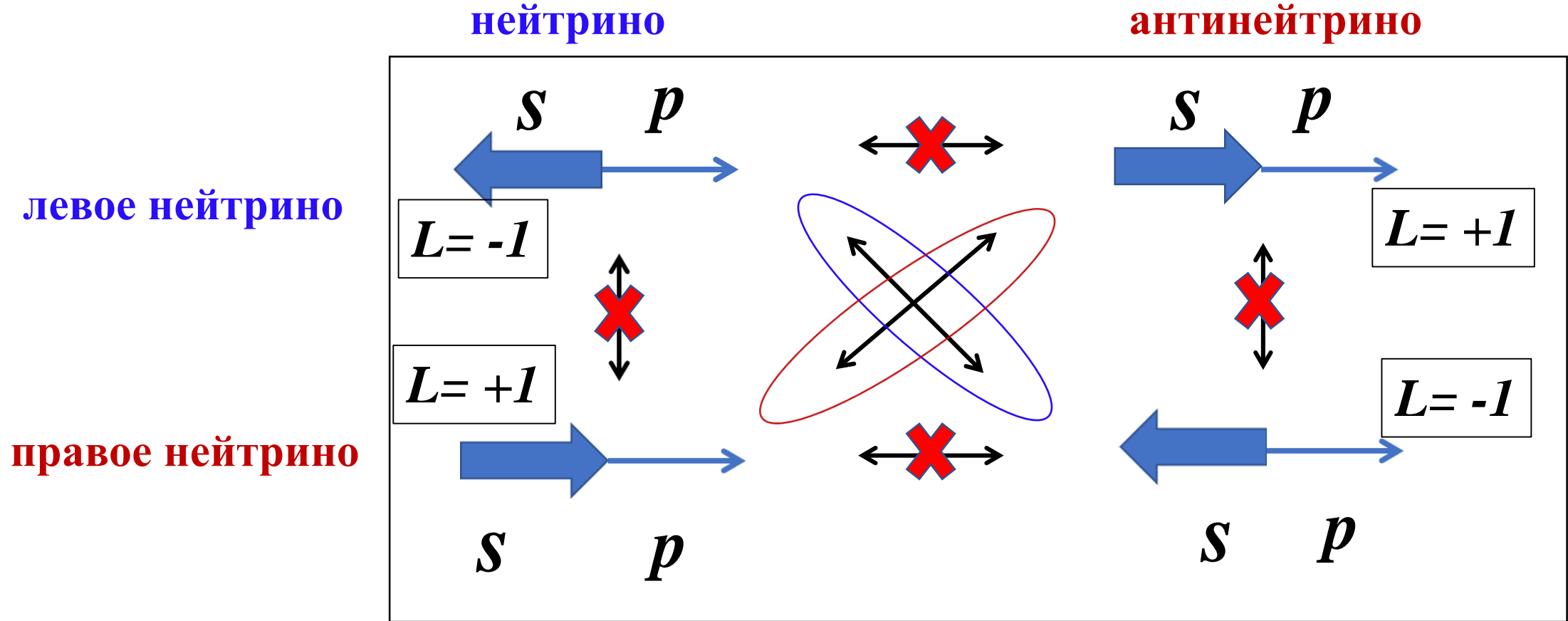
Аннотация

1. Стерильное нейтрино с параметрами заявленными экспериментом Нейтрино-4 ($\Delta m_{14}^2 = 7.3 \text{ eV}^2$, $\sin^2 2\theta_{14} = 0.36$) термализуется в космической плазме, даёт вклад в плотность энергии Вселенной 5% и **может объяснить 15% тёмной материи**.
2. Расширение нейтринной модели введением ещё **двух тяжёлых стерильных нейтрино** позволяет довести вклад стерильных нейтрино в тёмную материю Вселенной **до уровня 27%**. Представлен динамический процесс зарождения тёмной материи, состоящей из трёх правых нейтрино.
3. Показано, что современные астрофизические данные по массовому содержанию ${}^4\text{He}$ не позволяют сделать определённого заключение в пользу модели трёх или четырёх термализованных нейтрино.

стерильное нейтрино

≡

правое нейтрино

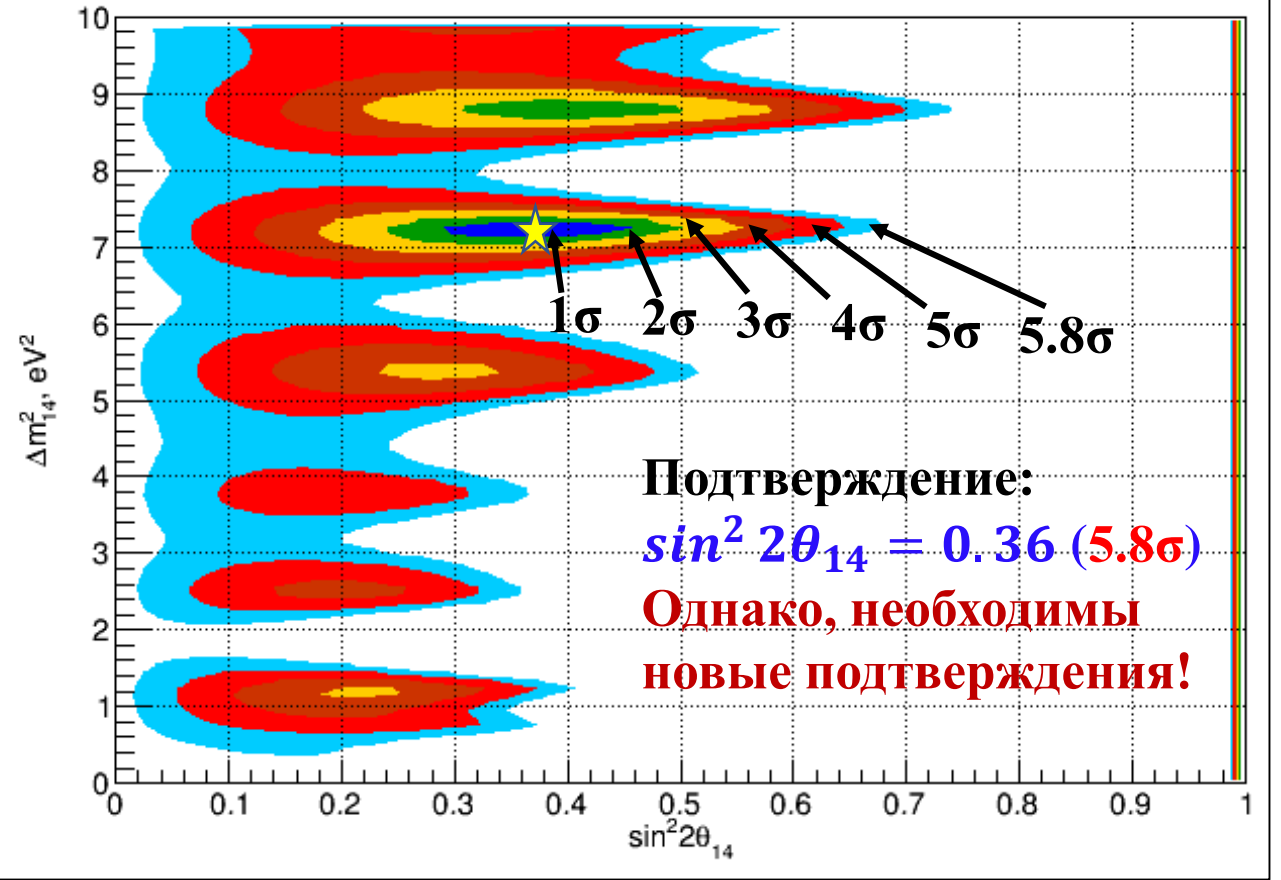
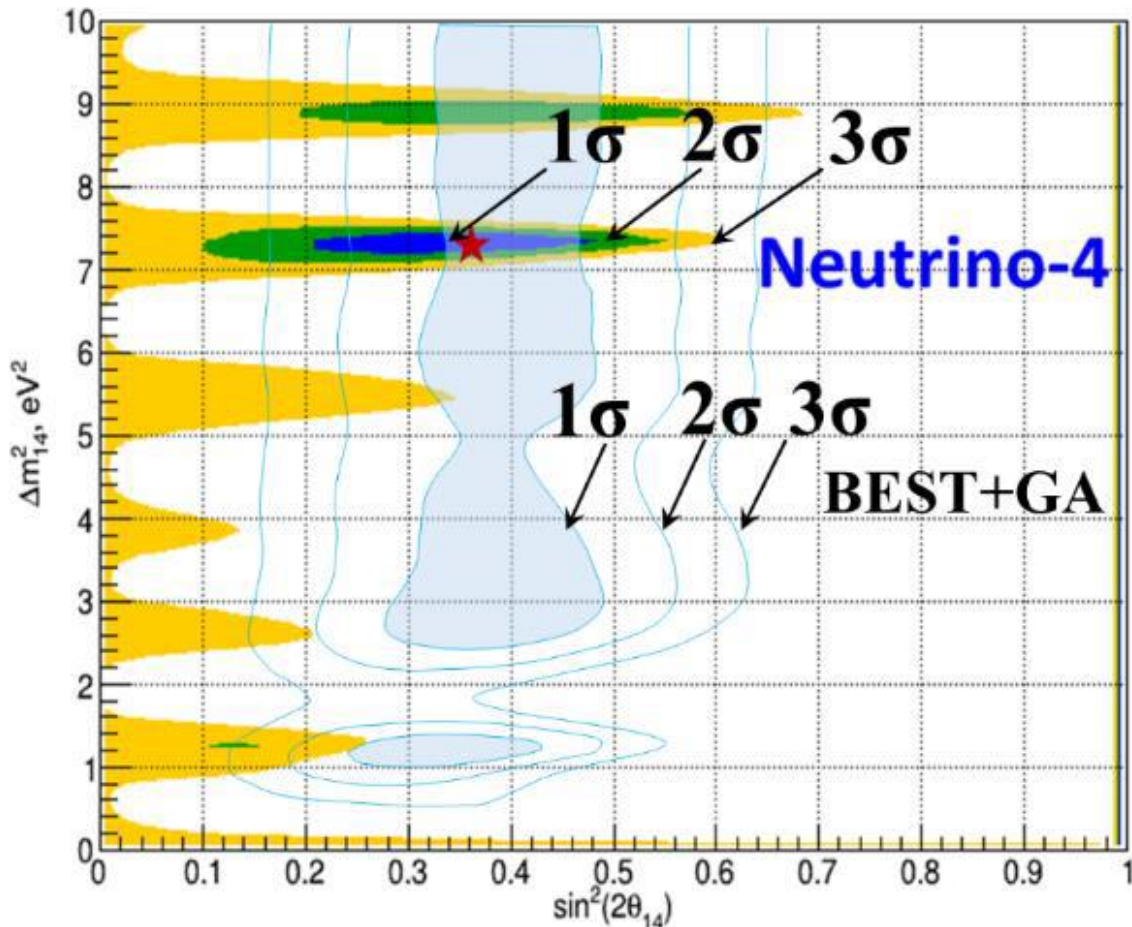


эксперимент Neutrino-4

$$\Delta m_{14}^2 = 7.3 \text{ eV}^2, \sin^2 2\theta_{14} = 0.36 \quad m_{\nu_4} = 2.7 \text{ eV}$$

эксперимент BEST + GA

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. .

