

Нейтринные осцилляции в плазме

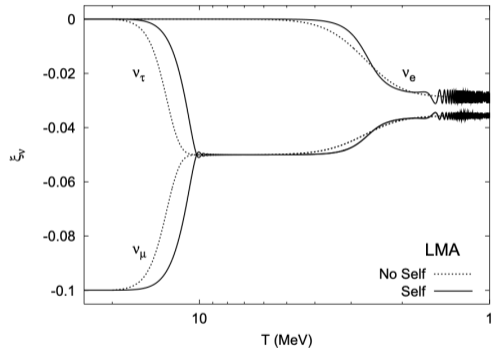
по материалам [Gorbunov et al., 2025]

Дмитрий Горбунов, Дмитрий Калашников, **Георгий Круган**

ИЯИ РАН,
МФТИ

9 марта 2026 г.

1. CP-фаза
2. Иерархия масс нейтрино
3. Начальные значения химических потенциалов нейтрино



[A. D. Dolgov and Semikoz, 2002]

Квантовые кинетические уравнения

$$(\partial_t - H p \partial_p) \rho(p, t) = -i \left[\frac{1}{2p} M_F - \frac{8\sqrt{2} G_F p}{3} \left(\frac{E_l}{m_W^2} + \frac{E_\nu}{m_Z^2} \right) + \sqrt{2} G_F N_\nu, \rho \right] + I[\rho, \bar{\rho}]$$

$$(\partial_t - H p \partial_p) \bar{\rho}(p, t) = +i \left[\frac{1}{2p} M_F - \frac{8\sqrt{2} G_F p}{3} \left(\frac{E_l}{m_W^2} + \frac{E_\nu}{m_Z^2} \right) - \sqrt{2} G_F N_\nu, \bar{\rho} \right] + I[\bar{\rho}, \rho]$$

$$\frac{d\rho}{dt} = -3H(\rho + p)$$

$E_l = \text{diag}(\rho_e \ 0 \ 0)$ – плотность энергии заряженных лептонов.

$E_\nu = S \frac{1}{2\pi^2} \int dy y^3 (\rho + \bar{\rho}) S$ плотность энергии нейтрино и $S = \text{diag}(1 \ 1 \ 1)$.

$N_\nu = S \frac{1}{2\pi^2} \int dy y^2 (\rho - \bar{\rho}) S$ – матрица асимметрий нейтрино

Вычисления выполнены с помощью программного кода FortEPiaNO [Gariazzo et al., 2019].

Сопутствующие переменные

$$x = m_e \cdot a, y = \rho \cdot a, z = T_\gamma \cdot a, \xi = \mu \cdot a.$$

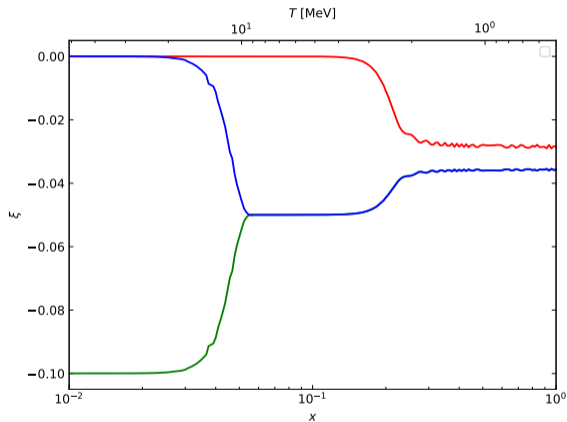
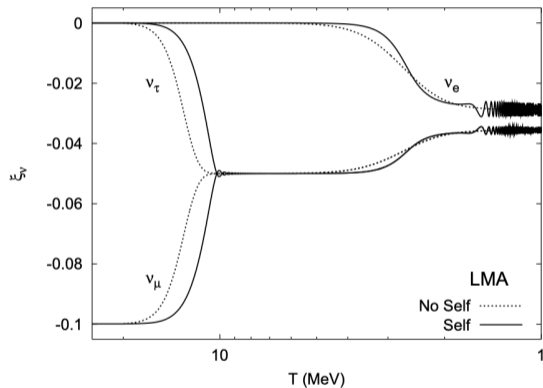
$$\frac{d\rho(y, x)}{dx} = \sqrt{\frac{3m_{Pl}^2}{8\pi\varepsilon}} \left\{ -i \frac{x^2}{m_e^3} [H, \rho] + \frac{m_e^3}{x^4} I[\rho, \bar{\rho}] \right\}$$

