

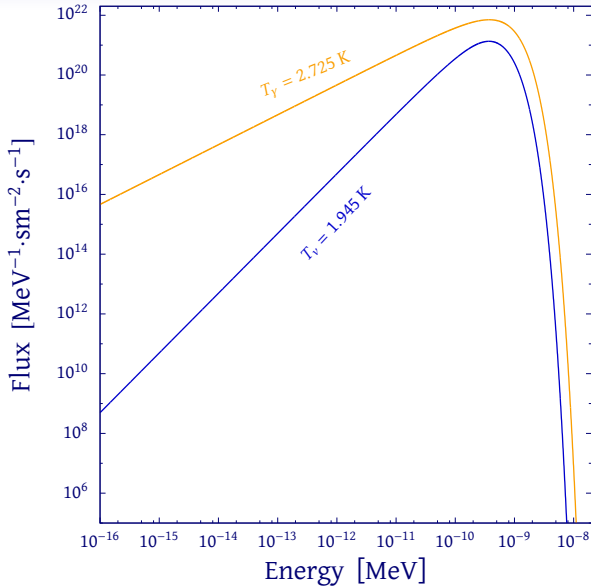
Генерация реликтовых нейтрино малых координатных импульсов

В.Ю. Юрченко
А.В. Иванчик

Всероссийская конференция
Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра - 2021

Москва, ИКИ РАН
21-24 декабря 2021

Реликтовые нейтрино

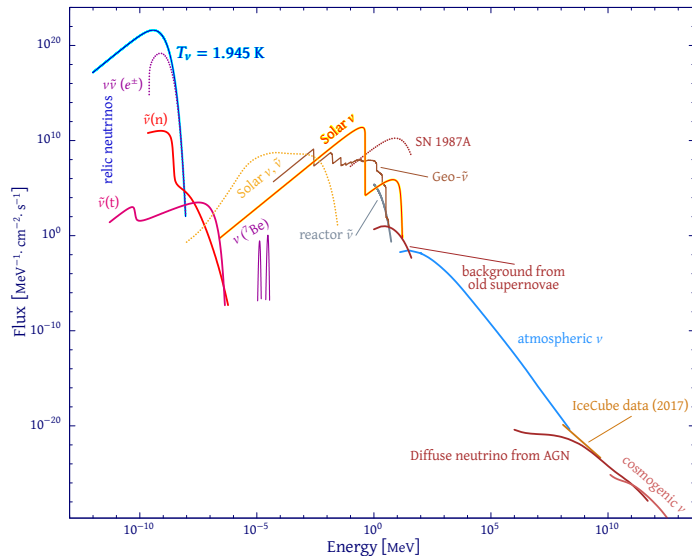


$$f_\nu = \frac{1}{(2\pi)^3} \frac{1}{e^{\epsilon/T} + 1}$$

$$f_\gamma = \frac{1}{(2\pi)^3} \frac{1}{e^{\epsilon/T} - 1}$$

Реликтовые нейтрино

Grand Unified Neutrino Spectrum



Тепловая история реликтовых нейтрино

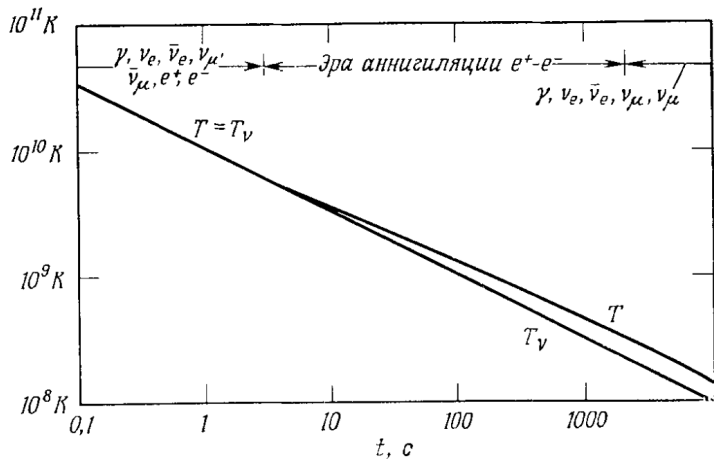


Рис.: С. Вайнберг «Грав. и космолог.»