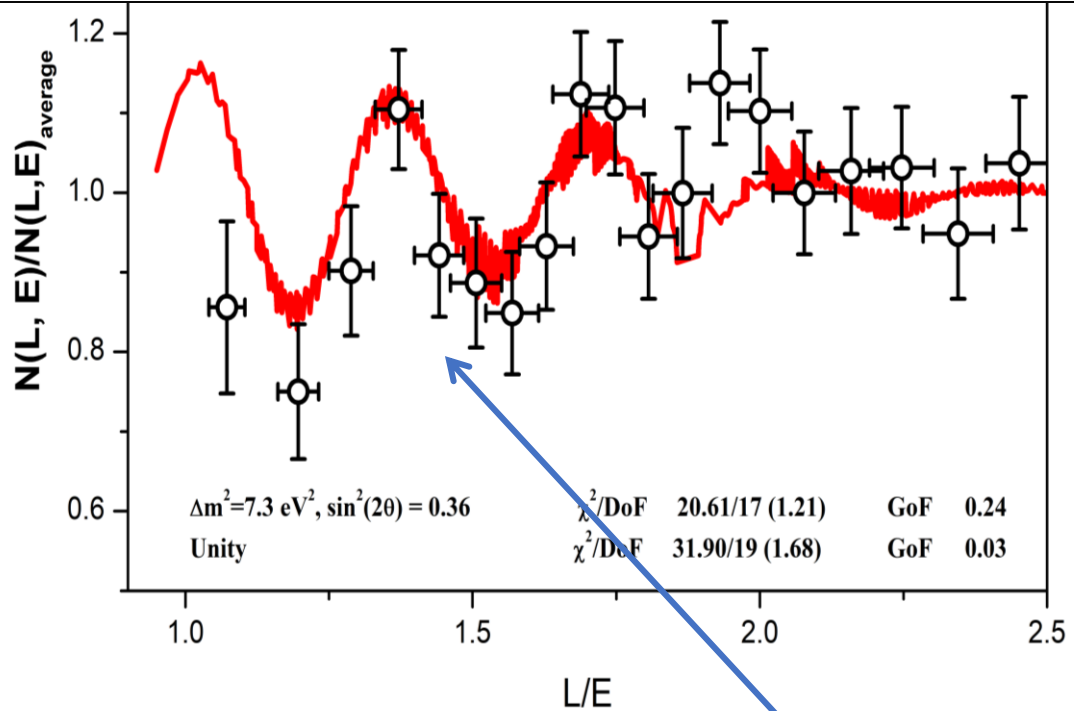
Результаты прямых экспериментов по поиску стерильных нейтрино – Neutrino-4 и BEST с GA указывают на существование стерильных нейтрино с осцилляционными параметрами: $\Delta m_{14}^2 = 7.3 \text{ eV}^2$, $\sin^2 2\theta_{14} = 0.36$, $m_4 = 2.7 \pm 0.2 \text{ eV}$

Эффект осцилляций в эксперименте «Нейтрино-4»

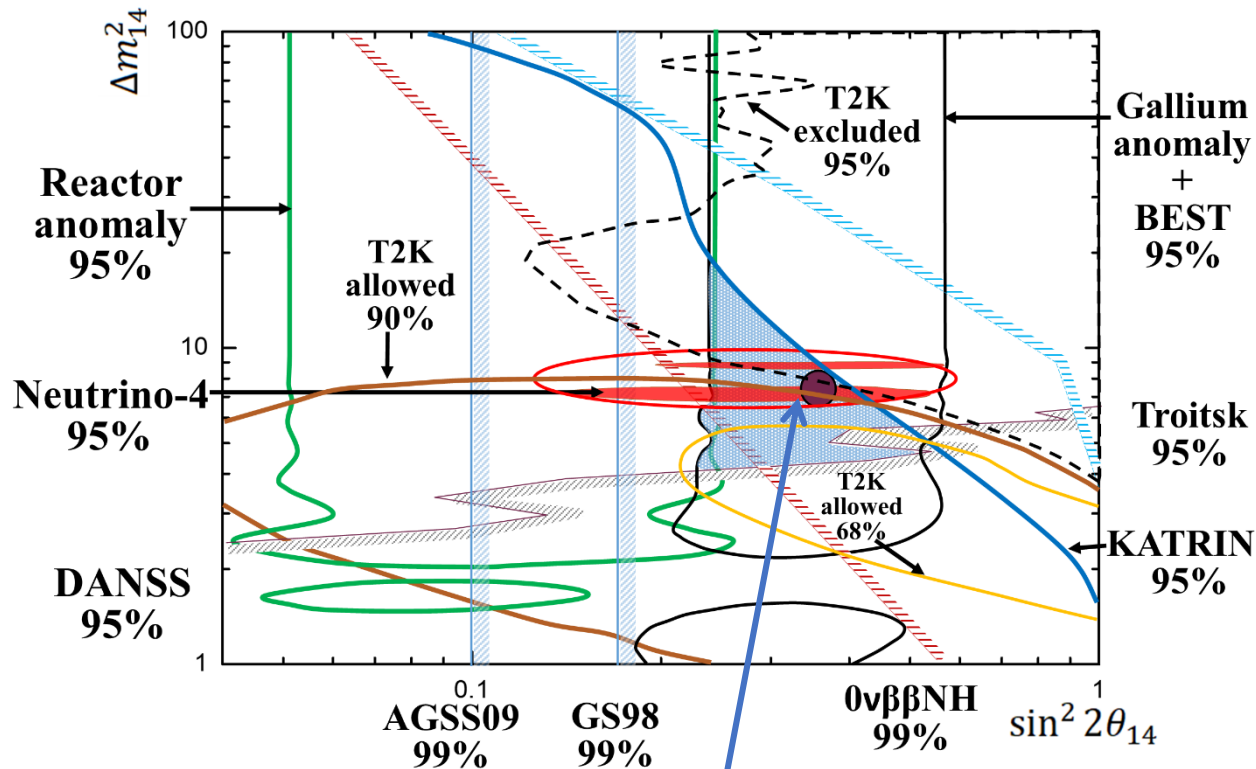
$$\Delta m_{14}^2 = (7.3 \pm 0.13_{st} + 1.16_{sys}) eV^2$$

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

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



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



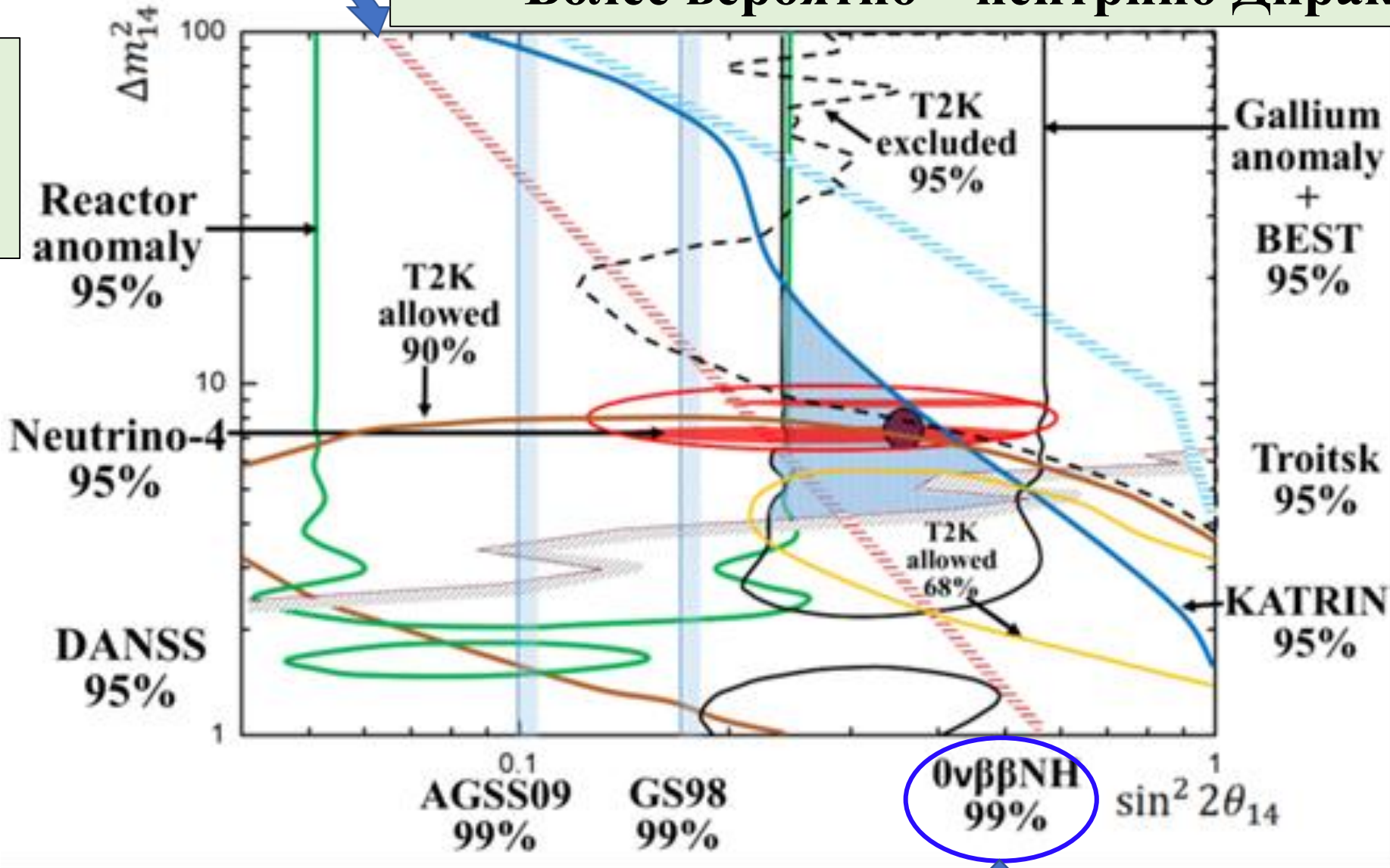
$$m_4 = 2.7 \pm 0.2 eV$$

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

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

Майорановское или дираковское нейтрино? Более вероятно – нейтрино Дирака!

