

# Космологические ограничения на параметр кинетического смешивания в моделях с зеркальной скрытой массой

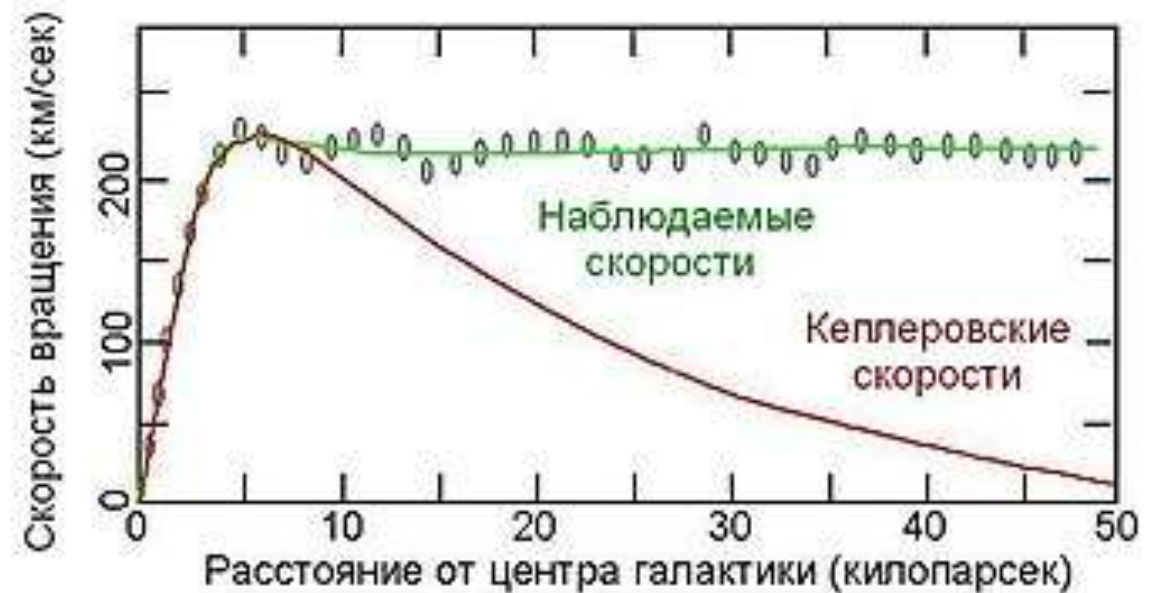
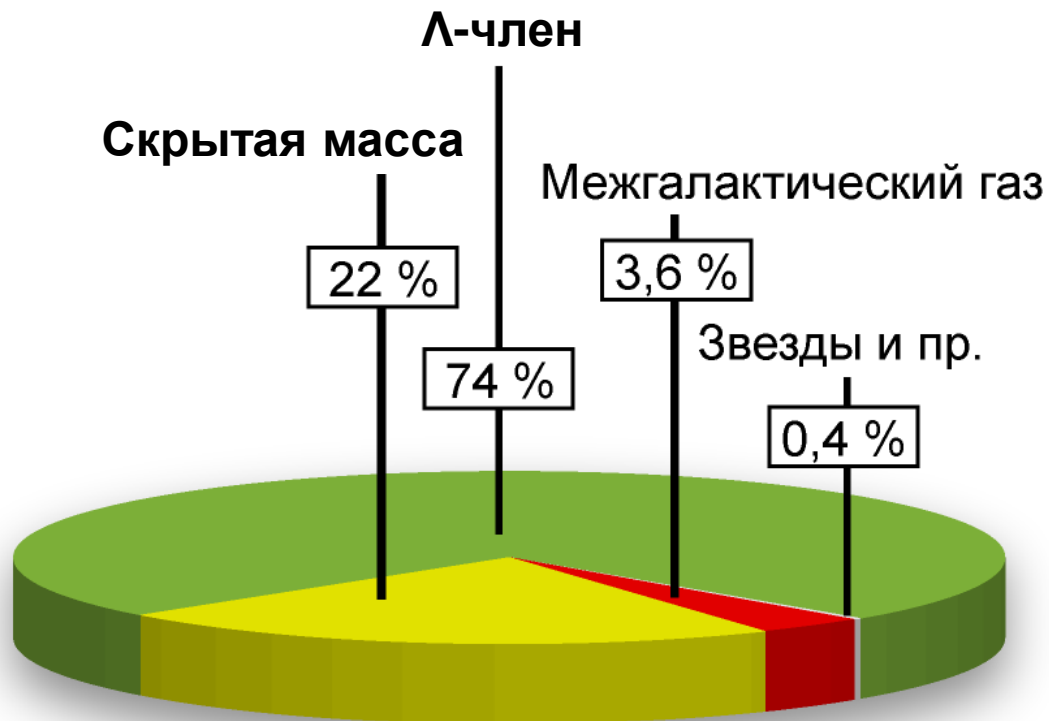
Работу выполнил студент группы Б19-102

Зуев К.М.