$$[x = m_0 \cdot a \quad y = a \cdot p]$$

$$Hx \frac{\partial f_\nu(y_1)}{\partial x} = I_{\text{coll}}(y_1)$$

Закалка и «подогрев» реликтовых нейтрино

$$1. \quad Hx \frac{\partial f_\nu}{\partial x} = \frac{1}{2\varepsilon_1} \sum \int \frac{d^3 p_2}{2\varepsilon_2 (2\pi)^3} \frac{d^3 p_3}{2\varepsilon_3 (2\pi)^3} \frac{d^3 p_4}{2\varepsilon_4 (2\pi)^3} \cdot (2\pi)^4 \delta^{(4)}(\underline{p}_1 + \underline{p}_2 - \underline{p}_3 - \underline{p}_4) F(f_1, f_2, f_3, f_4) S|A|_{12 \rightarrow 34}^2$$

$$F(f_1, f_2, f_3, f_4) = f_3 f_4 (1 - f_1)(1 - f_2) - f_1 f_2 (1 - f_3)(1 - f_4)$$

$$\nu_e + \tilde{\nu}_e \leftrightarrow \nu_e + \tilde{\nu}_e$$

$$\nu_e + \nu_e \leftrightarrow \nu_e + \nu_e$$

$$\nu_e + \tilde{\nu}_e \leftrightarrow \nu_{\mu,\tau} + \tilde{\nu}_{\mu,\tau}$$

$$\nu_e + \tilde{\nu}_{\mu,\tau} \leftrightarrow \nu_e + \tilde{\nu}_{\mu,\tau}$$

$$\nu_e + \nu_{\mu,\tau} \leftrightarrow \nu_e + \nu_{\mu,\tau}$$

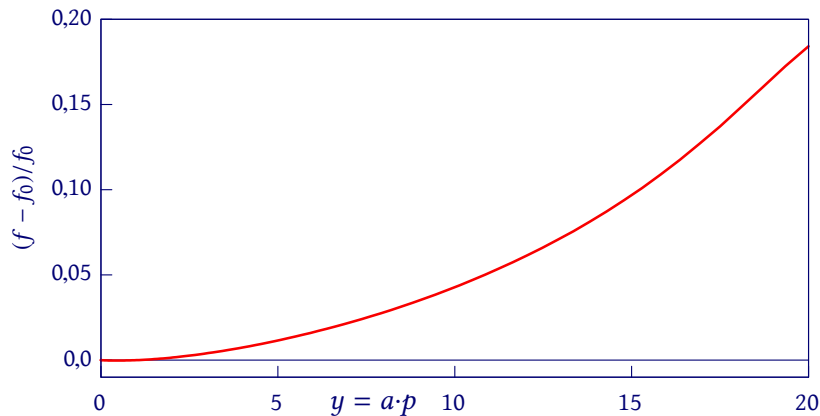
$$\nu_e + \tilde{\nu}_e \leftrightarrow e^+ + e^-$$

$$\nu_e + e^- \leftrightarrow \nu_e + e^-$$

$$\nu_e + e^+ \leftrightarrow \nu_e + e^+$$

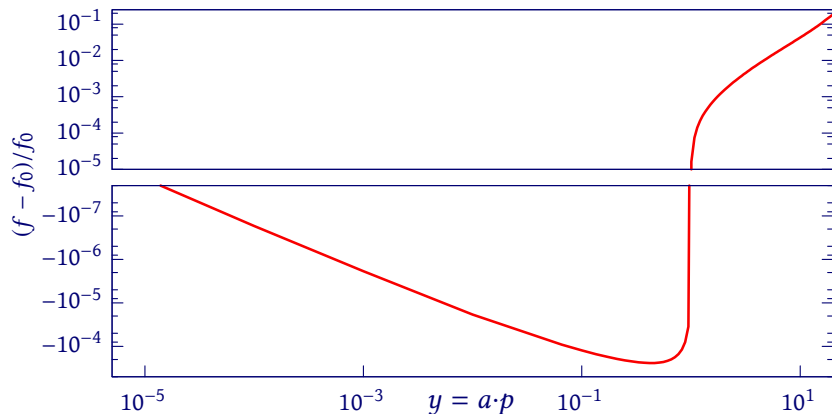
$$2. \quad x \frac{d\rho(x)}{dx} = -3(\rho + P)$$

