

СТЕРИЛЬНЫЕ НЕЙТРИНО И ТЕМНАЯ МАТЕРИЯ



Д. Калашников, Д. Горубнов, Г. Круган
ИЯИ РАН, МФТИ

СТЕРИЛЬНЫЕ НЕЙТРИНО И ТЕМНАЯ МАТЕРИЯ

Осцилляции

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2} \overline{N_1} i \hat{\partial} N_1 - \frac{1}{2} m \overline{N_1^c} N_1 - h_{\alpha 1} \overline{L_\alpha} \tilde{\varphi} a_R N_1 - h_{\alpha 1}^* \overline{N_1} \tilde{\varphi}^\dagger a_L L_\alpha + \mathcal{L}_{SM}$$



$$m_{D \alpha 1} = \frac{v h_{\alpha 1}}{\sqrt{2}} \quad \theta_{\alpha 1} = \frac{m_{D \alpha 1}^2}{m^2}$$

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_s) = f(\theta_{\alpha 1}, m)$$

СТЕРИЛЬНЫЕ НЕЙТРИНО И ТЕМНАЯ МАТЕРИЯ

Осцилляции в плазме

$$m_{D\alpha 1} = \frac{\nu h_{\alpha 1}}{\sqrt{2}}$$

$$\theta_{\alpha 1} = \frac{m_{D\alpha 1}^2}{m^2}$$

$$P(\nu_{\alpha} \rightarrow \nu_s)$$

Плазма с T



$$P(\nu_{\alpha} \rightarrow \nu_s) \Rightarrow f(\theta_{\alpha 1}, m, T, G_F)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_{\nu_s}}{\partial t} - H p \frac{\partial f_{\nu_s}}{\partial p} &= \\ &= \frac{\Gamma_{\nu_{\alpha}}}{2} \langle P(\nu_{\alpha} \rightarrow \nu_s) \rangle f_{\nu_s} \end{aligned}$$

$$\Gamma_{\nu_{\alpha}} \propto G_F^2 T^5$$

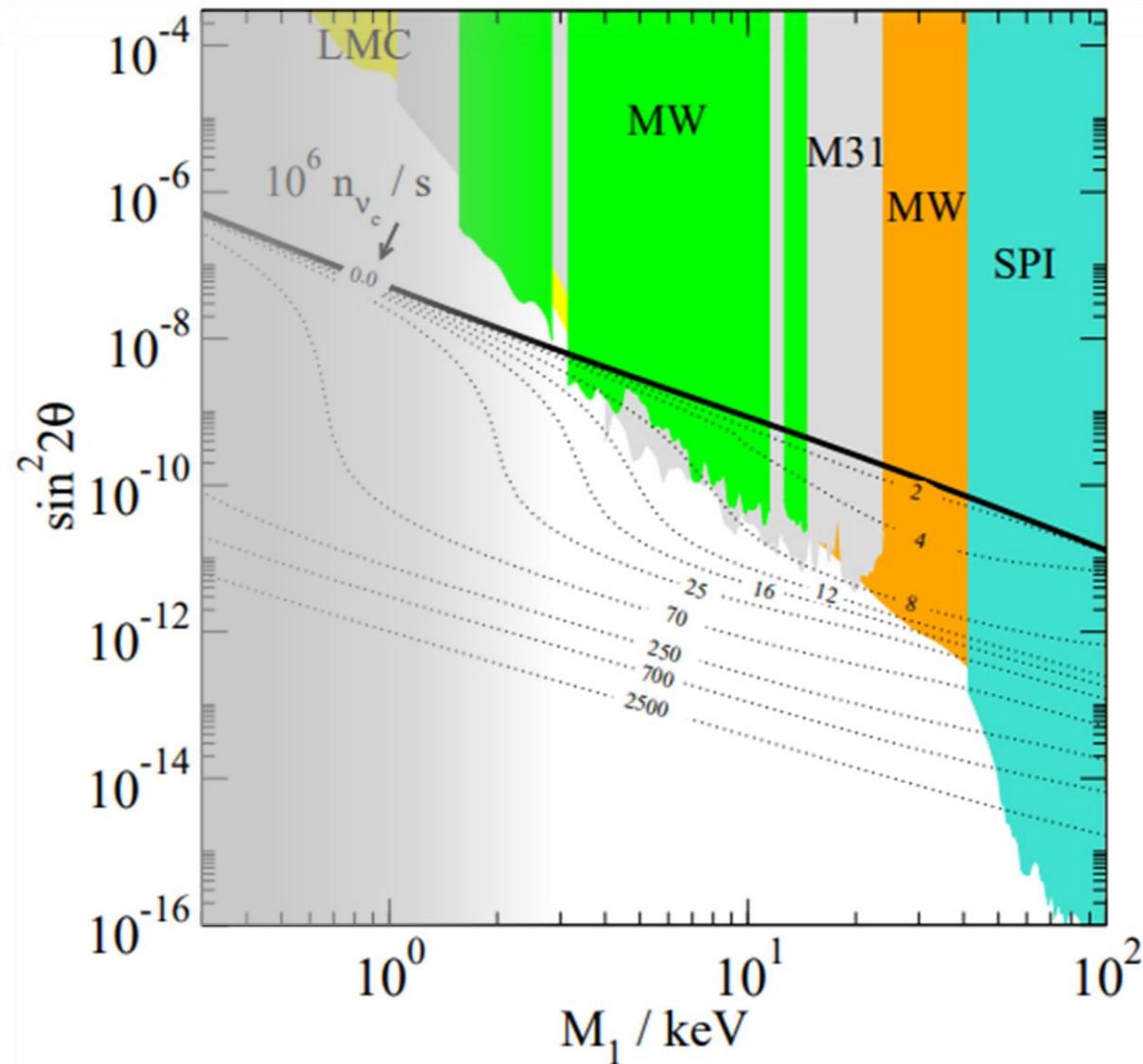
СТЕРИЛЬНЫЕ НЕЙТРИНО И ТЕМНАЯ МАТЕРИЯ Осцилляции в плазме