Научный руководитель:  
д.ф-м.н., проф. Хлопов М.Ю.

# Введение

Скрытая масса - это одна из форм материи, составляющая около четверти массы-энергии всей Вселенной.

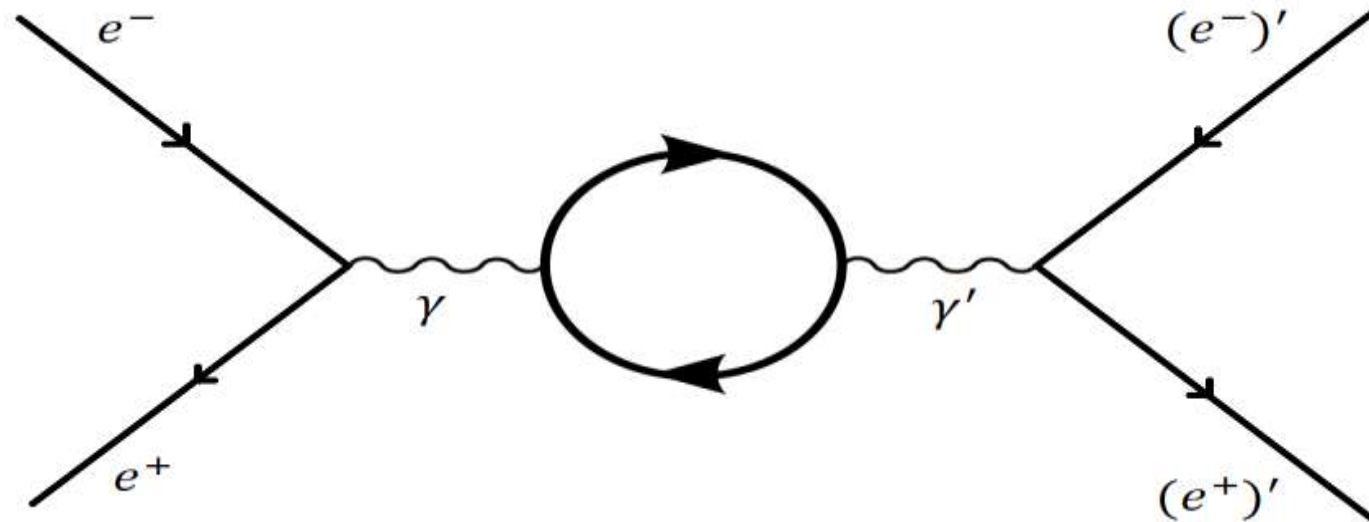


# Введение

**Модель зеркального вещества:** существует зеркальный сектор, состоящий из частиц, киральность которых является правой.

**Цель работы:** уточнение космологических ограничений на параметр кинетического смешивания реакции аннигиляции электрон-позитронной пары

- [1] P. Ciarcelluti and R. Foot. Early Universe cosmology in the light of the mirror dark matter interpretation of the DAMA/Libra signal. *Phys.Lett.B679:278-281*, 9 2008.  $\epsilon \approx 8,5 \cdot 10^{-10}$
- [2] Zurab Berezhiani and Angela Lepidi. Cosmological bounds on the "millicharges" of mirror particles. *Phys.Lett.B681:276-281* 11 2009.  $\epsilon \approx 3 \cdot 10^{-10}$



# Основные положения

1. В условиях ранней Вселенной существовала асимметрия между температурой обычного сектора и температурой зеркального сектора. В начальный момент времени секторы находились в термодинамическом равновесии.

Кинетический член лагранжиана взаимодействия:

$$\mathcal{L}_{mix} = \frac{\epsilon}{2} F^{\mu\nu} F'_{\mu\nu}$$

где  $\epsilon$  – параметр кинетического смешивания.

