



Физический факультет
Московского
государственного университета
имени М.В.Ломоносова

Стерильные нейтрино в ранней Вселенной

Выполнила:

студентка 2 курса 218 группы
Черненко Алина Дмитриевна

Научный руководитель:

д.ф. - м.н., член - корр. РАН
Горбунов Дмитрий Сергеевич



Постановка задачи:

Получить из общих принципов термодинамики в ранней Вселенной и осцилляций нейтрино в лептонной плазме при наличии лептонной асимметрии **распределение стерильных нейтрино по импульсам** при любой заданной температуре и уравнение для **ограничений на параметры смешивания** при которых кэВ-ные стерильные нейтрино генерируют **теплую темную материю**.



Дополнительные ограничения на параметры смешивания:

NRP ($L_6 = 0$) – нерезонансное рождение стерильных нейтрино

RP ($L_6 > 0$) – резонансное рождение стерильных нейтрино

BBN ($L_6 = 2500$) – первичный нуклеосинтез

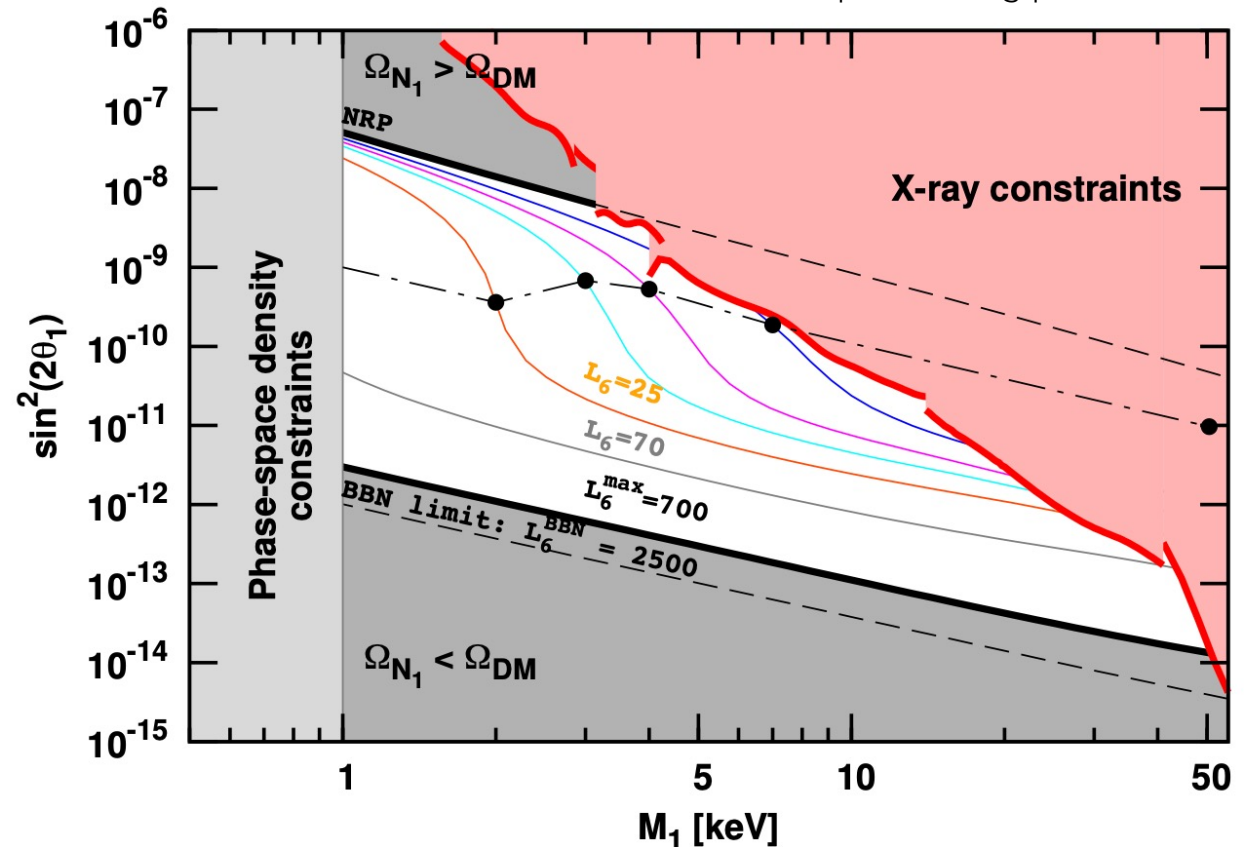
BAU – барионная асимметрия во Вселенной

X-ray constraints – ограничения из прямых поисков монохроматической линии в рентгеновских спектрах галактик

Phase-space density constraints – ограничения из величины фазовой плотности темной материи

$L_6 = 10^6 \Delta_L$ - лептонная асимметрия, помноженная на 10^6 ($700 \geq L_6 \geq 0$)

<https://arxiv.org/pdf/0901.0011>



Уравнение Больцмана в расширяющейся Вселенной:

$$\frac{df_s}{dt} = \Gamma_{\alpha \rightarrow s} \left[f_\alpha - f_s \right]$$

обратные процессы (в рамках данной задачи) маловероятны:

$$\frac{df_s}{dt} = \Gamma_{\alpha \rightarrow s} f_\alpha$$

$$\left(\frac{\partial f_s(y, T)}{\partial T} \right)_y = -\frac{1}{HT} \Gamma_{\alpha \rightarrow s} f_\alpha$$

$$f_s(y, T) = -\frac{1}{4} \int_{\infty}^T \sin^2 2\theta_{\alpha}^{\text{пл.}} \Gamma_{\alpha} f_{\alpha} \frac{1}{HT'} dT'$$

Выразим все неизвестные величины и получим итоговое распределение!



Термодинамика в расширяющейся Вселенной

Распределение Бозе – Эйнштейна и Ферми – Дирака для бозонов и фермионов соответственно:

$$f(\vec{p}) = \frac{1}{(2\pi)^3} \frac{1}{e^{\frac{E(\vec{p}) - \mu}{T}} \mp 1}$$

Распределение активного нейтрино типа α :

$$f_\alpha = \frac{1}{(2\pi)^3} \frac{1}{e^{y - \frac{\mu_\alpha}{T}} + 1}$$

$$n_i = \begin{cases} \frac{g_i T^3}{\pi^2} \zeta(3) + \frac{g_i T^2 \mu_i}{6} + \dots & \text{для бозонов} \\ \frac{3}{4} \frac{g_i T^3}{\pi^2} \zeta(3) + \frac{g_i T^2 \mu_i}{12} + \dots & \text{для фермионов} \end{cases}$$

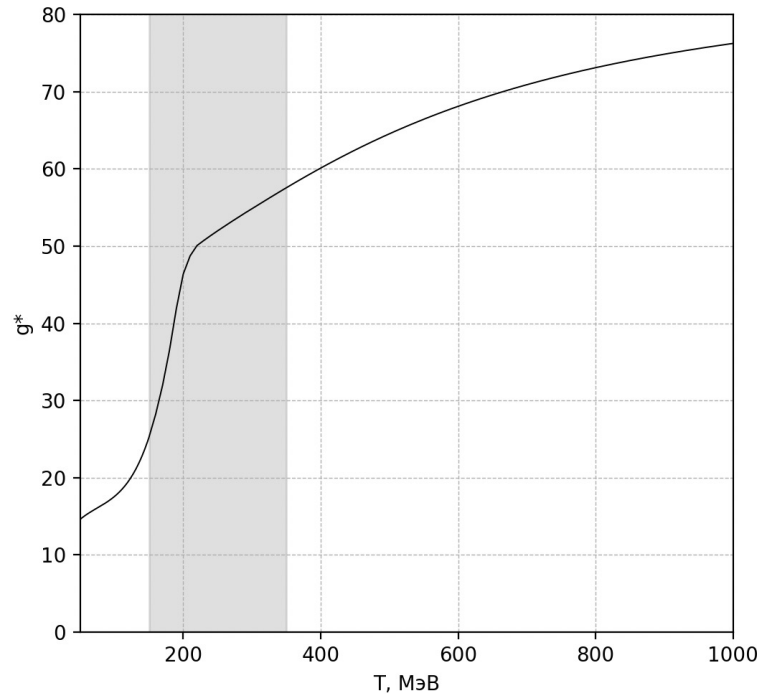
$$\rho_i = \begin{cases} g_i \frac{\pi^2}{30} T^4 + \frac{3g_i T^3 \mu_i}{\pi^2} \zeta(3) + \dots & \text{для бозонов} \\ \frac{7}{8} g_i \frac{\pi^2}{30} T^4 + \frac{9g_i T^3 \mu_i}{4\pi^2} \zeta(3) + \dots & \text{для фермионов} \end{cases}$$