Искажение функции распределения реликтовых нейтрино



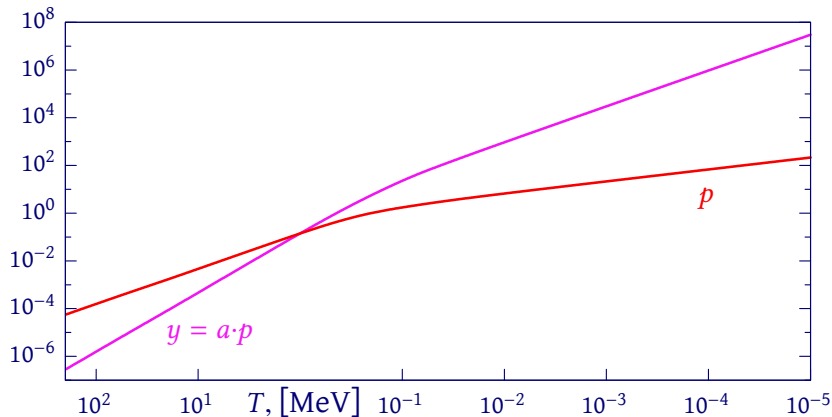
$$f_0 = \frac{1}{(2\pi)^3} \frac{1}{e^{p/T} + 1}$$

Искажение функции распределения реликтовых нейтрино



$$f_0 = \frac{1}{(2\pi)^3} \frac{1}{e^{p/T} + 1}$$

«Нетермализующиеся» реликтовые нейтрино



$$p > \sqrt{\frac{H}{G_F^2 \gamma_e^2 T_\gamma^3}}$$

$$\gamma_e \approx \frac{\rho_e}{n_e m_e}$$

$$\lim_{T_\gamma \rightarrow \infty} a \cdot T_\gamma =$$

$$= \lim_{T_\nu \rightarrow \infty} a \cdot T_\nu = 1$$

Генерация нейтрино малых импульсов

$$p + e^- \rightarrow n + \nu_e$$

$$Q \equiv m_p + m_e - m_n = m_e - \Delta \approx -0.782 \text{ МэВ}$$

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \tilde{\nu}_\mu + \nu_e$$

$$\tau_\mu \approx 2,2 \cdot 10^{-6} \text{ с}$$

$$x = m_0 \cdot a \quad y = a \cdot p$$

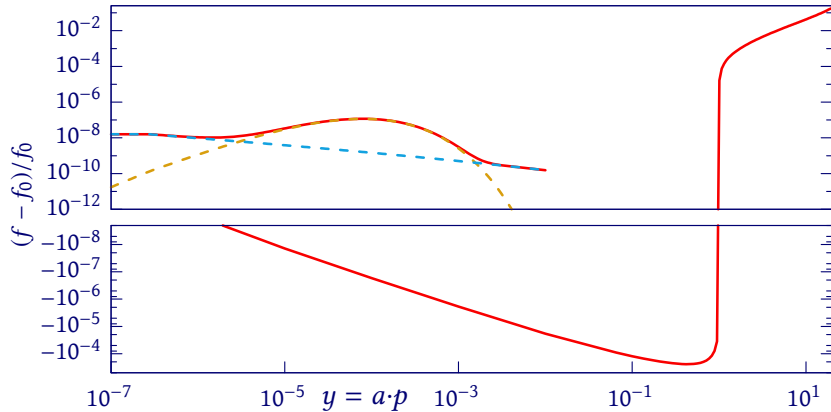
$$Hx \frac{\partial f_\nu}{\partial x} = \frac{2\pi^2}{\tau_n \lambda_0} n_p(x) \sqrt{(\Delta + p)^2 - m_e^2} (\Delta + p) f_e(\Delta + p) (1 - f_\nu(\varepsilon_e))$$