2. Уравнение эволюции зеркального сектора:

$$\frac{\partial \rho'}{\partial t} = \xi(T)$$

$\xi(T)$  – известная функция, характеризующая процесс заполнения зеркального сектора

# Релятивистский случай

5

$$\frac{\partial \rho'}{\partial t} = -n_{e^+} n_{e^-} \langle \sigma v_{Mol} \mathcal{E} \rangle$$



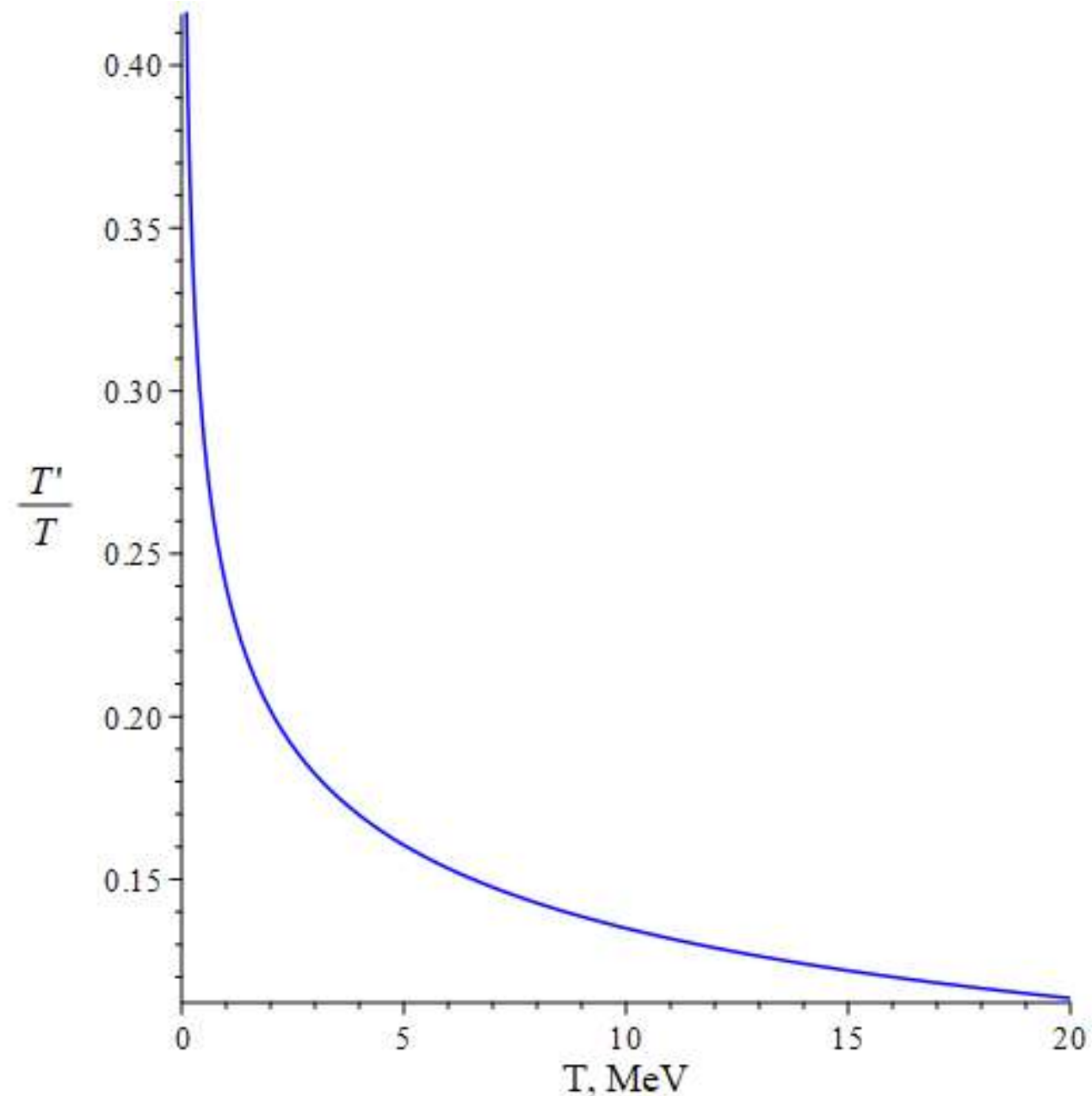
$$\frac{\partial \rho' / \rho}{\partial T} = \frac{-n_{e^+} n_{e^-} \langle \sigma v_{Mol} \mathcal{E} \rangle 0.6 M_{Pl}}{\pi^2 g T^4 / 30 \sqrt{g} T^3}$$