$$\frac{\partial f_{\nu_s}}{\partial t} - Hp \frac{\partial f_{\nu_s}}{\partial p} = \frac{\Gamma_{\nu_\alpha}}{2} \langle P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_s) \rangle f_{\nu_s}$$

$$\langle P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_s) \rangle \propto \left(\frac{m^4}{4p^2} \sin^2 2\theta + \frac{\Gamma_{\nu_\alpha}}{2} + \left(\frac{m^2}{2p} \cos 2\theta + V_\alpha^T \right)^2 \right)^{-1}$$

$$V_\alpha^T \propto G_F^2 T^4 p$$

СТЕРИЛЬНЫЕ НЕЙТРИНО И ТЕМНАЯ МАТЕРИЯ



СТЕРИЛЬНЫЕ НЕЙТРИНО И ТЕМНАЯ МАТЕРИЯ Лептонная асимметрия

$$\langle P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_s) \rangle \propto \left(\frac{m^4}{4p^2} \sin^2 2\theta + \frac{\Gamma_{\nu_\alpha}}{2} + \left(\frac{m^2}{2p} \cos 2\theta + V_\alpha^T - V_\alpha^L \right)^2 \right)^{-1}$$

$$V_\alpha^L \propto G_F T^3 L_\alpha \quad L_\alpha = \frac{f(\Delta n_\alpha, \Delta n_{\nu_\alpha})}{s}$$

$$\left(\frac{m^2}{2p} \cos 2\theta + V_\alpha^T - V_\alpha^L \right) \rightarrow 0 \Rightarrow \langle P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_s) \rangle \rightarrow \text{resonance}$$

СТЕРИЛЬНЫЕ НЕЙТРИНО И ТЕМНАЯ МАТЕРИЯ Резонансное рождение

$$\left(\frac{m^2}{2p} \cos 2\theta + V_\alpha^T - V_\alpha^L \right) \rightarrow 0 \Rightarrow \langle P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_s) \rangle \rightarrow \textit{resonance}$$

