

Национальный Исследовательский Ядерный Университет «МИФИ»  
Институт Ядерной Физики и Технологий  
Кафедра Физики элементарных частиц (№40)

Выпускная квалификационная работа бакалавра  
на тему

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

Работу выполнил студент группы Б19-102

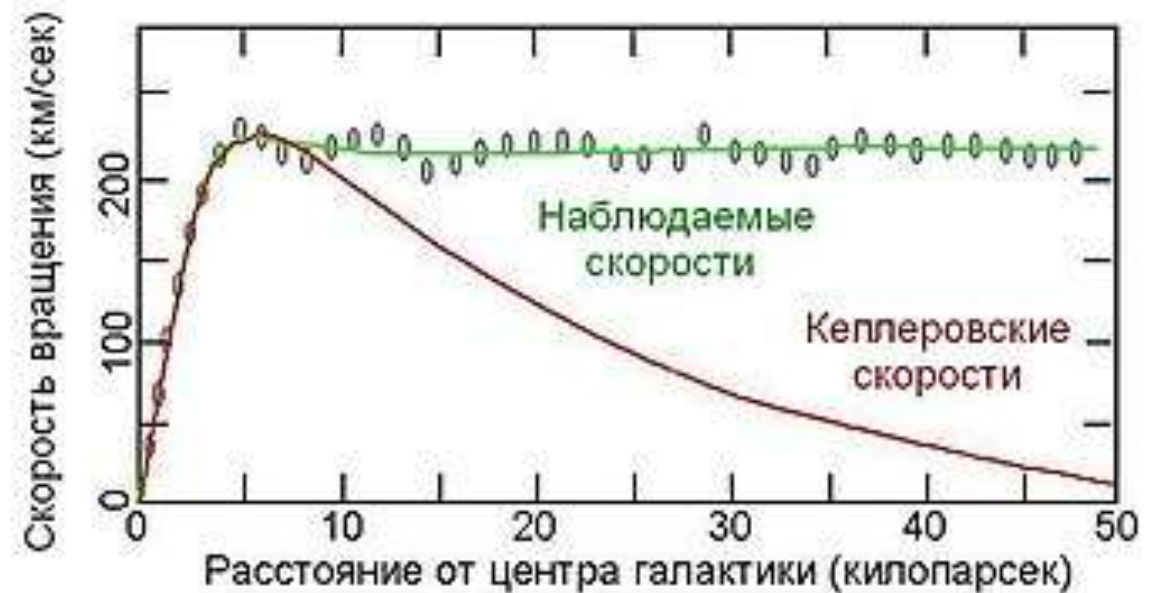
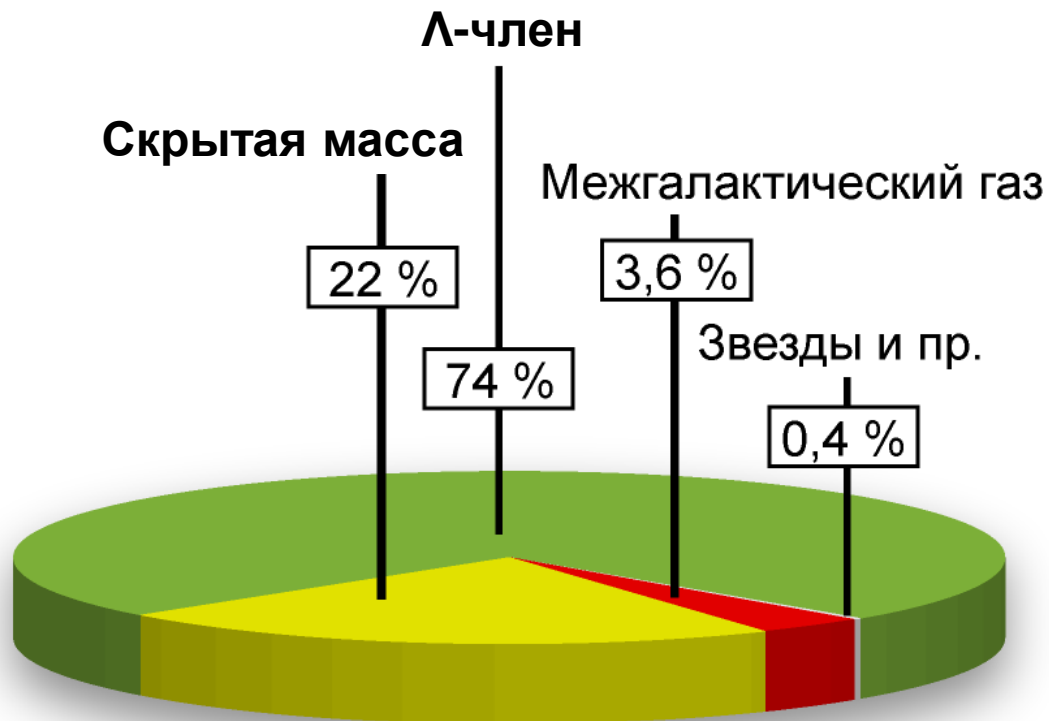
Зуев К.М.