Двойной
Бета Распад
Без нейтрино



Double Beta Decay

Нейтринная модель 3+1 и космология

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

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

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

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

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

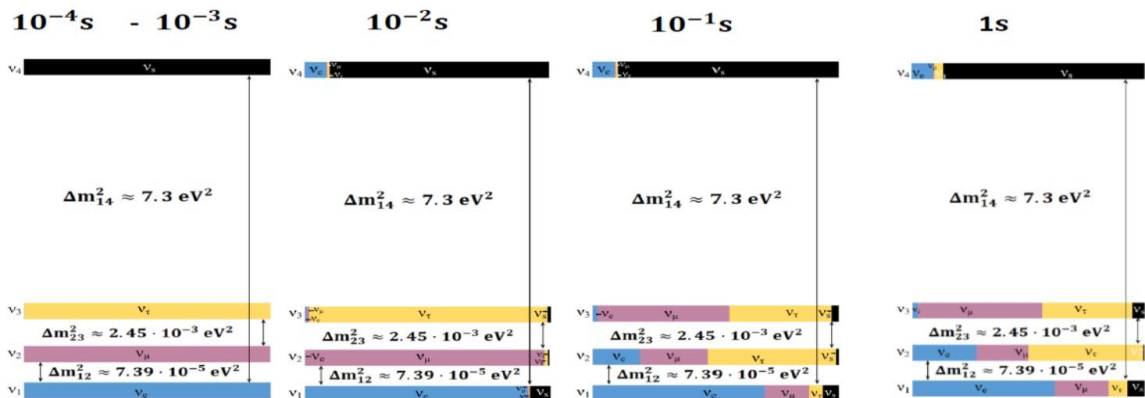
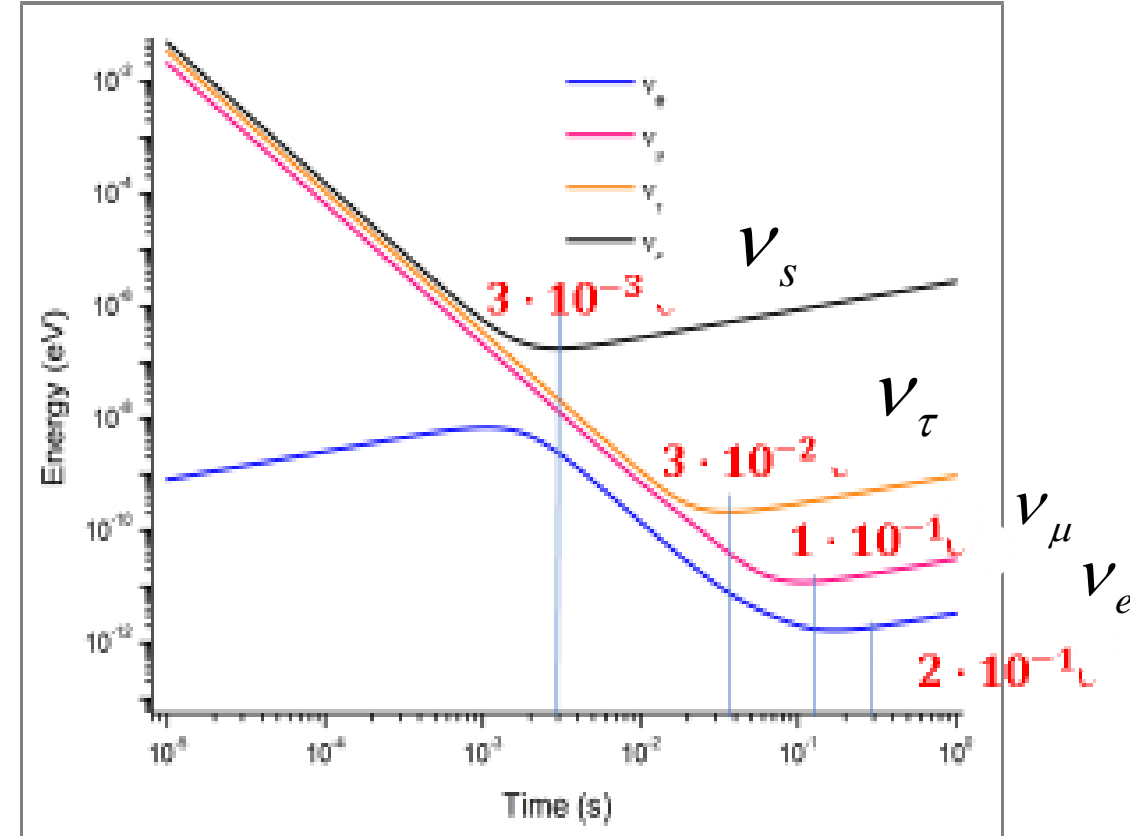
Потенциал нейтрино в космической плазме

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

1. Упрощение

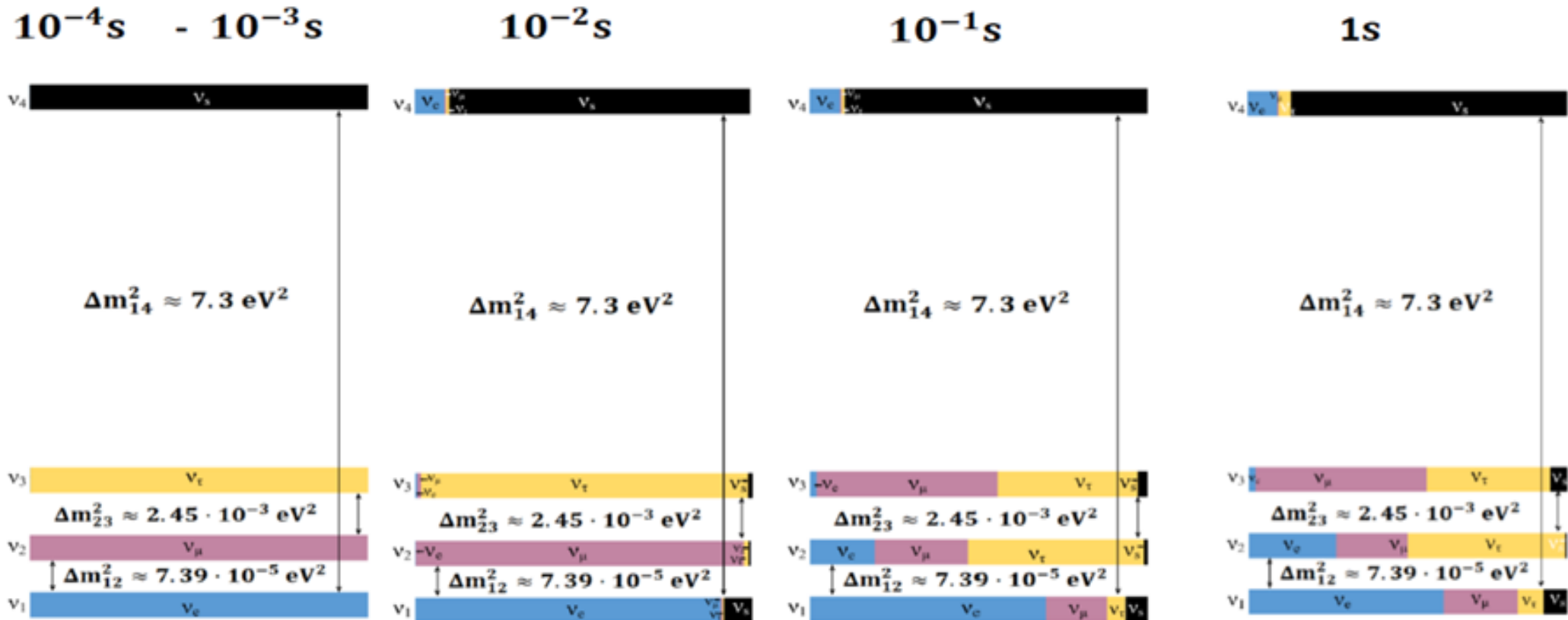
2. Нерезонансный случай

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



Поведение смешивания нейтрино в расширяющейся Вселенной

time →



A.P. Serebrov, R.M. Samoiloov, M.E. Chaikovskii, O.M. Zherebtsov,
JETP Letters, Vol. **116**, No. 10, pp. 669–682 (2022).

В данной работе мы рассмотрели более внимательно предыдущие оценки частоты столкновений нейтрино между собой и обнаружили, что был **не учтён эффект неупругого рассеяния**.

Дело в том, что любое рассеяние нейтрино на нейтрино приводит к изменению энергии нейтрино и процесс когерентного распространения нейтрино в среде прерывается. **Мнимая часть амплитуды рассеяния включает в себя поглощение и рассеяние с изменением энергии**. Именно рассеяние с изменением энергии не было учтено. Учёт этого эффекта увеличил частоту столкновений **приблизительно в 120 раз**. Увеличение частоты столкновений приводит к увеличению скорости термализации стерильного нейтрино. **Ниже приводятся результаты расчётов с учётом этого обстоятельства**.

Уравнение рождения и уничтожения стерильных нейтрино

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

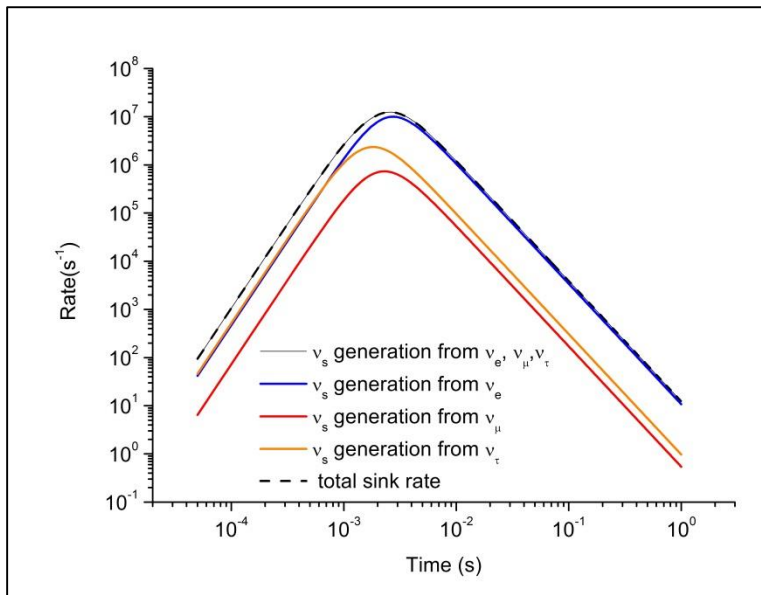
$$E = 3.15T \quad H(T) = \frac{T^2}{M_{Pl}^*}$$

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

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

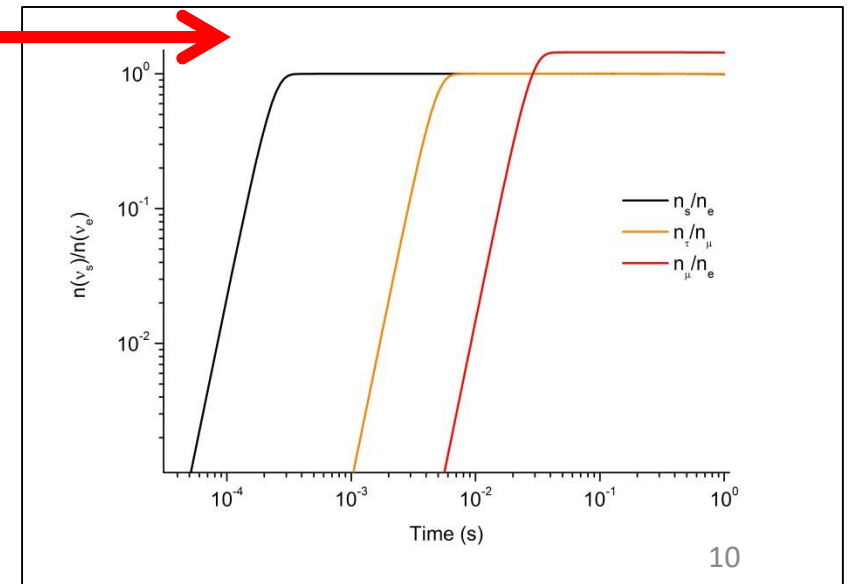
Генерация и разрушение стерильных нейтрино

Плотности нейтрино разных типов одинаковы.