$$V_\alpha^L \propto G_F T^3 L_\alpha$$

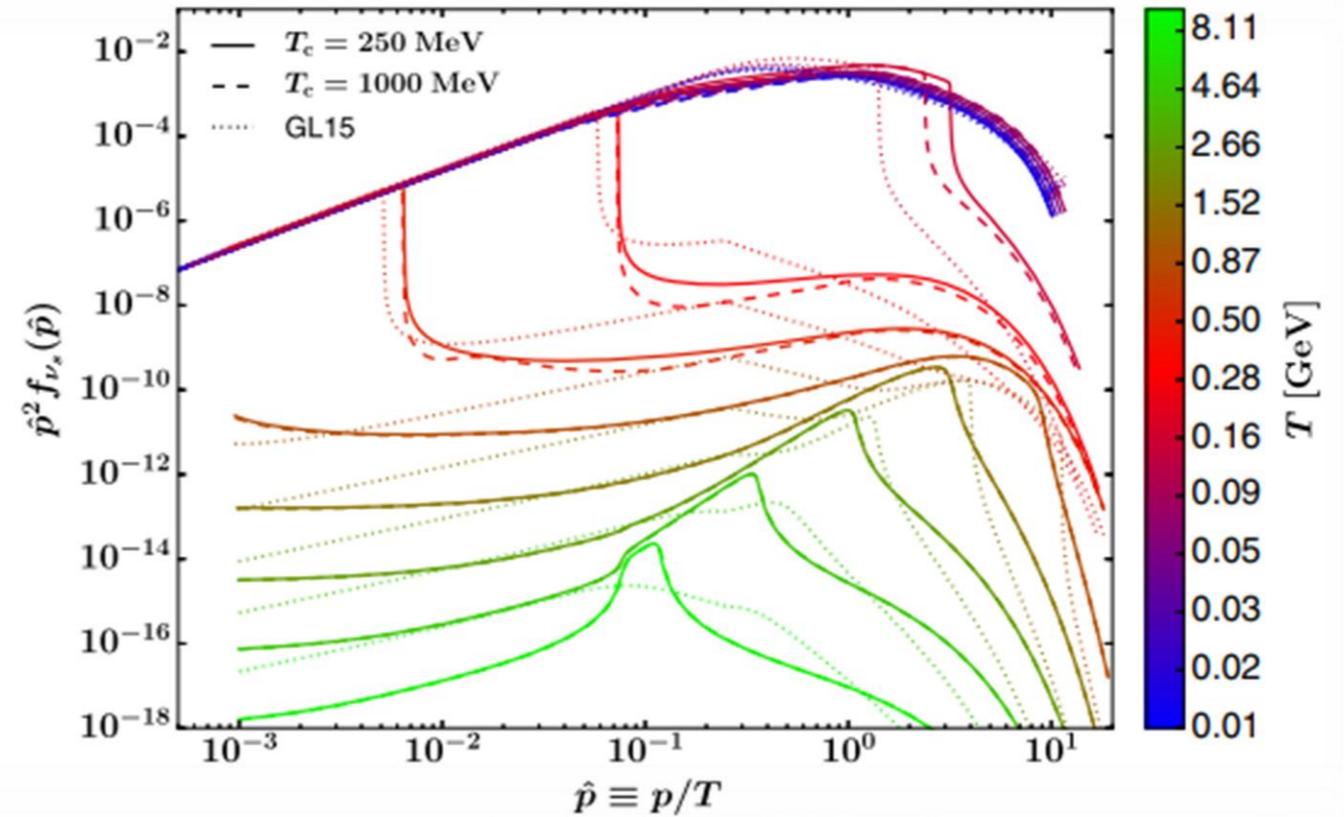
$$V_\alpha^T \propto G_F^2 T^4 p$$



p_+, p_-

СТЕРИЛЬНЫЕ НЕЙТРИНО И ТЕМНАЯ МАТЕРИЯ Резонансное рождение

$$m = 7.1 \text{ keV}$$
$$\sin^2 2\theta = 4 \times 10^{-11}$$
$$L_\mu = 60 \times 10^{-6}$$



[1507.06655]