$$w = 2 \frac{p}{m_\mu}$$

$$Hx \frac{\partial f_\nu}{\partial x} = \frac{1}{\tau_\mu} \frac{n_\mu}{n_{\nu_e}} w^2 (1 - w) (1 - f_\nu(\varepsilon_e))$$

$$\Delta f_\nu \Big|_y = \int_{x_0}^{x_1} \frac{dx}{Hx} I_{\text{Coll}}(y)$$

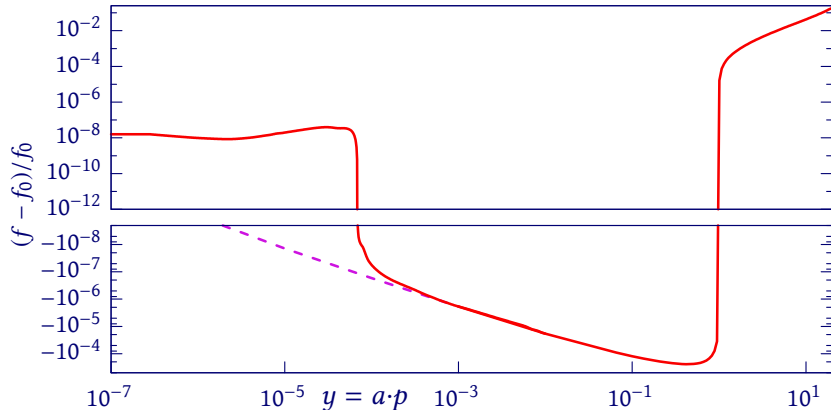
Функция распределения в области малых координатных импульсов



$$p + e^- \rightarrow n + \nu_e$$

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \tilde{\nu}_\mu + \nu_e$$

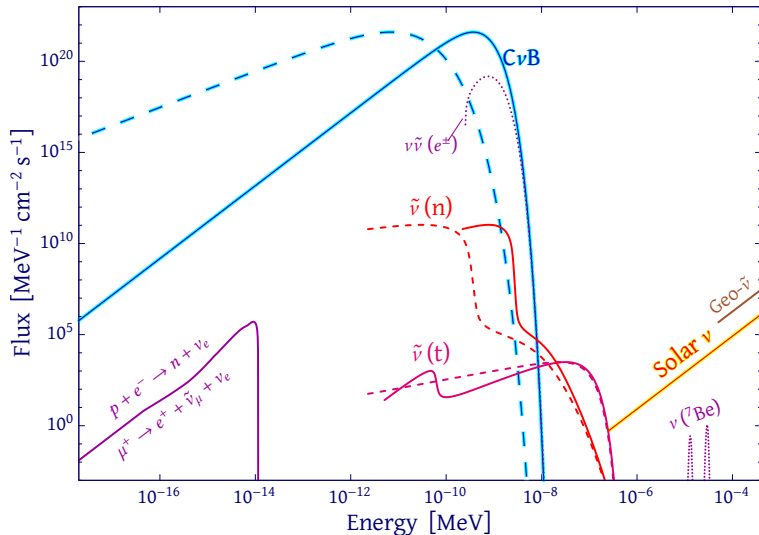
Функция распределения в области малых координатных импульсов



$$p + e^- \rightarrow n + \nu_e$$

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \tilde{\nu}_\mu + \nu_e$$

Функция распределения в области малых координатных импульсов



Заключение

- Вычислена функция распределения реликтовых нейтрино в области малых координатных импульсов ($y < 10^{-3}$) с учётом процессов генерации нейтрино в этой области за счёт процессов $p + e^- \rightarrow n + \nu_e$ и $\mu^+ \rightarrow e^+ + \tilde{\nu}_\mu + \nu_e$
- Обнаружено, что в области координатных импульсов $y < 10^{-4}$ добавка к функции распределения обусловленная процессами генерации не термализуется при $T < 10$ МэВ
- Отработана схема расчёта относительного искажения функции распределения реликтовых нейтрино в области малых координатных импульсов с учётом генерации нейтрино в этой области и их термализации. Это даёт возможность рассмотрения широкого класса гипотетических процессов генерации нейтрино в нетермализуемой области при различных температурах (например, аннигиляция или распад тёмной материи)

Спасибо
за внимание!