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

Москва 2023

# Введение

Скрытая масса - это одна из форм материи, составляющая около четверти плотности вещества всей Вселенной.



# Введение

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

Киральность – собственное значение матрицы Дирака  $\gamma^5$ , равное  $\pm 1$ .

Мотивация: восстановление симметрии слабых взаимодействий относительно  $P$ -преобразования.

Поля взаимодействий во Вселенной в рамках рассматриваемой модели могут быть описаны как (штрих – группы симметрии в зеркальном секторе)

$$[su(3) \times su(2) \times u(1)] \times [su(3)' \times su(2)' \times u(1)']$$

Зеркальным частицам соответствует тривиальное представление обычной калибровочной группы, а обычным – зеркальной калибровочной группы.

# Термодинамические аспекты

В условиях ранней Вселенной существовала асимметрия между температурой обычного сектора и температурой зеркального сектора в пользу первой. В начальный момент времени секторы находились в термодинамическом равновесии. Численное моделирование реликтового излучения дает ограничение

$$T'/T \leq 0,3.$$

Параметризация температуры в терминах числа степеней свободы приводит к соотношению:

$$\frac{\rho'}{\rho} \propto \left(\frac{T'}{T}\right)^4$$

Уравнение эволюции зеркального сектора:  $\frac{\partial \rho'}{\partial t} = \xi(T)$