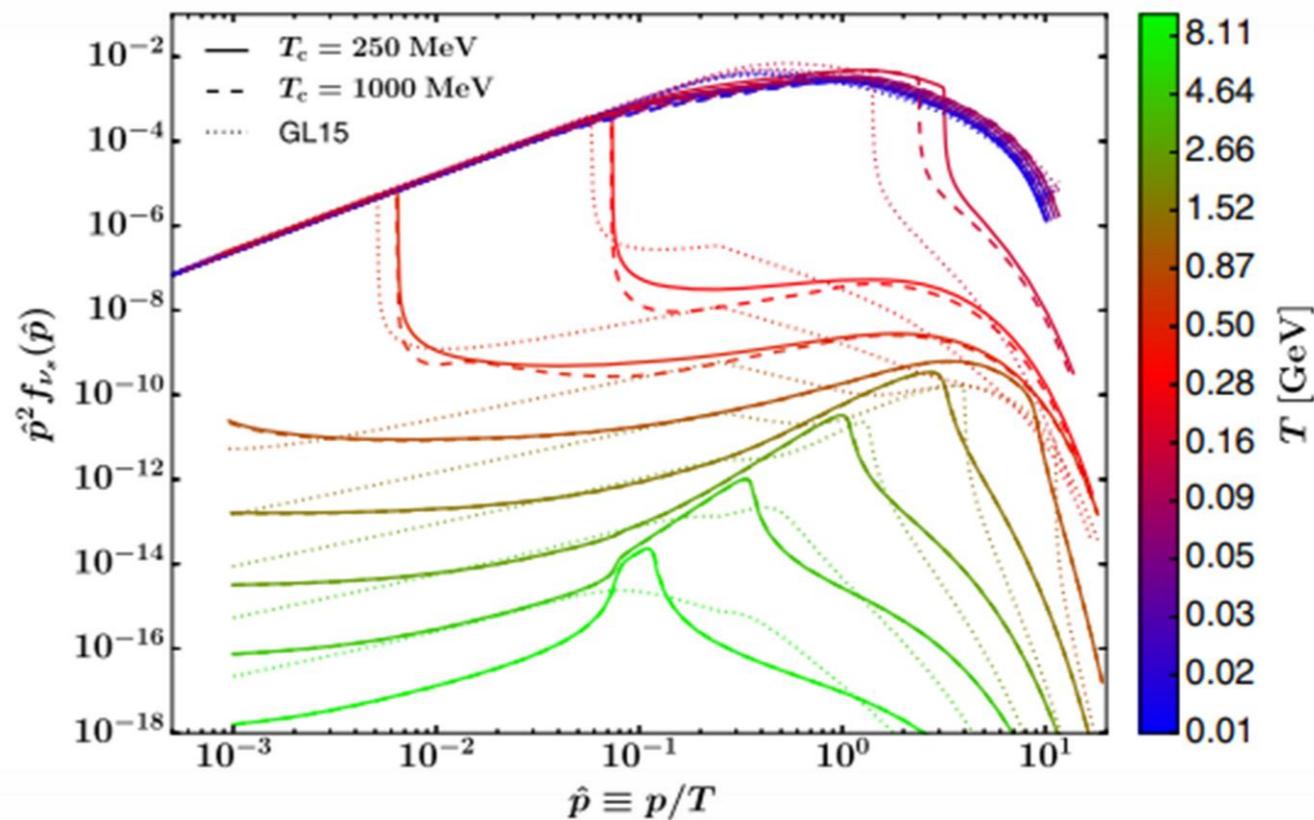
СТЕРИЛЬНЫЕ НЕЙТРИНО И ТЕМНАЯ МАТЕРИЯ Резонансное рождение