$$n_{e^+} \approx n_{e^-} \approx \frac{3\zeta(3)}{2\pi^2} T^3 \quad \langle \sigma v_{Mol} \mathcal{E} \rangle = \frac{2\pi\alpha^2 \epsilon^2}{3T}$$



$$\frac{T'}{T} = \left( \frac{g}{g'} A \right)^{\frac{1}{4}} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_i} \right)^{\frac{1}{4}} \quad A = \frac{27\zeta(3)^2 \alpha^2 \epsilon^2 M_{Pl}}{\pi^5 g \sqrt{g}}$$



# Решение уравнения эволюции для [1]

$$\frac{\partial \rho' / \rho}{\partial T} = \frac{-n_{e^+} n_{e^-} \langle \sigma v_{Mol} \mathcal{E} \rangle}{\pi^2 g T^4 / 30} \frac{0.6 M_{Pl}}{\sqrt{g} T^3}$$

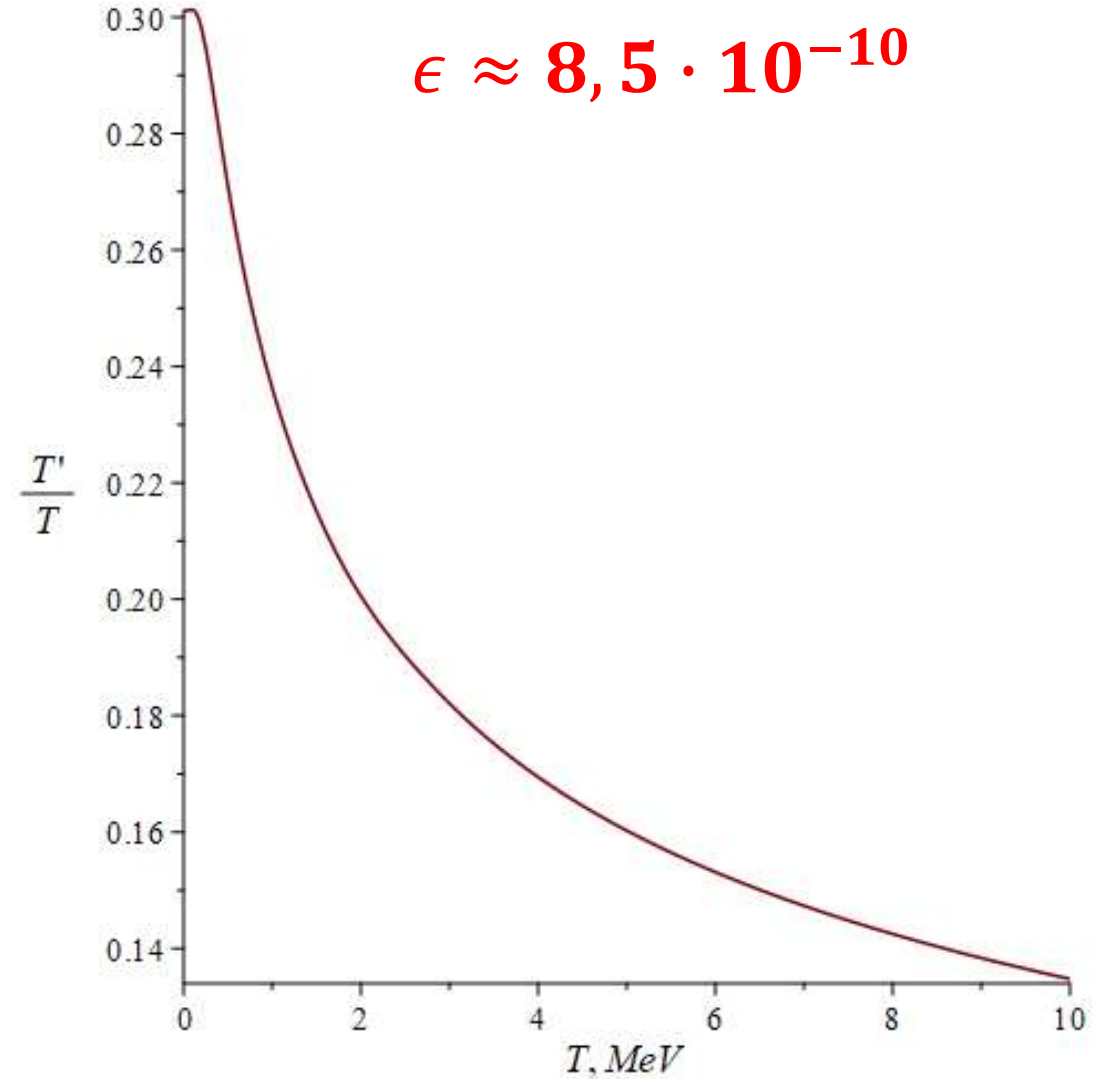
$$\frac{T'}{T} \leq 0,3$$

$$\epsilon \approx 8,5 \cdot 10^{-10}$$

$$n_{e^+} \approx n_{e^-} \approx \frac{1}{\pi^2} \int_{m_e}^{\infty} \frac{\sqrt{E^2 - m_e^2} E}{1 + e^{E/T}} dE$$