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

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



РЕЗУЛЬТАТ

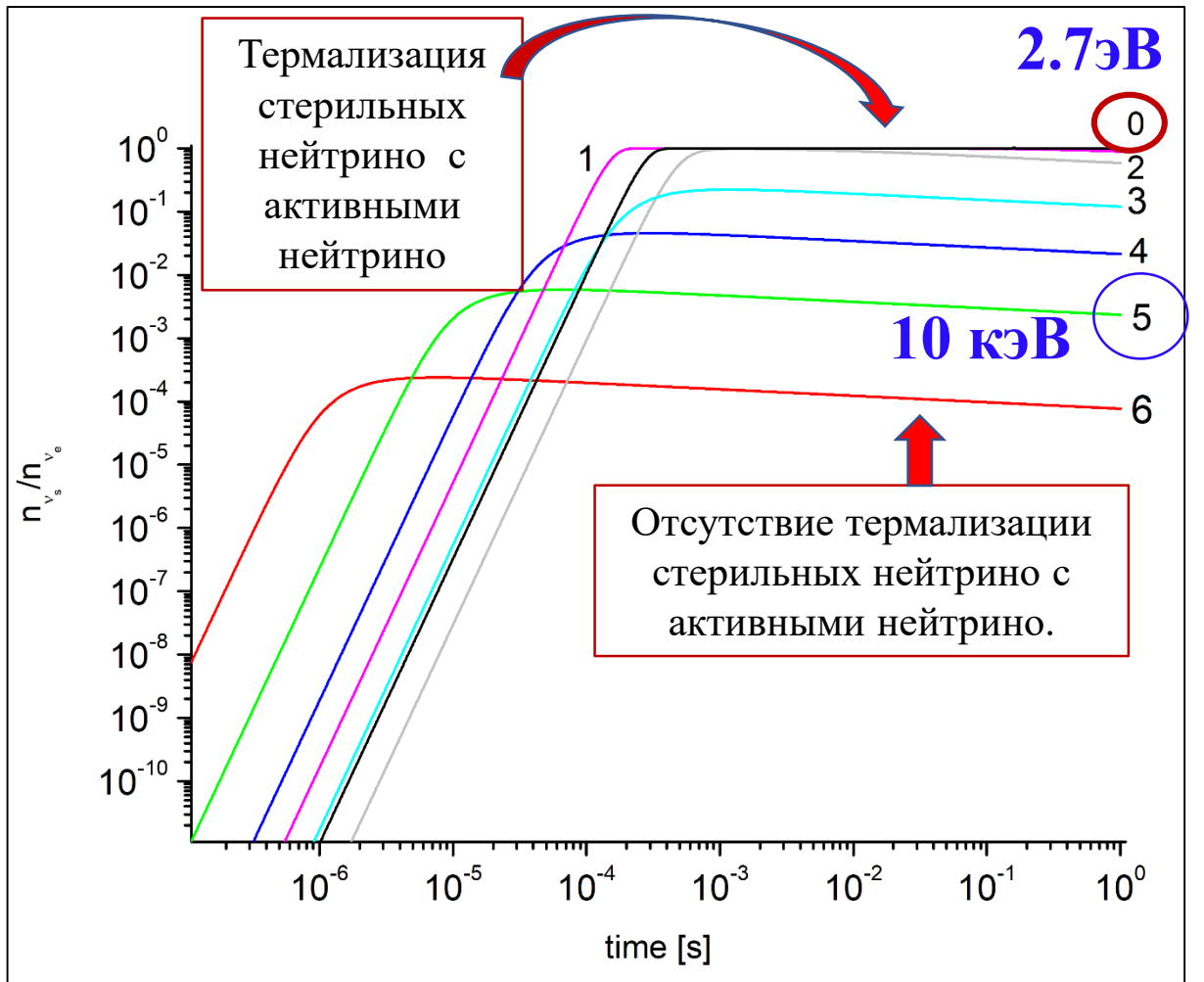
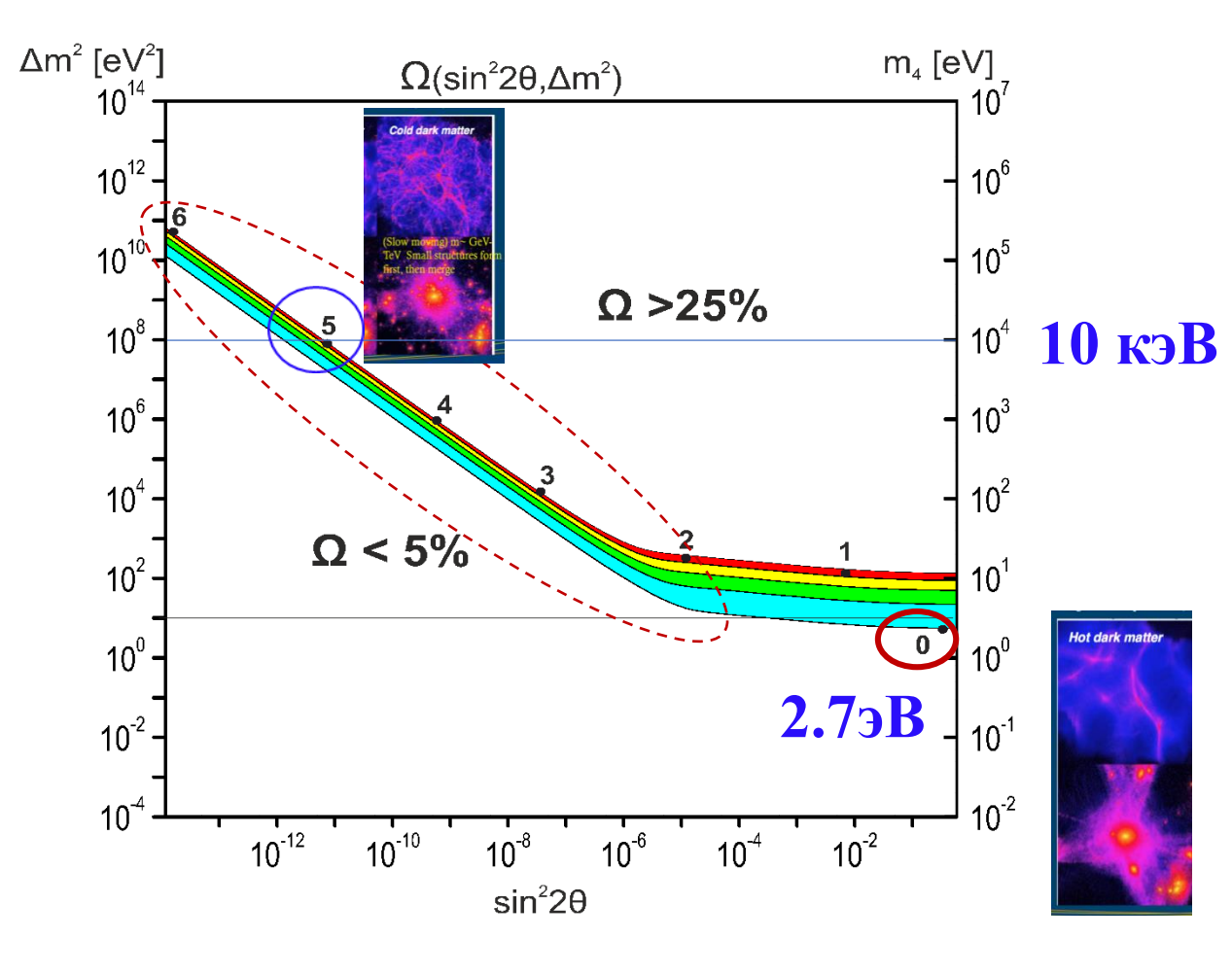
Вклад стерильного нейтрино к плотности энергии Вселенной

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

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

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

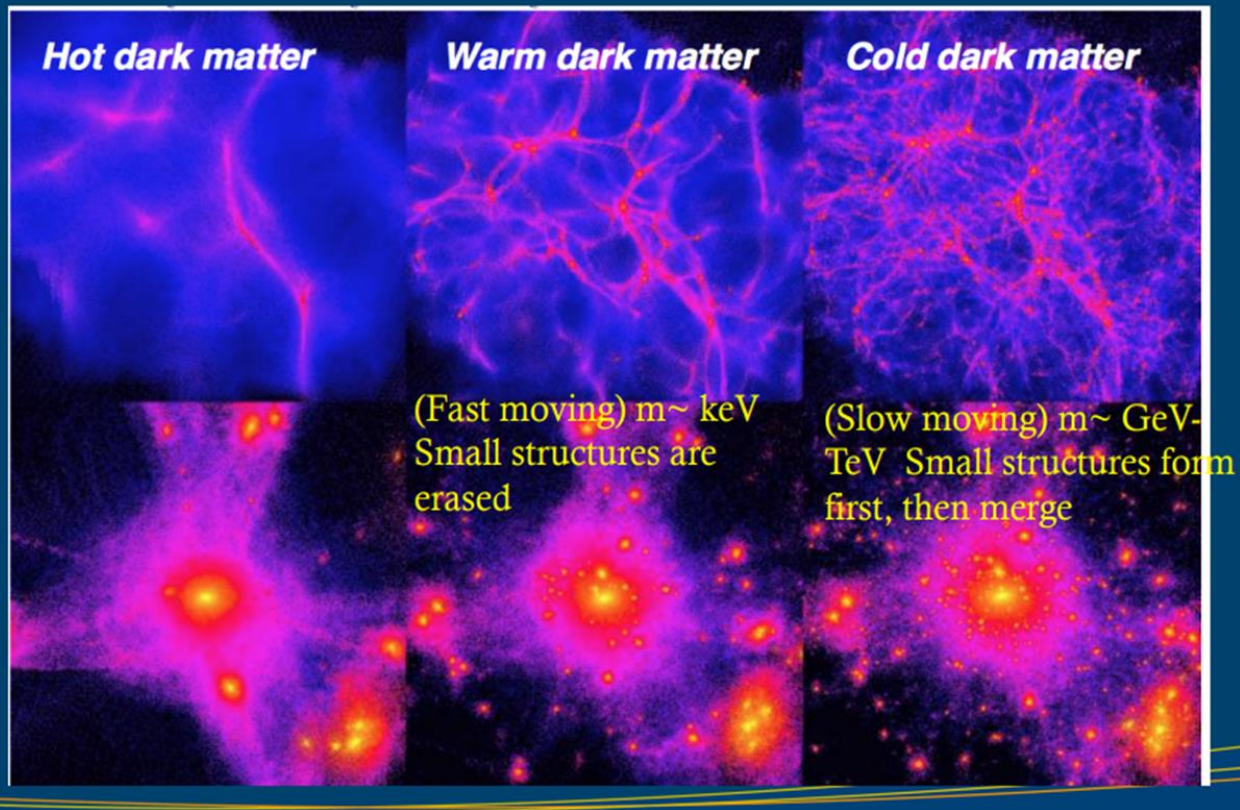
Тяжелые стерильные (правые) нейтрино с очень малыми углами смешивания.