$$\frac{m^2}{2p} \cos 2\theta + V_\alpha^T - V_\alpha^L \rightarrow 0$$

$$V_\alpha^L \propto G_F T^3 L_\alpha \quad V_\alpha^T \propto G_F^2 T^4 p$$

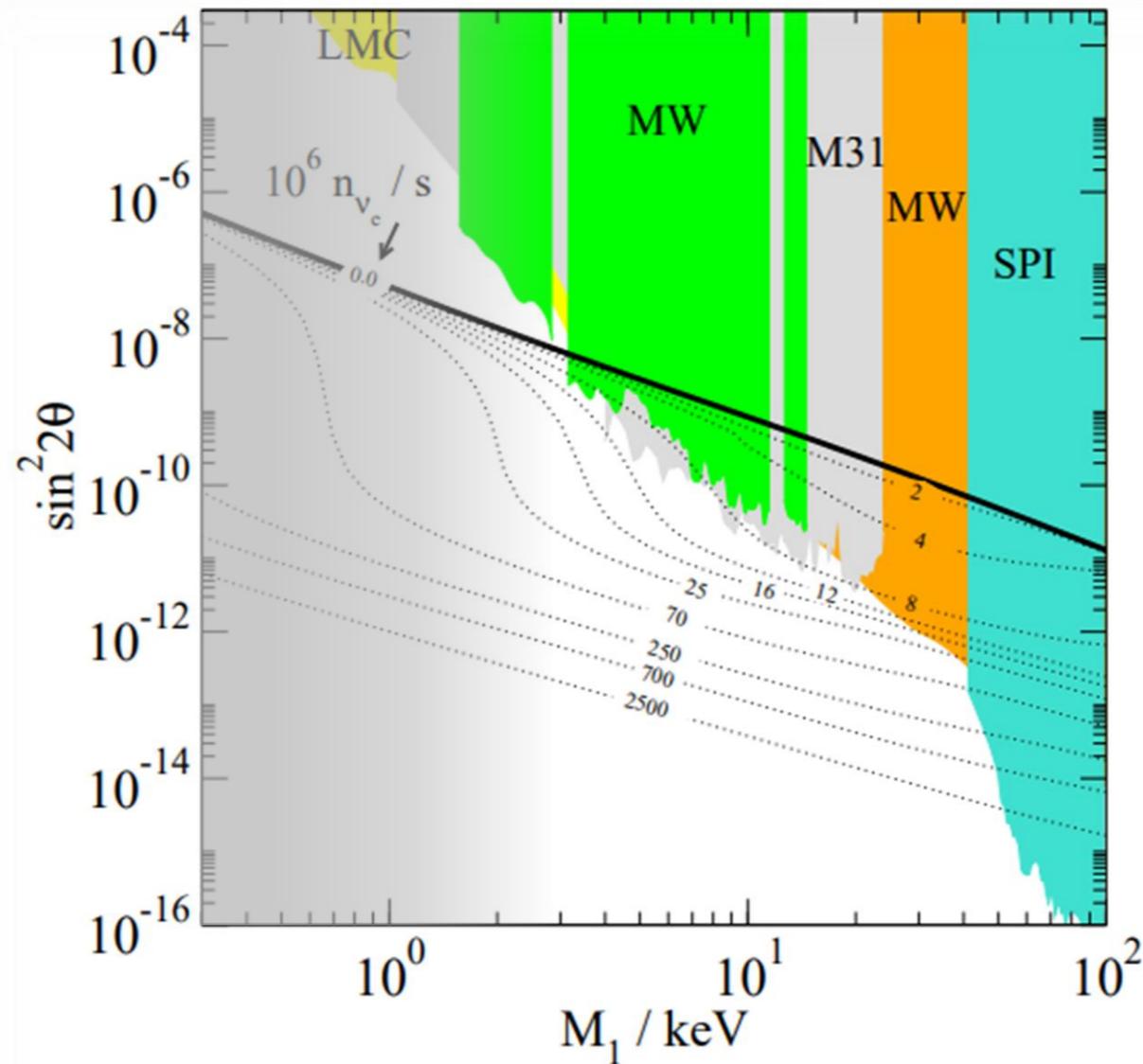
$$\frac{A}{p} - B L_\alpha T^4 + C T^6 p \rightarrow 0$$

$$p_- \propto \frac{1}{L_\alpha} \frac{1}{T^4} \frac{A}{B} \quad p_+ \propto L_\alpha \frac{1}{T^2} \frac{B}{C}$$



[1507.06655]