Аппроксимирующая функция:

$$F_m(T) = \begin{cases} \sum_{n=1}^{100} C_n \frac{e^{-20T}}{\sqrt[4]{T}}, & T < 4 \\ \frac{a}{T^2}, & T \geq 4 \end{cases}$$



$$\langle \sigma v_{Mol} \mathcal{E} \rangle = \frac{1}{8m_e^4 T^2 K_2^2 (m_e/T)} \int_{4m_e}^{\infty} ds \sigma (s - 4m_e^2) \sqrt{s} \int_{\sqrt{s}}^{\infty} dE_+ e^{-E_+/T} E_+ \sqrt{\frac{E_+^2}{s} - 1}, \quad \sigma = \frac{4\pi}{3} \alpha^2 \epsilon^2 \frac{1}{s^3} (s + 2m_e^2)^2$$

# Решение уравнения эволюции для [2]

$$\frac{\partial \rho' / \rho}{\partial T} = \frac{-n_e \rho_e \langle \sigma v_{Mol} \rangle 0.6 M_{Pl}}{\pi^2 g T^4 / 30 \sqrt{g} T^3}$$

$$\frac{T'}{T} \leq 0,3$$

$$\epsilon \approx 3 \cdot 10^{-10}$$

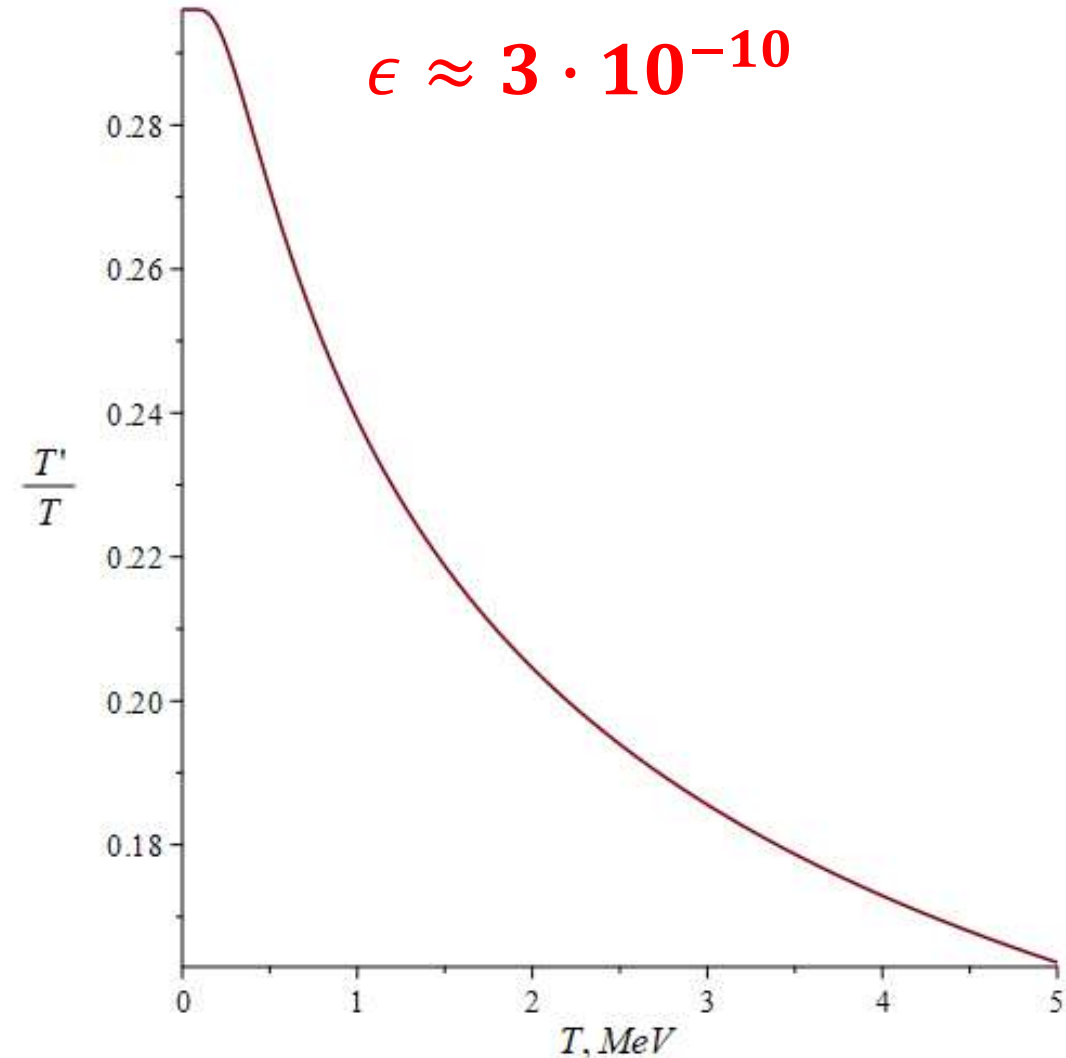
$$n_e = \frac{2}{\pi^2} \int_{m_e}^{\infty} \frac{\sqrt{E^2 - m_e^2} E}{1 + e^{E/T}} dE$$