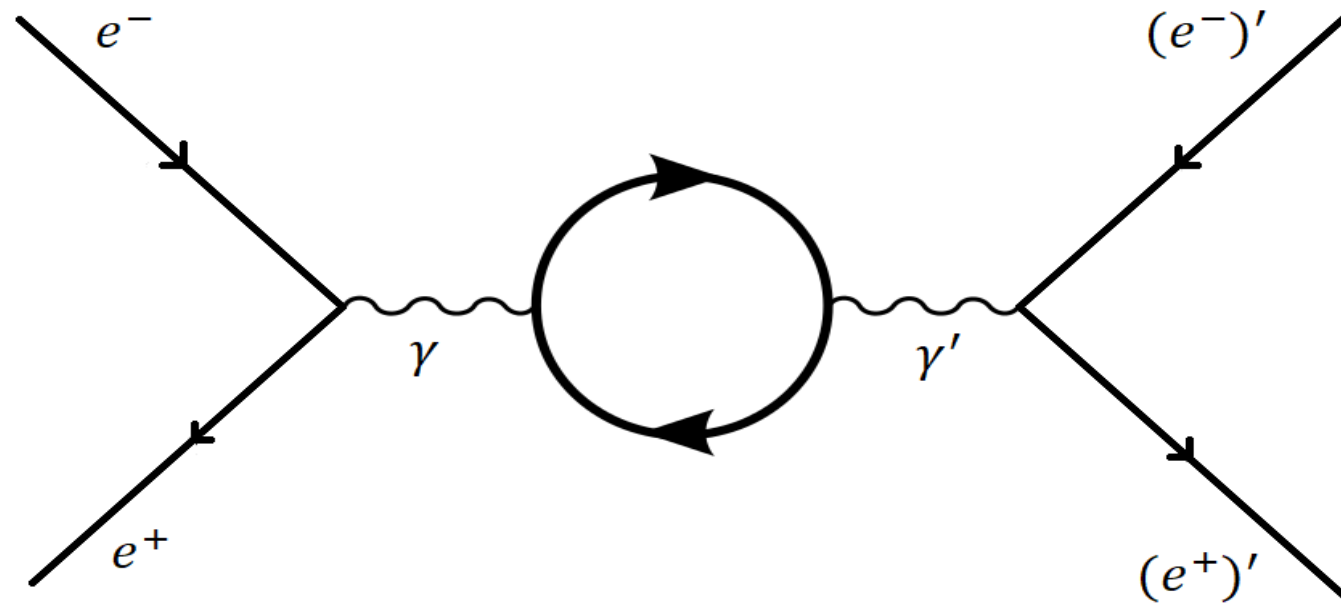
$\xi(T)$  – известная функция, характеризующая процесс заполнения зеркального сектора.

# Кинетическое смешивание

Рассматривается реакция электрон-позитронной аннигиляции с последующим взаимодействием фотона с зеркальным фотоном.

Кинетический член лагранжиана взаимодействия:

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



# Цель и актуальность работы

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

Эксперименты по поиску частиц скрытой массы:

- DAMA/Libra
- DAMA/NaI
- CDMS

Расхождение в теоретических работах:

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

# Релятивистский случай

7

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

Используя закон Стефана-Больцмана и выражение для параметра Хаббла, имеем

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

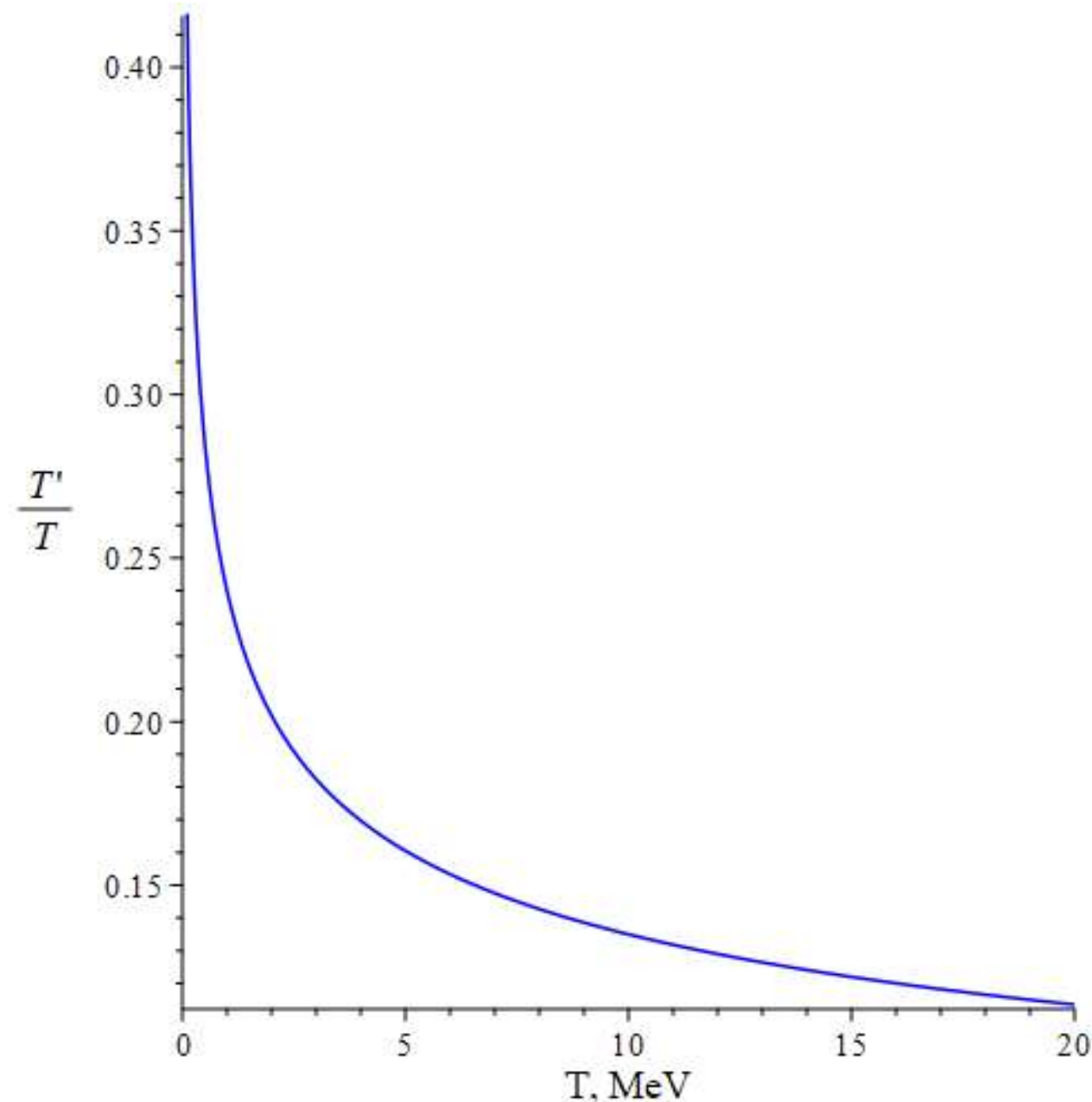
$$n_{e^+} \approx n_{e^-} \approx \frac{3\zeta(3)}{2\pi^2} T^3, \quad \langle \sigma v_{Mol} \mathcal{E} \rangle = \frac{2\pi\alpha^2 \epsilon^2}{3T}$$

$$\frac{\rho'}{\rho} \propto \left( \frac{T'}{T} \right)^4$$

Решение:

$$\frac{T'}{T} = \left( \frac{g}{g'} A \right)^{\frac{1}{4}} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_i} \right)^{\frac{1}{4}}$$