$$\rho(T) = g_* \frac{\pi^2}{30} T^4$$

$$s(T) = g_* \frac{2\pi^2}{45} T^3$$

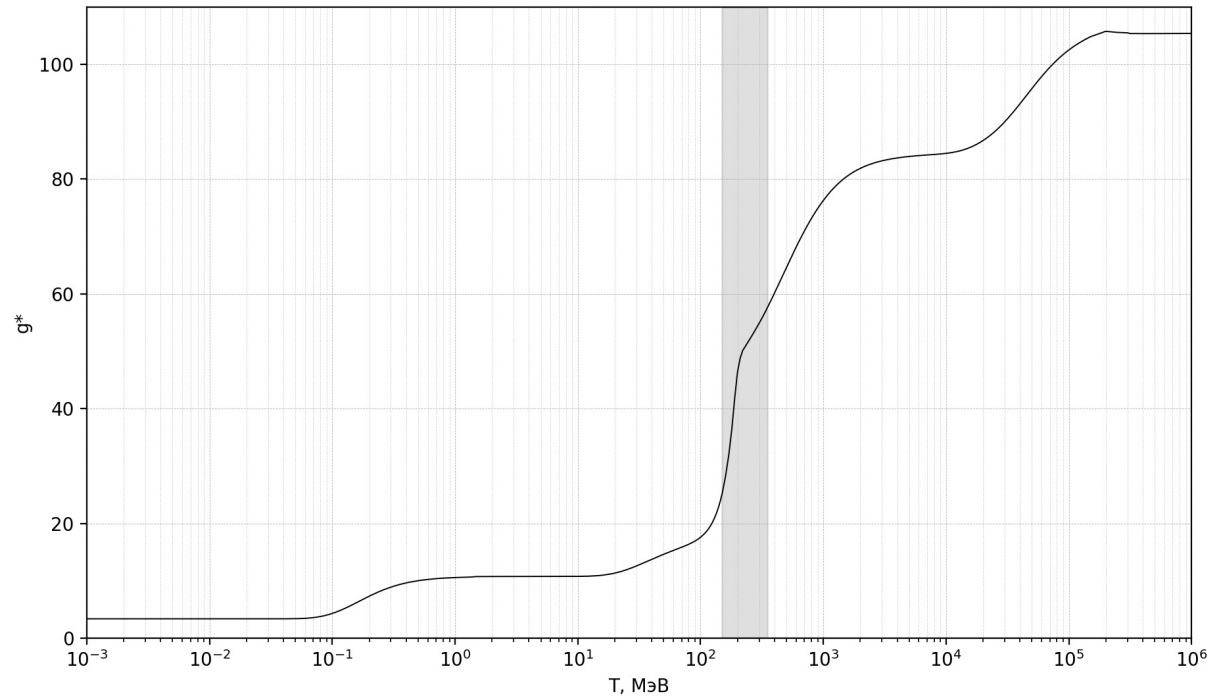


Эффективные степени свободы g^*



$T, \text{ МэВ}$	10	100	300	1000
g_*	10,75	14,25	58,25	68,75

Проблемы в зоне КХД-перехода!