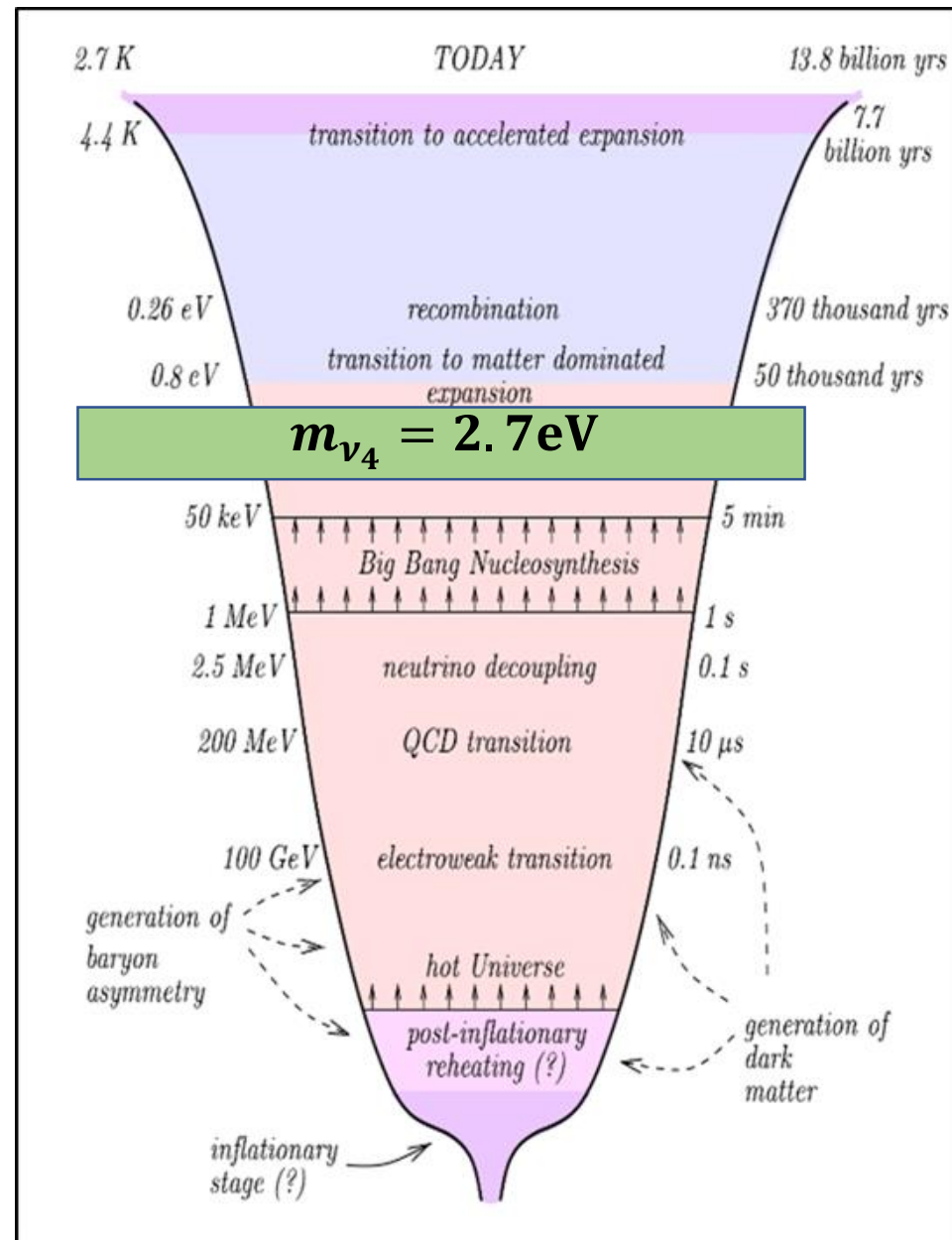
Тяжелые стерильные (правые) нейтрино с очень малыми углами смешивания можно рассматривать как темную материю и объяснять строение Вселенной!

Structure formation depends on DM type

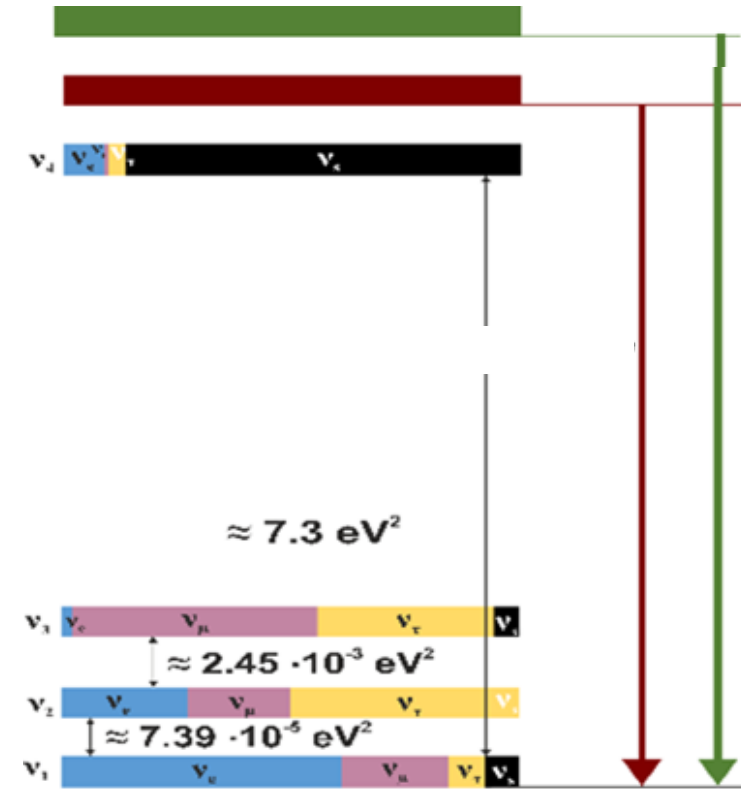
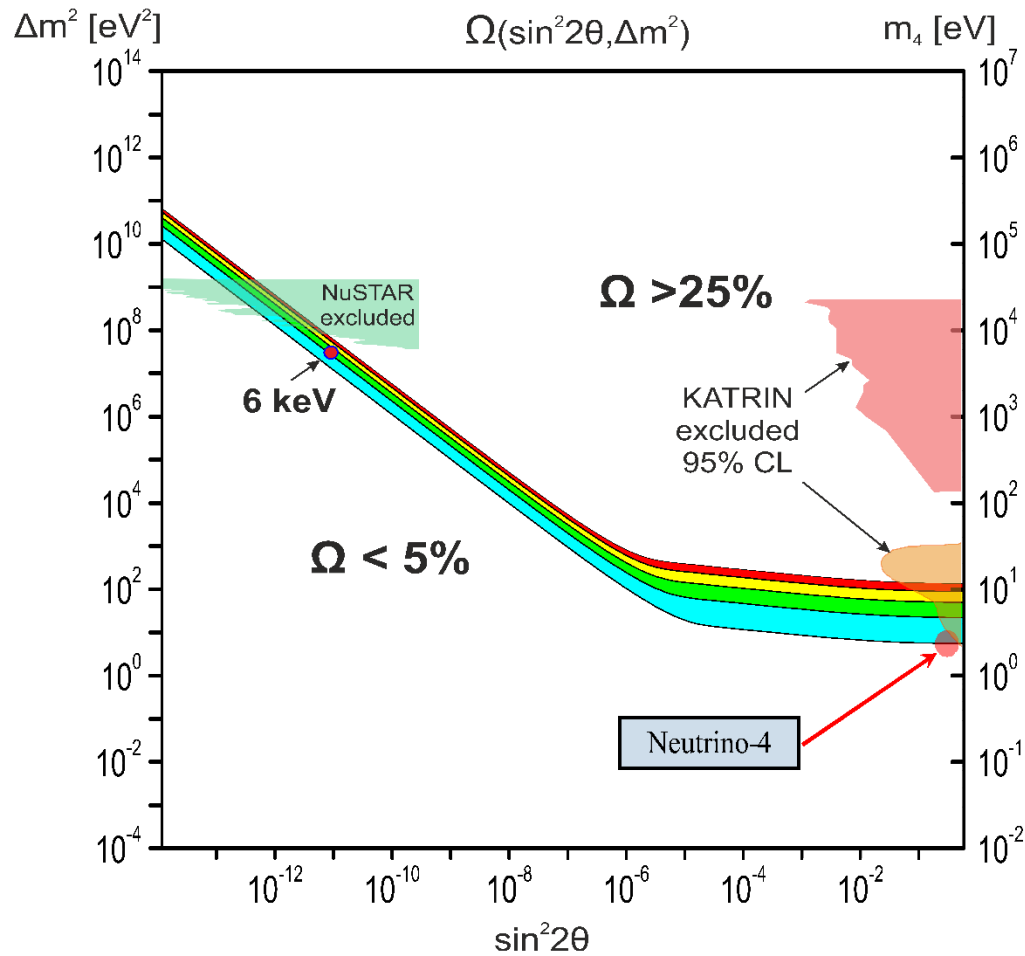
ΛCDM is the standard cosmological model of structure formation, based on weakly Interacting massive particles (WIMPs), a.k.a. Cold dark matter (CDM)



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.