$$A = \frac{27\zeta(3)^2 \alpha^2 \epsilon^2 M_{Pl}}{\pi^5 g \sqrt{g}}$$



# Решение уравнения эволюции для [1]

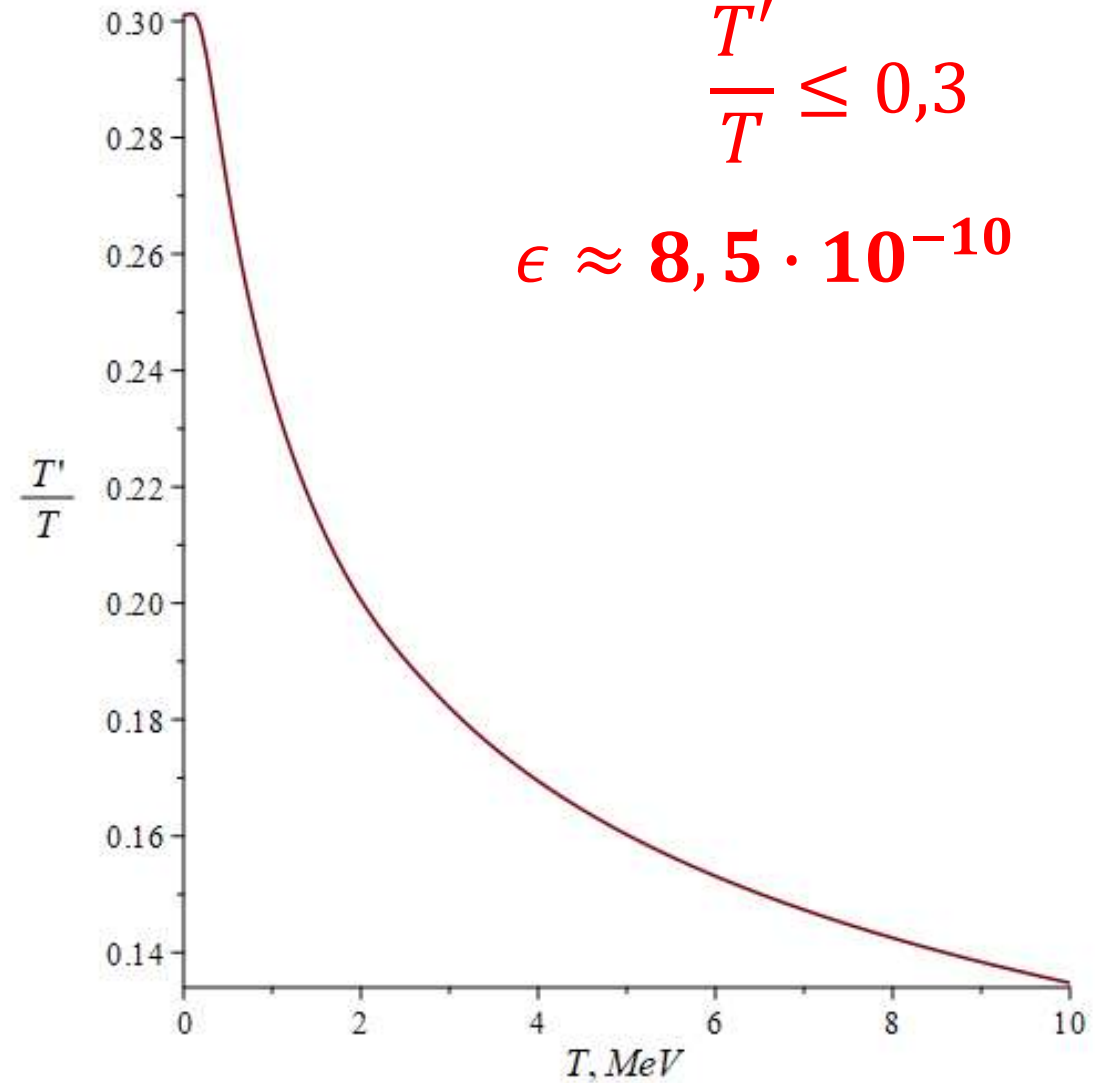
8

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

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

Аппроксимирующая функция:

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



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



# Решение уравнения эволюции для [2]

9

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

где

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

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

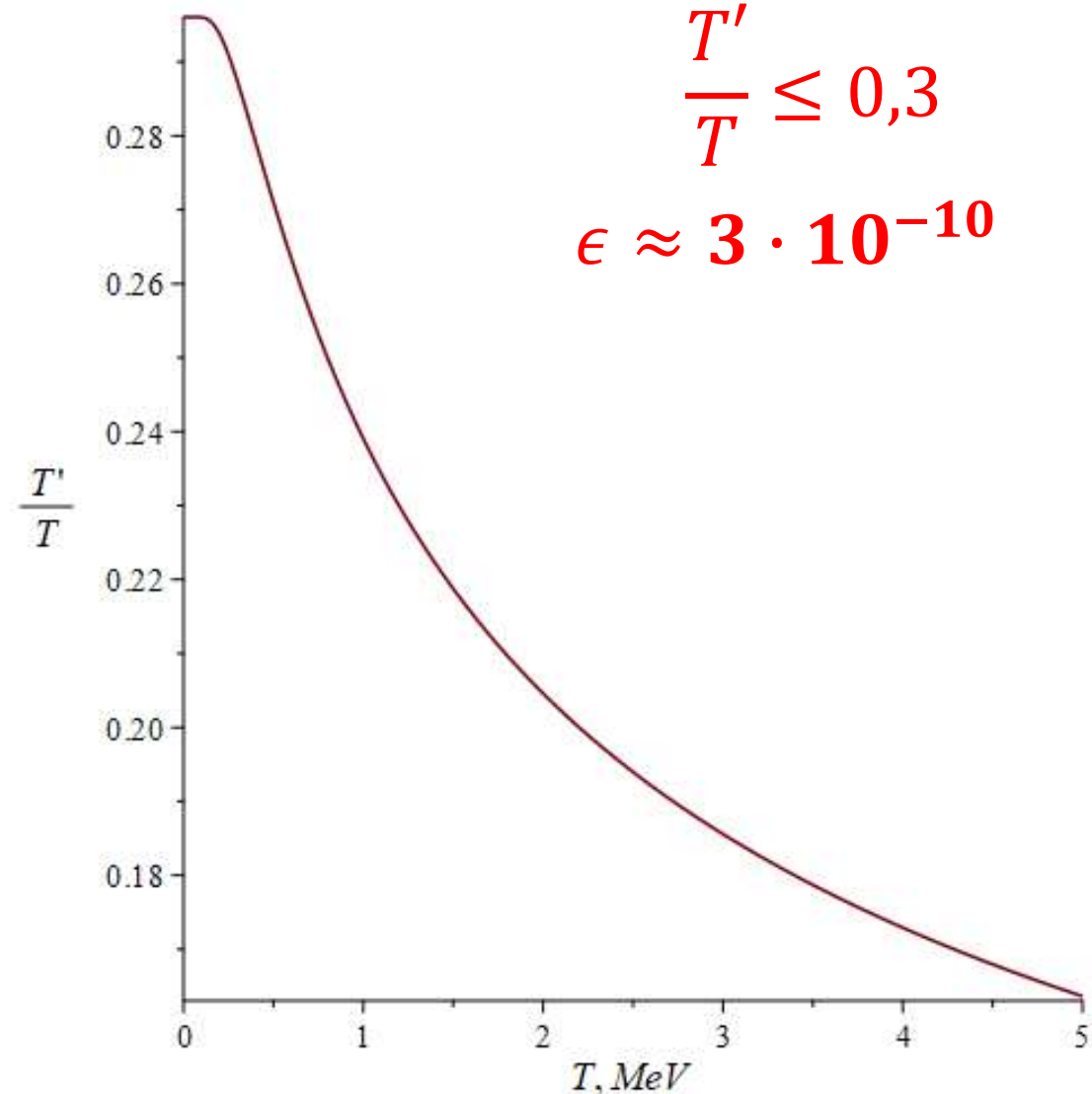
Аппроксимирующая функция:

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

$S_3(T)$  - сплайн третьего порядка

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

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



Из [2]:

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

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

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

В общем случае данные выражения имеют вид (на основании интегрирования функции распределения Ферми-Дирака по импульсам):