$$g_* = \sum_i (2s_i + 1) \left(\frac{T_i}{T}\right)^4_{\text{бозонов}} + \frac{7}{8} \sum_k (2s_k + 1) \left(\frac{T_k}{T}\right)^4_{\text{фермионов}}$$



Постоянная Хаббла

$$H^2 \equiv \left(\frac{\dot{a}}{a} \right)^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho - \frac{\kappa}{a^2}$$

В случае плоской однородной изотропной Вселенной для радиационно-доминированной стадии условие равновесности протекающих во Вселенной процессов имеет вид:

$$H(T) = \sqrt{g_* \frac{4\pi^3 G}{45} T^4} \ll \Gamma$$



Нейтринные осцилляции

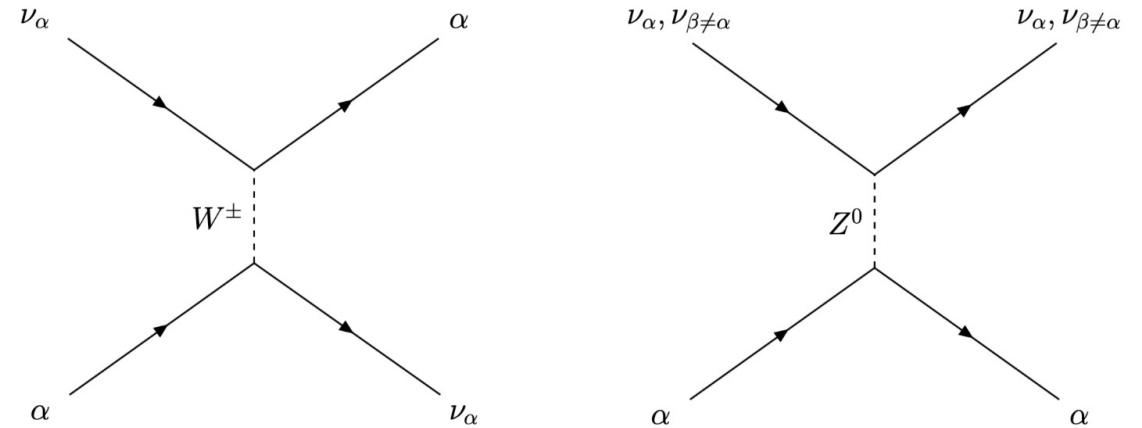
Эффективный Гамильтониан при учете взаимодействия с плазмой:

$$H = U_{\alpha,i}^* \frac{M^2}{2E} U_{\alpha,i} + V_{int}$$

$$M = \begin{pmatrix} m_\alpha & 0 \\ 0 & m_s \end{pmatrix}$$

$$V_{int} = \begin{pmatrix} V_{\alpha\alpha} & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$\alpha = e, \mu, \tau$



Упругое рассеяние активных нейтрино на лептоне типа $\alpha = e, \mu, \tau$.

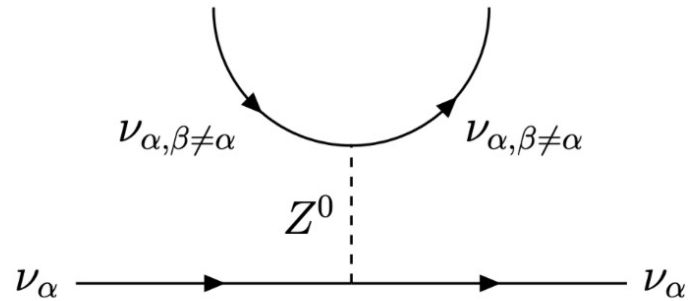
$$t_\alpha^{vac} = \frac{2E}{\Delta m_{s,1}^2} \approx \frac{2E}{m_s^2}$$

$$V_{\alpha\alpha} = \sqrt{2} G_F n_\alpha(L)$$

$$\sin^2 2\theta_\alpha^{пл.} = \frac{\sin^2 2\theta_\alpha}{(1 - V_{\alpha\alpha} t_\alpha^{vac})^2}$$



Лептонная асимметрия



Взаимодействие активных нейтрино с нейтрино плазмы.