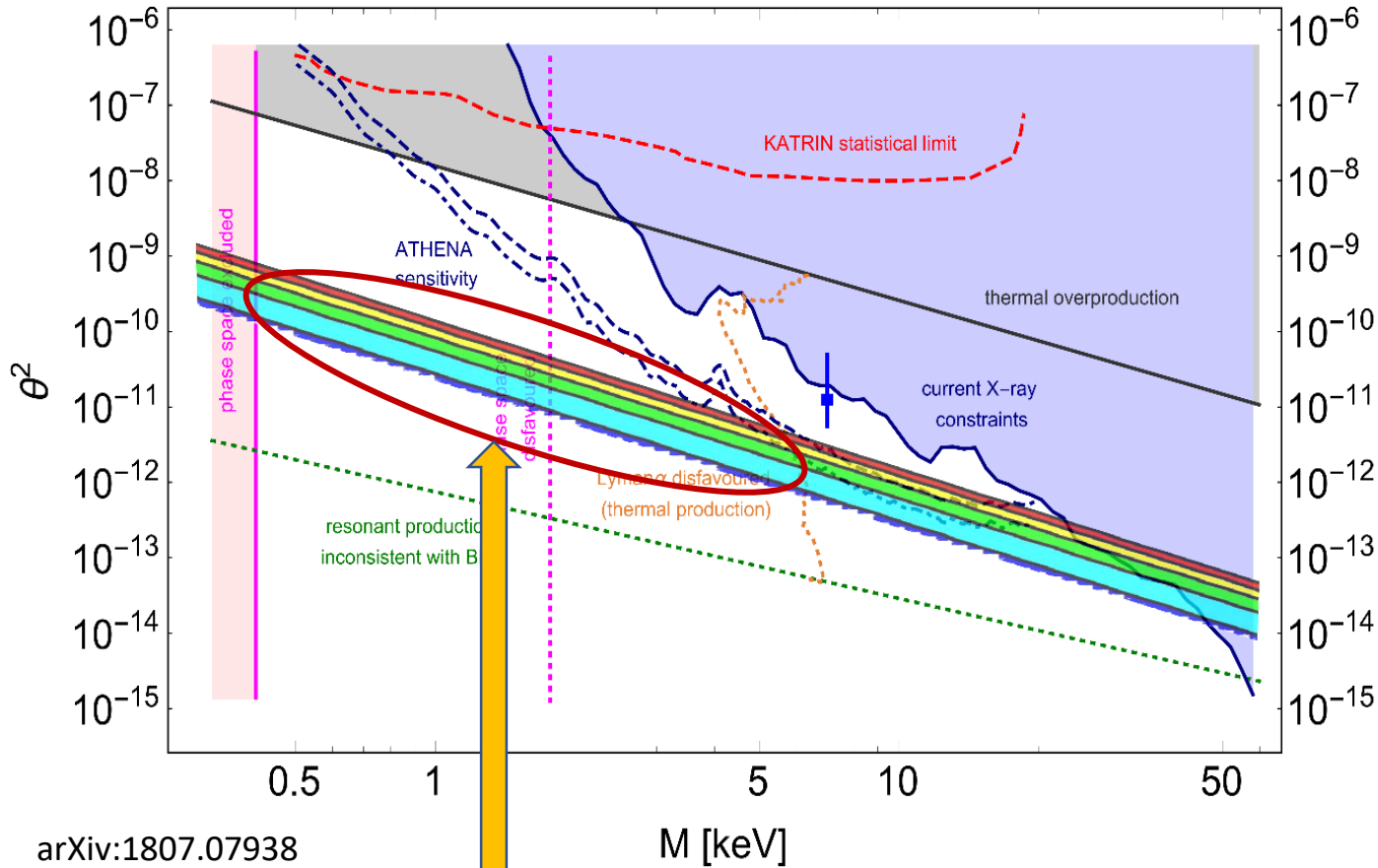
Иерархия масс правых нейтрино?



Лабораторные и астрофизические ограничения на параметры стерильных нейтрино. 1) Красные пятна – результат эксперимента «Нейтрино-4» и возможные массы тяжелых правых нейтрино; 2) Ω_s в пределах 5-25%; 3) ограничения из эксперимента NuSTAR [12]; 4) KATRIN исключил 95% CL – ограничения на стерильные нейтрино в масштабе эВ из эксперимента KATRIN [13]; 5) KATRIN исключил 95% CL – ограничения на стерильные нейтрино в масштабе эВ из эксперимента KATRIN [13]; 6) исключен 95% CL – ограничения из эксперимента по измерению массы нейтрино из [13];

Астрофизические ограничения

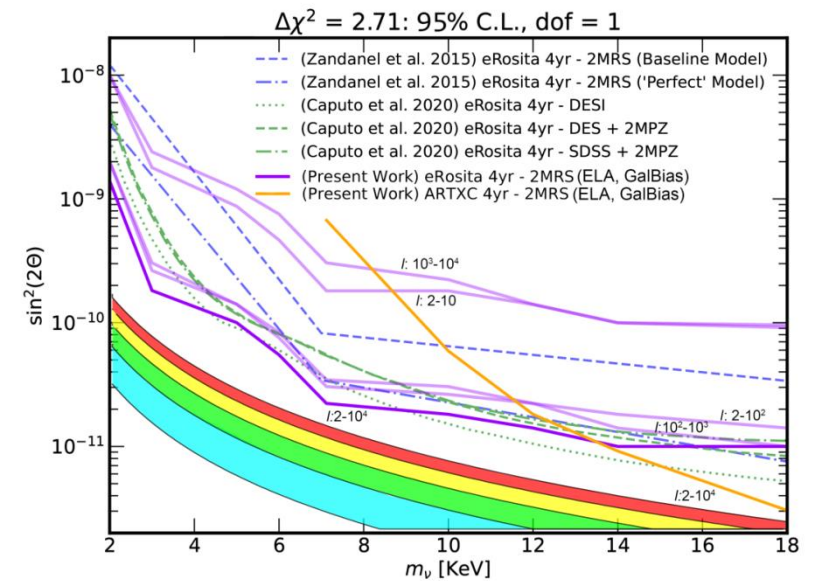
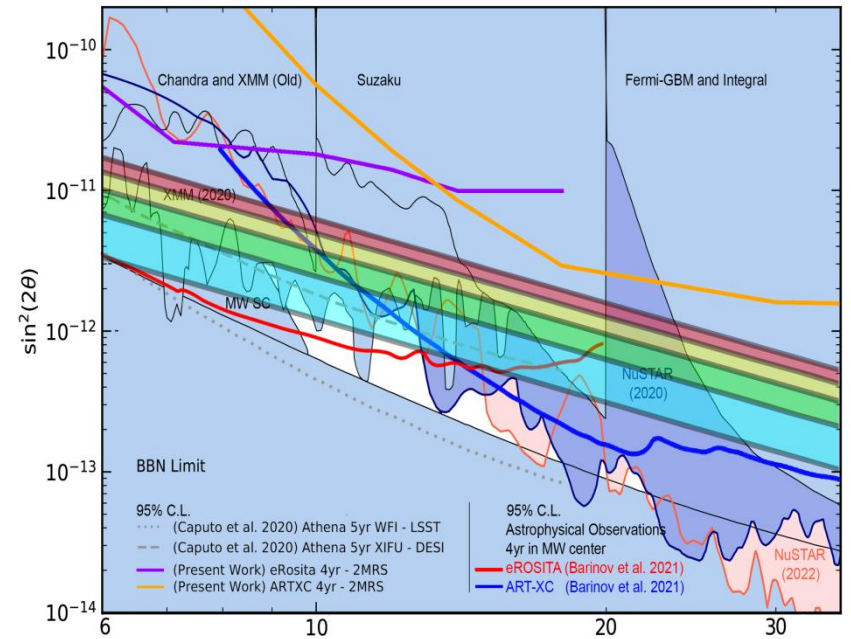
2018



arXiv:1807.07938
PPNP 104, pp. 1-45 (2019)

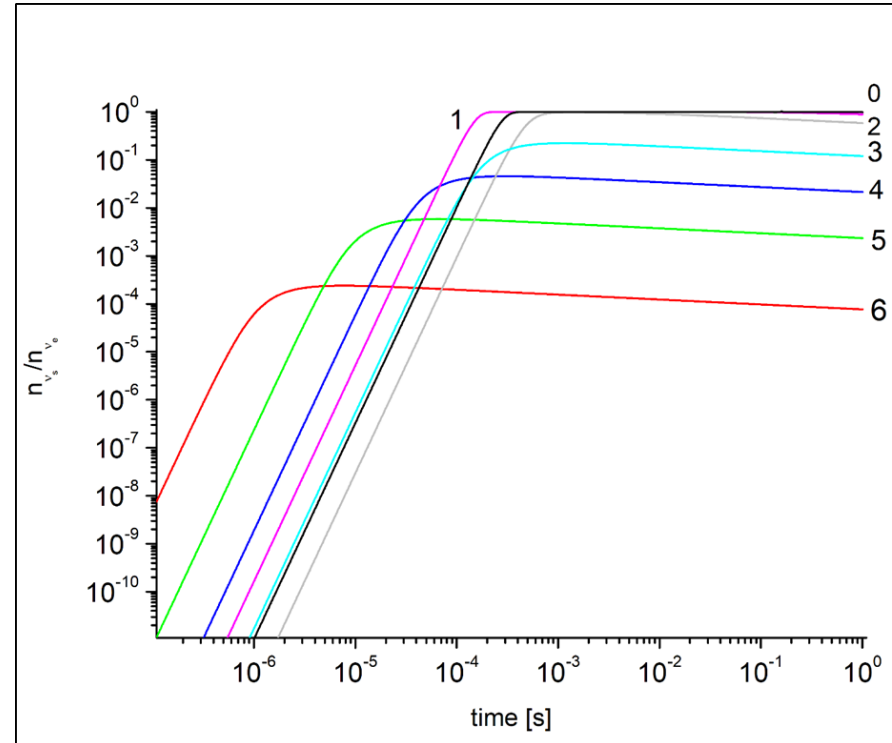
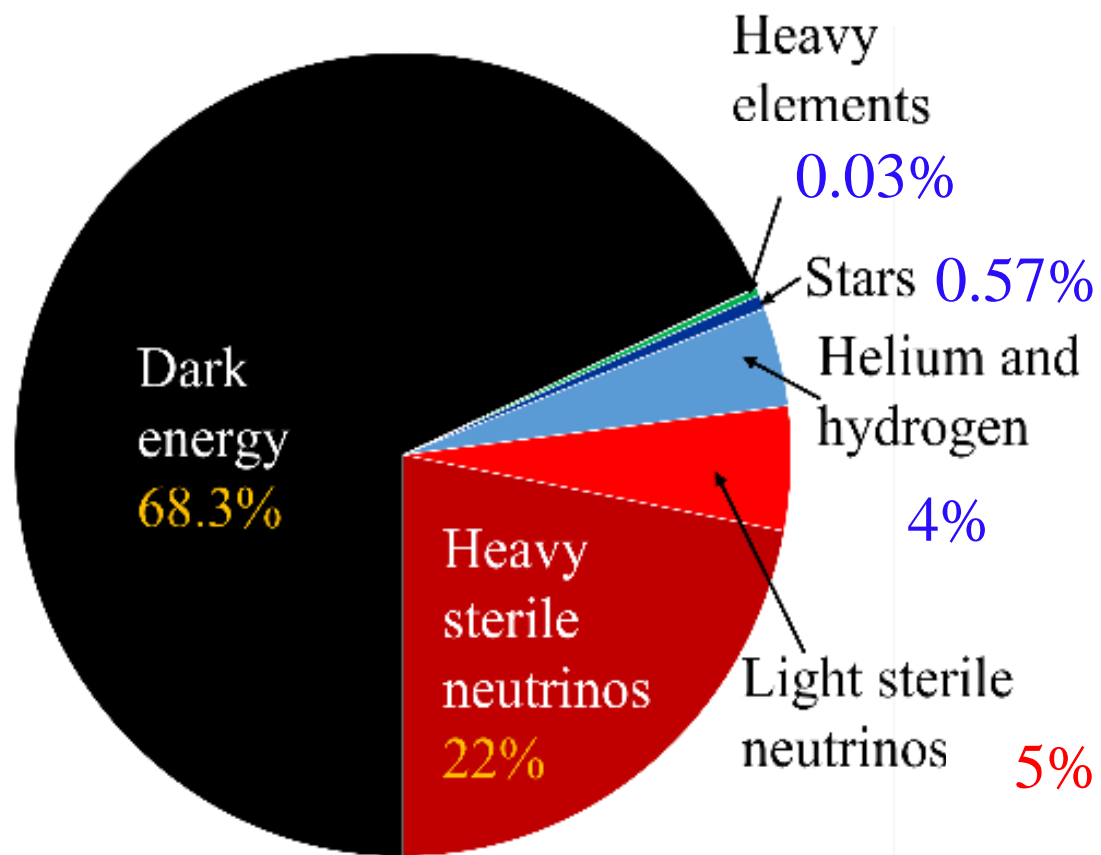
Эта область возможных параметров правых нейтрино пока не закрыта астрофизическими ограничениями