$$\rho_e = \frac{2}{\pi^2} \int_{m_e}^{\infty} \frac{\sqrt{E^2 - m_e^2} E^2}{1 + e^{E/T}} dE$$

Аппроксимирующая функция:

$$F_m(T) = \begin{cases} S_3(T), & T < 6 \\ \frac{a}{T^2}, & T \geq 6 \end{cases}$$

$S_3(T)$  - сплайн третьего порядка



$$\langle \sigma v_{Mol} \rangle = \frac{1}{8m_e^4 T^2 K_2^2(m_e/T)} \int_{4m_e}^{\infty} ds \sigma(s - 4m_e^2) \sqrt{s} K_1(\sqrt{s}/T)$$

$$\sigma = \frac{4\pi}{3} \alpha^2 \epsilon^2 \frac{1}{s^3} (s + 2m_e^2)^2$$

# Обсуждение

$$\frac{\partial \rho' / \rho}{\partial T} = \frac{-n_e \rho_e \langle \sigma v_{Mol} \rangle}{\pi^2 g T^4 / 30} \frac{0.6 M_{Pl}}{\sqrt{g} T^3}$$

$$\frac{T'}{T} \leq 0,3$$

$$\epsilon \approx 10,3 \cdot 10^{-10}$$

$$n_e = \frac{2}{\pi^2} \int_{m_e}^{\infty} \frac{\sqrt{E^2 - m_e^2} E}{1 + e^{E/T}} dE \quad \longrightarrow \quad n_e = \frac{1}{\pi^2} \int_{m_e}^{\infty} \frac{\sqrt{E^2 - m_e^2} E}{1 + e^{E/T}} dE$$

$$\rho_e = \frac{2}{\pi^2} \int_{m_e}^{\infty} \frac{\sqrt{E^2 - m_e^2} E^2}{1 + e^{E/T}} dE \quad \longrightarrow \quad \rho_e = \frac{1}{\pi^2} \int_{m_e}^{\infty} \frac{\sqrt{E^2 - m_e^2} E^2}{1 + e^{E/T}} dE$$