$$H = \frac{1}{2y} M_F - \frac{8\sqrt{2}G_F y m_e^6}{3x^6} \left(\frac{E_l}{m_W^2} + \frac{E_\nu}{m_Z^2} \right) + \frac{\sqrt{2}G_F m_e^4}{x^4} N_\nu$$

$$\frac{d\bar{\rho}(y, x)}{dx} = \sqrt{\frac{3m_{Pl}^2}{8\pi\varepsilon}} \left\{ +i \frac{x^2}{m_e^3} [\bar{H}, \bar{\rho}] + \frac{m_e^3}{x^4} I[\bar{\rho}, \rho] \right\}$$

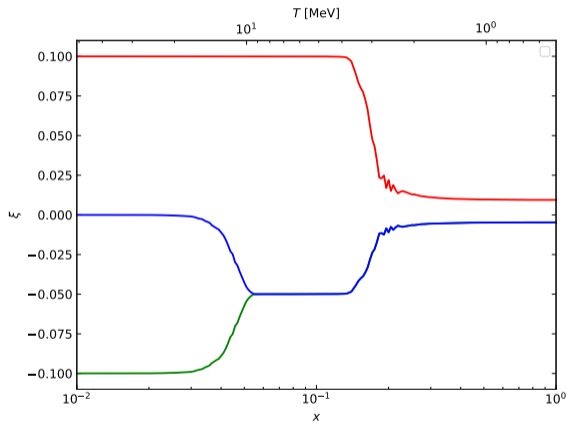
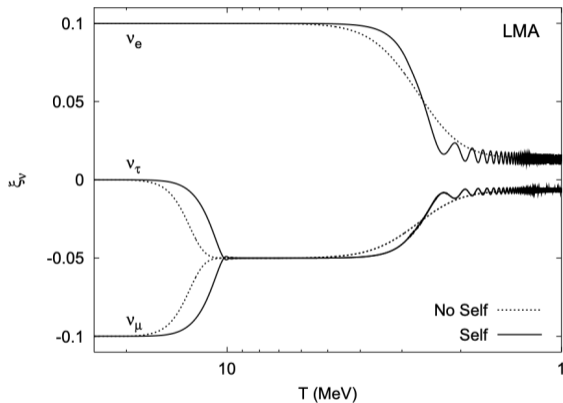
$$\bar{H} = \frac{1}{2y} M_F - \frac{8\sqrt{2}G_F y m_e^6}{3x^6} \left(\frac{E_l}{m_W^2} + \frac{E_\nu}{m_Z^2} \right) - \frac{\sqrt{2}G_F m_e^4}{x^4} N_\nu$$

Сравнение эволюции ξ из [A. D. Dolgov and Semikoz, 2002]



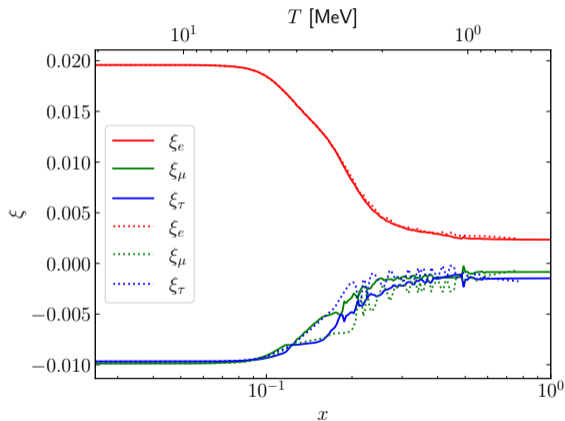
$$x = m_e \cdot a$$

Сравнение эволюции ξ из [A. D. Dolgov and Semikoz, 2002]