2023



arXiv:2211.05919
JCAP 02 055 (2023)

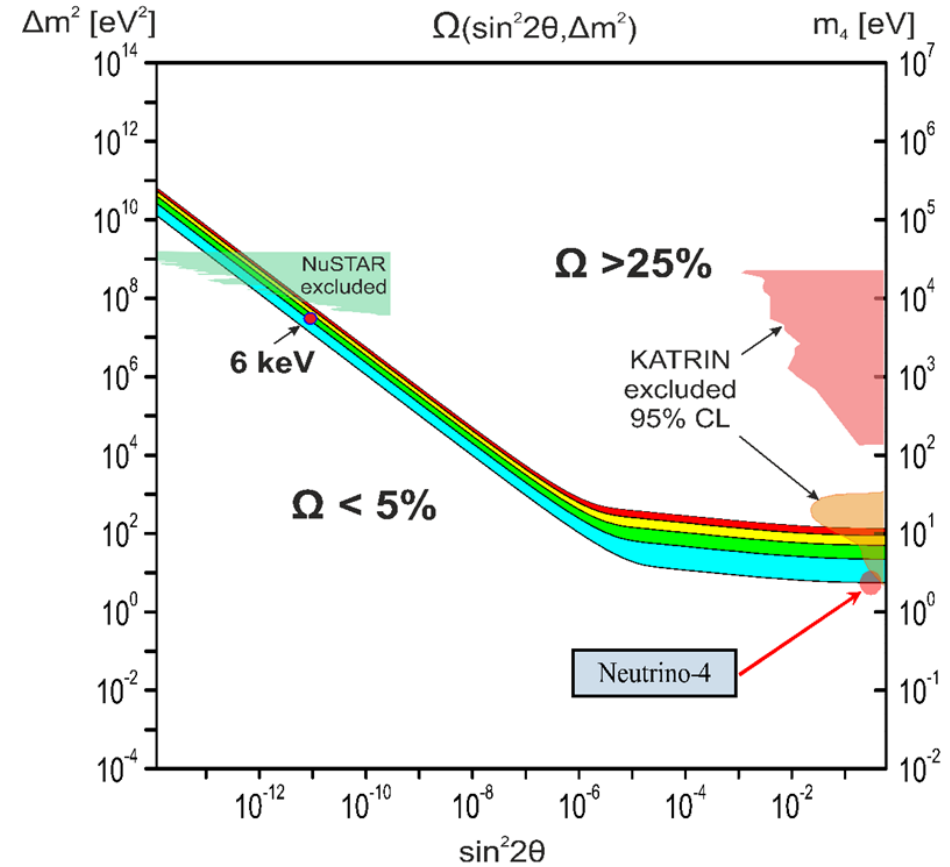
Общая картина состава плотности энергии и массы Вселенной

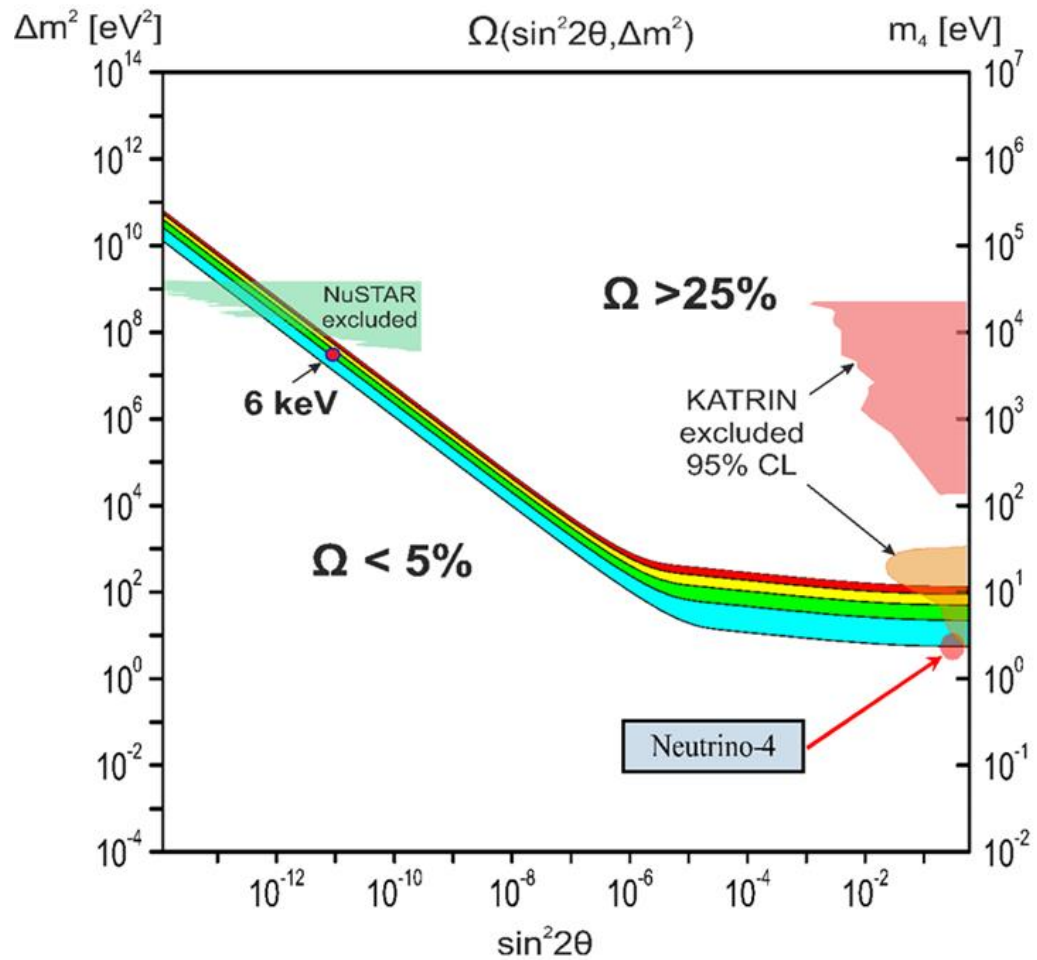


**Динамика генерации темной материи
состояла из трех правых нейтрино и
правых антинейтрино.**

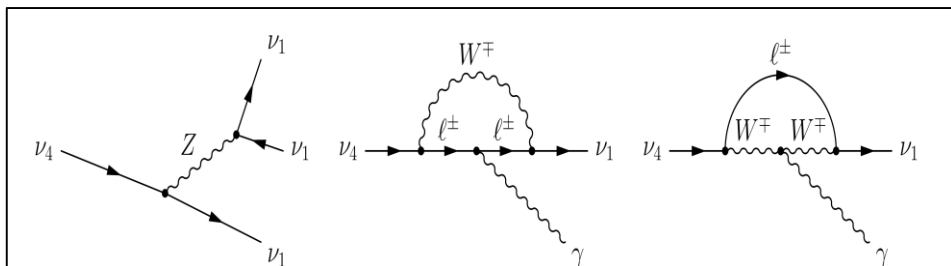
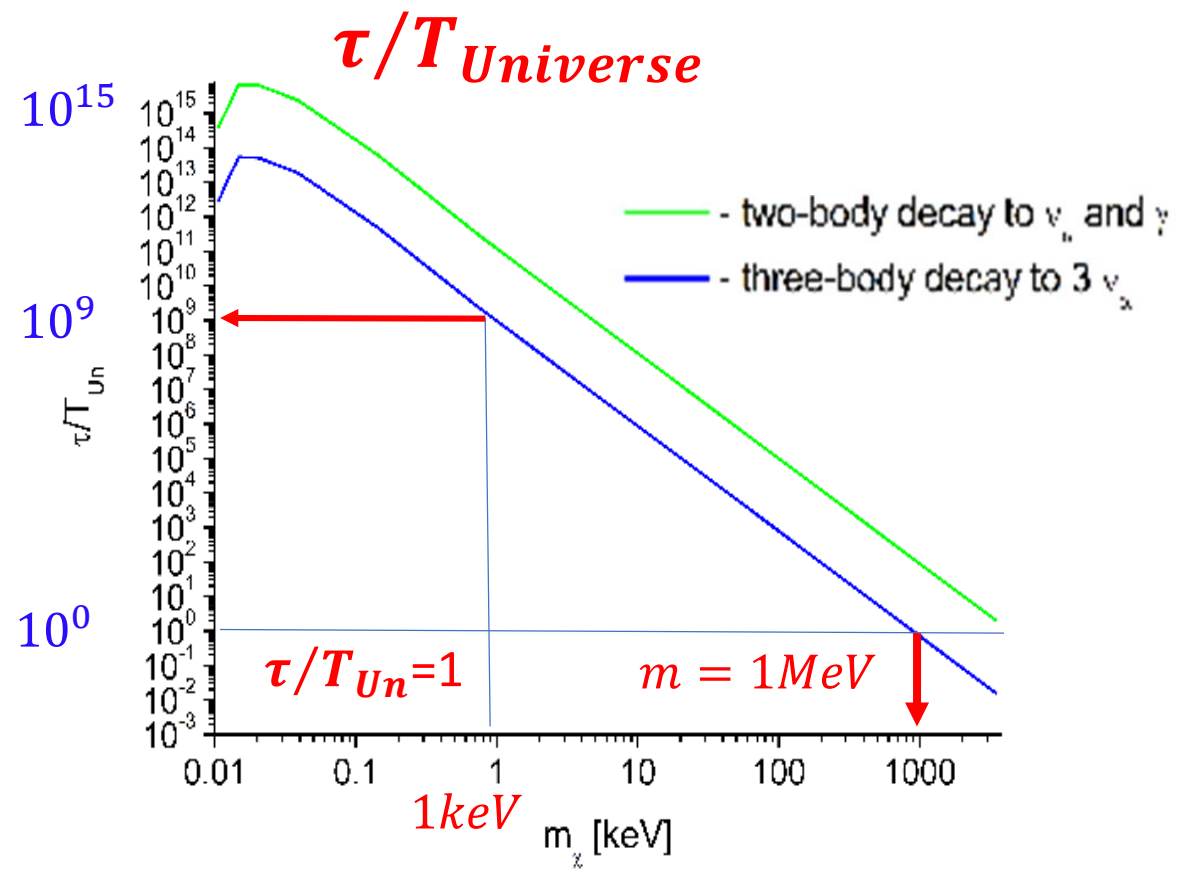
**Тяжелые стерильные (правые) нейтрино с массой
в несколько кэВ могут образовывать структуры за
счет гравитационных сил и сил притяжения
между правыми нейтрино и правыми
антинейтрино.**

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





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](https://arxiv.org/abs/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. Zherebtsov](#)

Таким образом, темная материя с массами правых нейтрино $m_{\nu R} < 6$ кэВ достаточно стабильна, т.к. время распада на 10 порядков величины больше времени существования Вселенной.