СТЕРИЛЬНЫЕ НЕЙТРИНО И ТЕМНАЯ МАТЕРИЯ



СТЕРИЛЬНЫЕ НЕЙТРИНО И ТЕМНАЯ МАТЕРИЯ

Ограничения

Нуклеосинтез

$$\varepsilon = \frac{\mu}{T} < 0.01$$

$$\Delta n_{\nu_\alpha} \approx \frac{\mu T^2}{6} = \frac{T^3}{6} \varepsilon$$

$$L_\alpha = \frac{f(\Delta n_\alpha, \Delta n_{\nu_\alpha})}{s(T^3)} \approx \frac{\Delta n_{\nu_\alpha}}{s(T^3)} \propto \varepsilon$$

$$L_{\nu_\alpha}^i < 350 \times 10^{-6}$$

Спектры

Принцип Паули

Наблюдение F_{coarse}

$$F_{coarse} \propto \frac{\rho}{\sigma^3}$$

$$F_{coarse} < m^4 f(p)$$

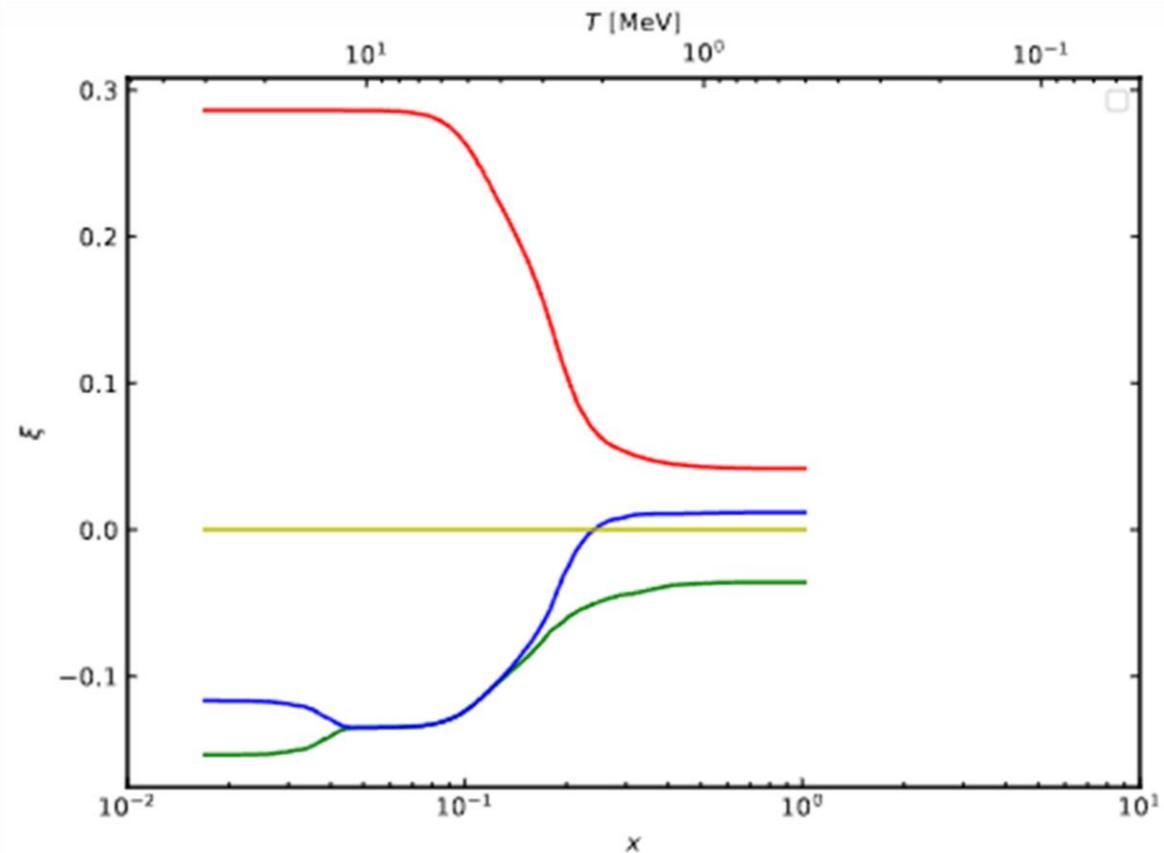
СТЕРИЛЬНЫЕ НЕЙТРИНО И ТЕМНАЯ МАТЕРИЯ

Осцилляции активных нейтрино

$$L_{\nu_e}^i = 3000 \times 10^{-6}$$
$$\varepsilon \approx 0.3 \rightarrow 0.03$$

$$\varepsilon < 0.01 \rightarrow \varepsilon < 0.1$$

$$L_{\nu_e}^i < 1000 \times 10^{-6}$$



G.Krugan [1905.11290, 1206.1046, 2409.08280]