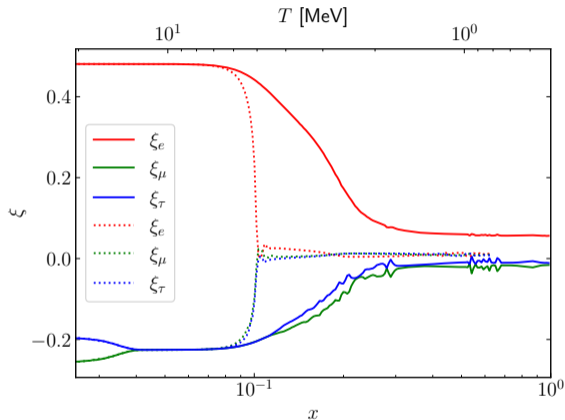
$$x = m_e \cdot a$$

Влияние CP-фазы [Gava and Volpe, 2010] [Domcke et al., 2025]



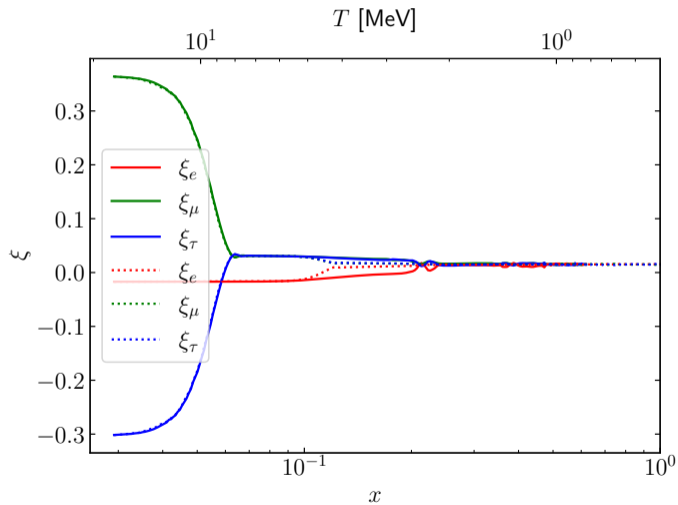
Эволюция асимметрий нейтрино при нулевой CP-фазе (сплошная линия) и CP-фазе (точечная линия), взятой из PDG [Navas et al., 2024].

Влияние смены иерархии масс нейтрино









Эволюция асимметрий нейтрино при прямой (сплошная линия) и обратной (точечная линия) иерархии масс нейтрино.

Эволюция химических потенциалов нейтрино



References

-  A. D. Dolgov, S. H. Hansen, S. P. S. T. P. G. G. R. and Semikoz, D. V. (2002).
Cosmological bounds on neutrino degeneracy improved by flavor oscillations.
Nucl. Phys.
-  Domcke, V., Escudero, M., Navarro, M. F., and Sandner, S. (2025).
Lepton flavor asymmetries: from the early universe to bbn.
Journal of High Energy Physics, 2025(6).
-  Gariazzo, S., de Salas, P. F., and Pastor, S. (2019).
Thermalisation of sterile neutrinos in the early Universe in the 3+1 scheme with full mixing matrix.
JCAP, 07(07):014.
-  Gava, J. and Volpe, C. (2010).
Cp violation effects on the neutrino degeneracy parameters in the early universe.
Nuclear Physics B, 837(1–2):50–60.
-  Gorbunov, D., Kalashnikov, D., and Krugan, G. (2025).
Playing with lepton asymmetry at the resonant production of sterile neutrino dark matter.
-  Navas, S. et al. (2024).
Review of particle physics