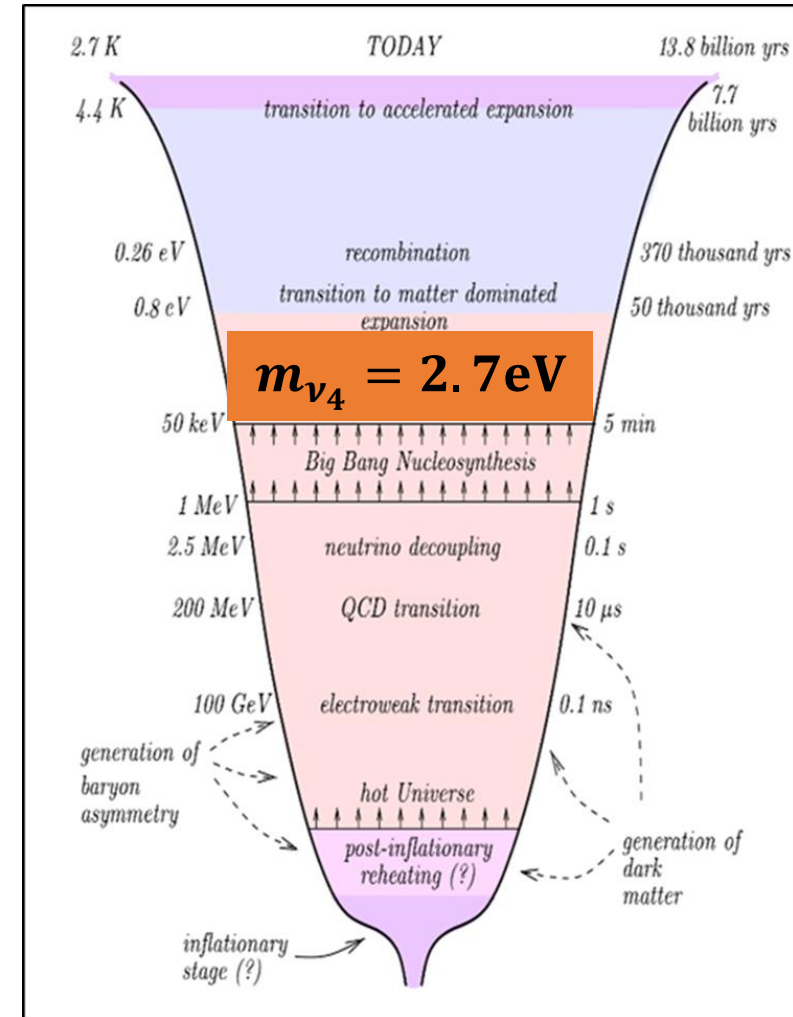
Существует ограничение на сумму масс реликтовых нейтрино 0.12 эВ

1. Однако, правое лёгкое нейтрино является нерелятивистским на пылевой стадии расширения Вселенной (80 тыс. лет) и они захватываются, также как другие нерелятивистские частицы, темной материей, образованной тяжёлыми правыми нейтрино.

2. Поэтому реликтовых нейтрино с массой 2.7 эВ нет.

3. Все левые нейтрино входят в состав реликтового излучения, а все правые нейтрино входят в состав тёмной материи.

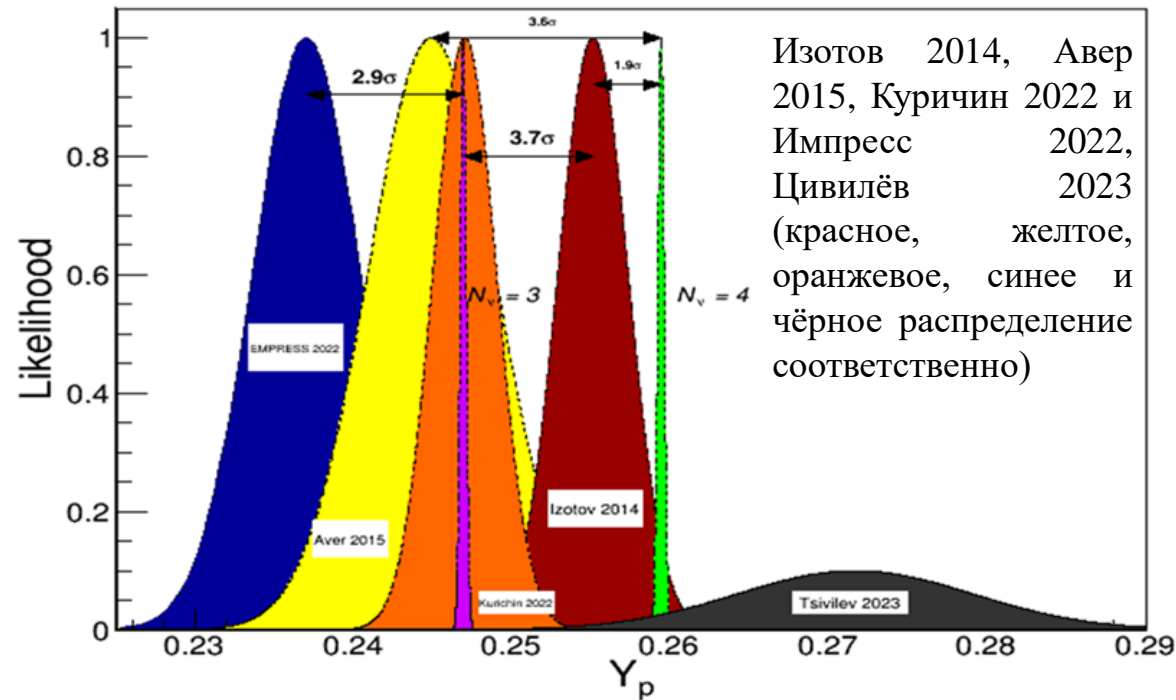
Такая схема логически может рассматриваться, пока не проведены конкретные расчёты для заключений.



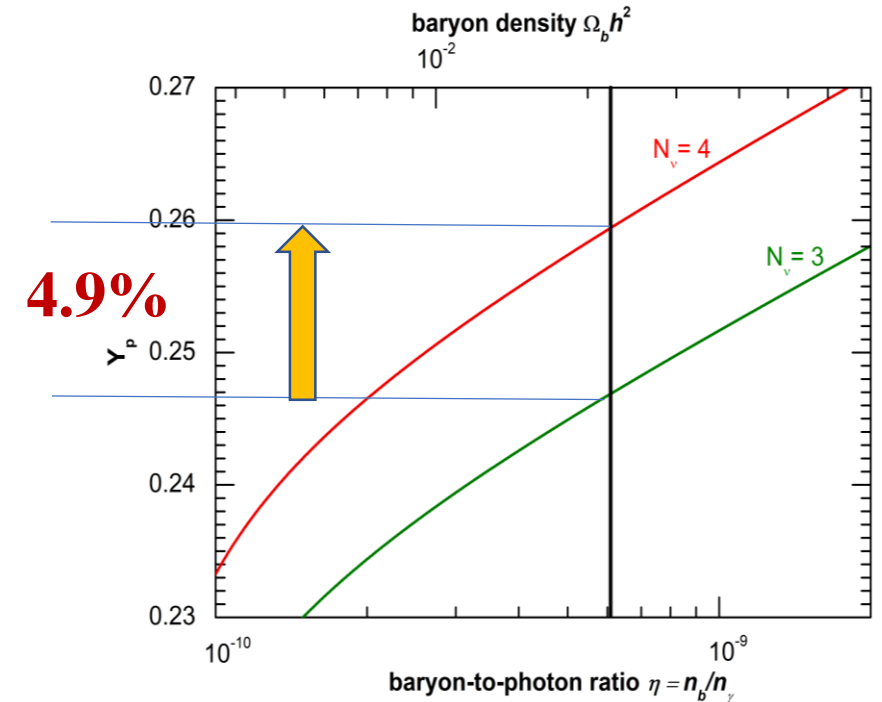
Противоречит ли легкое правое нейтрино ($2.7eV$) астрофизическим данным по измерению массового содержания 4He ?

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

Астрофизические данные по измерению массового содержания ^4He



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



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

А ограничения по ^4He (по BBN) **не строгие.**

Кроме того, есть вопрос о роли **лептонной асимметрии.**

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Результат Нейтрино-4 не закрыт другими экспериментами
2. 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 5.8σ .**
3. Такое стерильное (**правое нейтрино**) термализуется в космической плазме, даёт вклад **в плотность энергии Вселенной 5%** и может объяснить **15-20%** тёмной материи.
Введением ещё двух тяжёлых стерильных (**правых**) нейтрино позволяет довести вклад стерильных нейтрино в **тёмную материю Вселенной до уровня 27%** и объяснить крупномасштабную структуру Вселенной.

4.

Возможные следствия

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!

Возможно расширение Стандартной Модели правыми нейтрино

Темная материя обеспечивается массами правых
нейтрино $m_{\nu_R} < 6$ кэВ.

Что будет дальше, покажут дальнейшие эксперименты.

*Спасибо за Ваше
внимание*

Выше были представлены только действительные части потенциалов.

Мнимая часть потенциала может быть написана на основе оптической теоремы:

$$\sigma_{tot} = 4\pi/k \cdot \text{Im}b(0)$$

Мнимая часть амплитуды рассеяния включает в себя поглощение и рассеяние с изменением энергии.

Но любое рассеяние нейтрино на нейтрино приводит к изменению энергии.

Связь потенциала и амплитуды рассеяния даётся следующими выражениями

$$V = \frac{hc}{k} Nb \quad \text{соответственно} \quad b = \frac{k}{hcN} V$$

$$\sigma_{tot} = 4\pi/hc \frac{V}{N} \quad \text{Или в естественных единицах} \quad \sigma_{tot} = 2 \frac{V}{N}$$

В общем случае при наличии асимметрии ξ_{ν_e}

$$b_{coh}^{\pm} = \frac{k}{N} [-0.61\alpha^{-1}G_F^2T^4E_{\nu} \pm 0.95 \cdot 3/4 \xi_{\nu_e} G_F T^3]$$

Первый член амплитуды рассеяния определяет процесс рассеяния в среде. Второй член амплитуды рассеяния определяет потенциал среды и преломление при переходе из вакуума в среду или наоборот. Если рассматриваются процессы взаимодействия с точки зрения наблюдателя внутри среды, то второй член не играет роли и его можно не учитывать.

$$b^{\nu_e} = -\frac{k}{N} 0.61\alpha^{-1}G_F^2T^4E_{\nu_e}$$

Оценим сечение некогерентного рассеяния и дополнительную частоту соударений

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

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