СТЕРИЛЬНЫЕ НЕЙТРИНО И ТЕМНАЯ МАТЕРИЯ

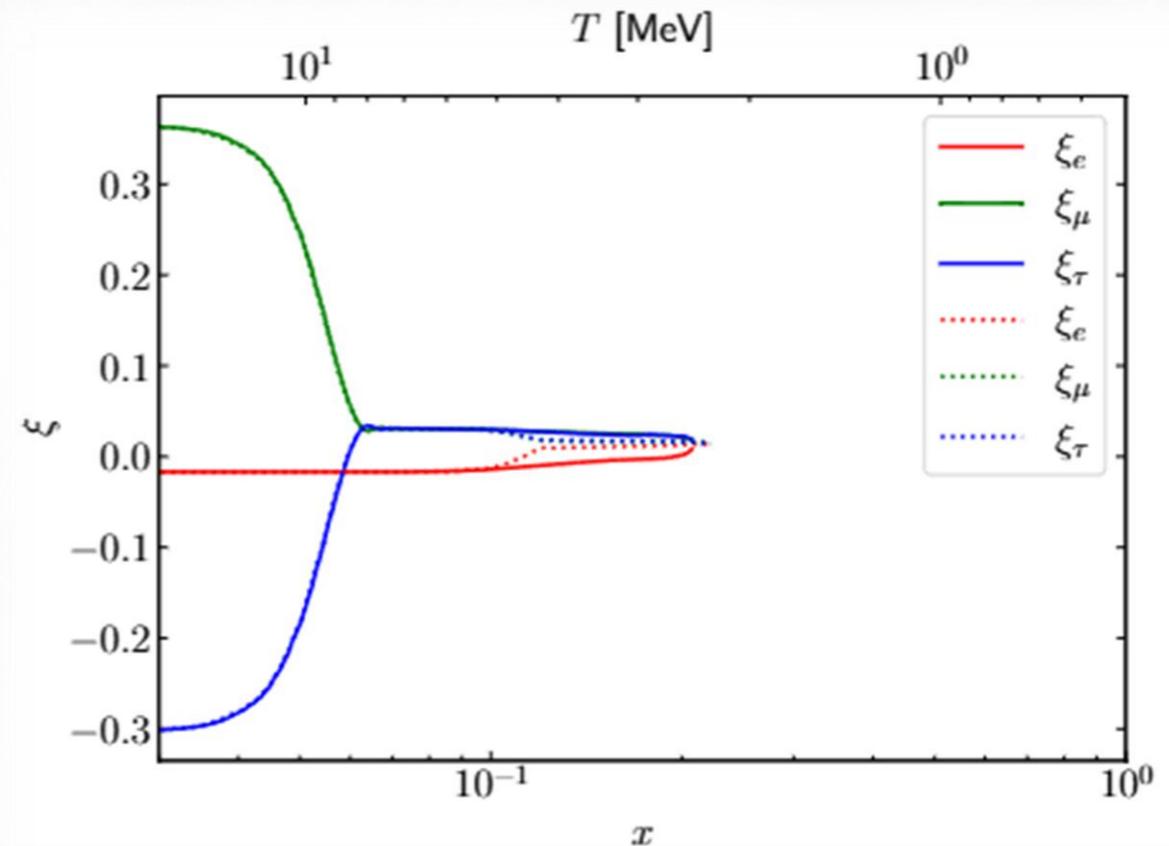
Осцилляции активных нейтрино

$$L_{\nu_e}^i \approx 0, L_{\nu_\alpha}^i \approx \pm 4500 \times 10^{-6}$$

$$\nu_\mu \rightarrow \nu_s$$

$$\varepsilon_e \approx 0.01$$

$$L_{\nu_\alpha}^i < 4500 \times 10^{-6}$$



G.Krugan [1905.11290, 1206.1046, 2409.08280]

СТЕРИЛЬНЫЕ НЕЙТРИНО И ТЕМНАЯ МАТЕРИЯ