$$V_{\alpha\alpha} = \sqrt{2}G_F \left[2(n_{\nu_\alpha}(T) - n_{\bar{\nu}_\alpha}(T)) + \sum_{\beta \neq \alpha} (n_{\nu_\beta}(T) - n_{\bar{\nu}_\beta}(T)) \right]$$

$$V_{\alpha\alpha} = \frac{11\sqrt{2}}{24T_0} T^3 G_F \left[2\mu_{\nu_\alpha} + \sum_{\beta \neq \alpha} \mu_{\nu_\beta} \right]$$

Зависимость химических потенциалов активных нейтрино от температуры:

$$\mu_{\nu_\alpha}(T) = L_{\nu_\alpha} \mu_{L_\alpha}(T)$$

$$\mu_\nu = 0.01 T$$



Темп осцилляций в лептонной плазме

В данной работе не учитываются адроны плазмы и взаимодействие происходит с лептонами, что возможно описать при низких температурах в ранней Вселенной:

$$\Gamma_{\alpha \rightarrow s} = \frac{1}{2} \Gamma_{\alpha} \langle P(\alpha \rightarrow s) \rangle = \frac{1}{4} \sin^2 2\theta_{\alpha}^{\text{пл.}} \Gamma_{\alpha}$$

$$\Gamma_{\alpha} = \frac{7\pi}{24} G_F^2 T^4 E_{\nu_{\alpha}} \left(1 + \frac{4}{9} \delta_{\alpha}^e \right)$$

Проблема правильного определения темпа взаимодействия активного нейтрино с плазмой и эффективного числа степеней свободы, в особенности в рамках КХД-перехода – **основная на текущий момент.**



Спектр стерильных нейтрино

$$f_s(y, T) = - C(\alpha) \sin^2 2\theta_\alpha \int_0^T \frac{T'^2 y \, dT'}{\sqrt{g_*(T')} \left(1 - \frac{11\sqrt{2}}{12 T_0} G_F T'^4 \frac{y}{m_s^2} \left[2\mu_\alpha + \sum_{\beta \neq \alpha} \mu_\beta \right] \right)^2 \left(e^{y - \frac{\mu_\alpha}{T'}} + 1 \right)}$$

$$\underbrace{\frac{7 G_F^2}{512 \pi^4} \sqrt{\frac{5}{\pi G}} \left(1 + \frac{4}{9} \delta_\alpha^e \right)}_{C(\alpha)}$$



Ограничения на параметры смешивания

$$\rho_s(y, T) = \rho_\Lambda(T) \quad sa^3 = const \quad \rho_c \equiv \frac{3}{8\pi G} H_0^2$$

$$\rho_\Lambda(T) = \Omega_\Lambda \frac{3H_0^2}{8\pi G} \frac{g_*(T)}{g_{*,0}} \frac{T^3}{T_0^3}$$

$$\sin^2 2\theta_\alpha = \frac{g_*(T)}{g_{*,0}} \frac{3\pi H_0^2 \Omega_\Lambda}{8T G T_0^3 C(\alpha)} \left[\int_0^{y_{max}} y^3 \int_T^\infty \frac{T'^2 dT'}{\sqrt{g_*(T')} \left(e^{y - \frac{\mu_\alpha}{T'}} + 1 \right) \left(1 - \frac{11\sqrt{2}}{12 T_0} G_F T'^4 \frac{y}{m_s^2} \left[2\mu_\alpha + \sum_{\beta \neq \alpha} \mu_\beta \right] \right)^2} dy \right]^{-1}$$



Планы на будущее

В дальнейшем планируется **расширить модель (1 + 1) до модели (3 + 1)**, в таком случае два дополнительных флейвора активных нейтрино повлекут за собой появление расширенной матрицы смешивания и более сложного выражения для $\sin^2 2\theta_{\alpha}^{\text{пл.}}$

Также планируется учесть **взаимодействие с ультрарелятивистскими мезонами** в КХД-переход и получить общее решение для темпа взаимодействия с плазмой.



Спасибо за внимание!