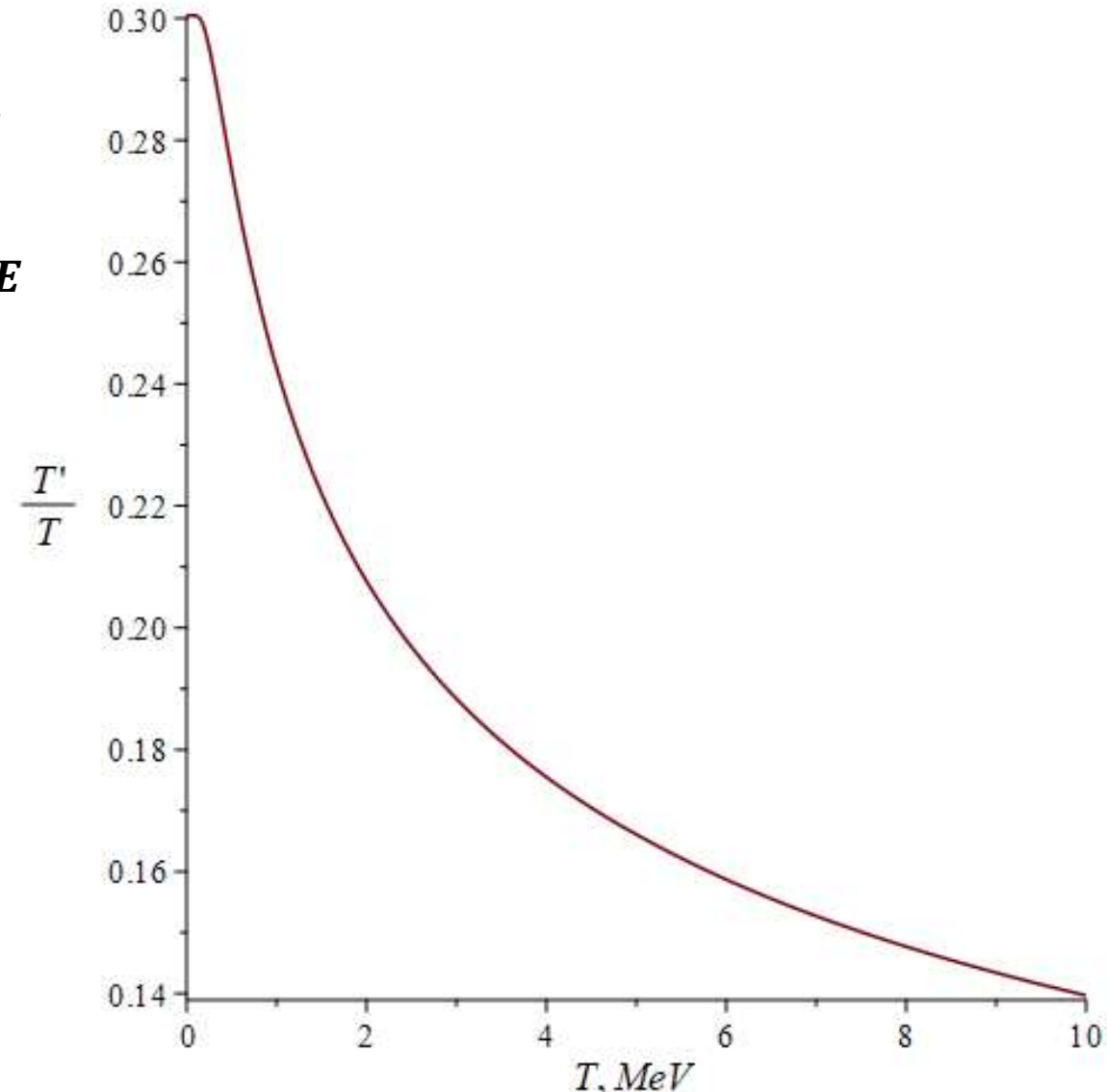
Аппроксимирующая функция:

$$F_m(T) = \begin{cases} S_3(T), & T < 6 \\ \frac{a}{T^2}, & T \geq 6 \end{cases}$$

$S_3(T)$  - сплайн третьего порядка

$$\left( \frac{\epsilon_B}{\epsilon_F} \right)_{old} \approx 2,83 \quad \longrightarrow \quad \left( \frac{\epsilon_F}{\epsilon_B} \right)_{new} \approx 1,21$$

Причина расхождения –  
погрешность численных методов





# Заключение

Результаты работы:

1. Получены решения уравнений эволюции для [1] и [2], найдены параметры кинетического смешивания.
2. Проведен анализ корректности уравнения из [2], в результате чего получено новая оценка параметра смешивания:  
 $\epsilon \approx 10.3 \cdot 10^{-10}$ .
3. Проанализированы источники погрешностей.

# Дальнейшее развитие работы

1. Уточнение параметра кинетического смешивания за счет увеличения точности численных методов.
2. Определение вида взаимодействия, отвечающего за кинетическое смешивание.

Спасибо за внимание!