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

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

$g_e = 2$  – число спиновых состояний электрона. В таком случае имеем

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

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

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

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

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

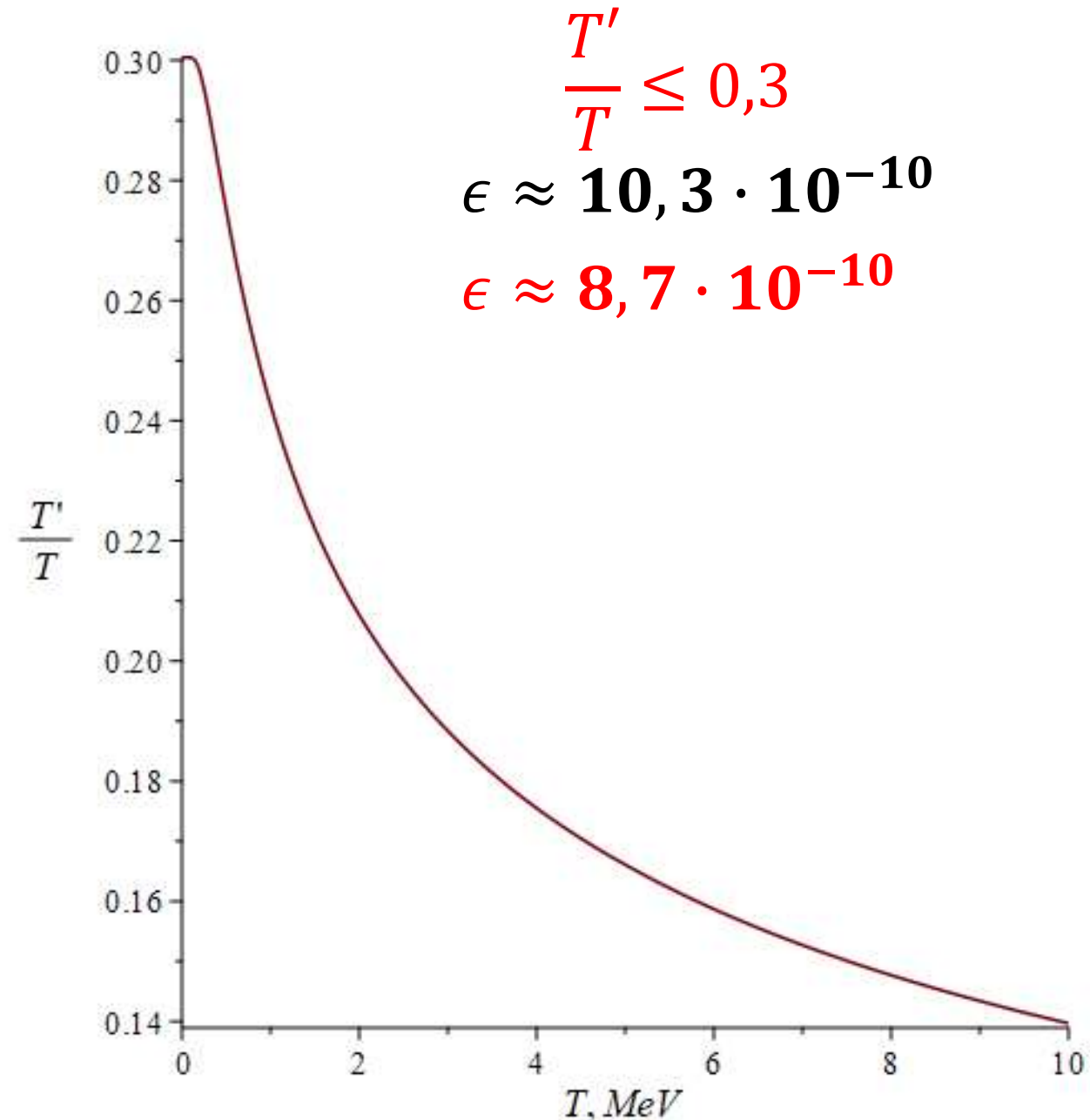
Аппроксимирующая функция:

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

$S_3(T)$  - сплайн третьего порядка

$$\left( \frac{\epsilon_B}{\epsilon_F} \right)_{old} \approx 2,83 \quad \longrightarrow \quad \left( \frac{\epsilon_F}{\epsilon_B} \right)_{new} \approx 1,02$$

Причина расхождения –  
погрешность численных методов



# Заключение

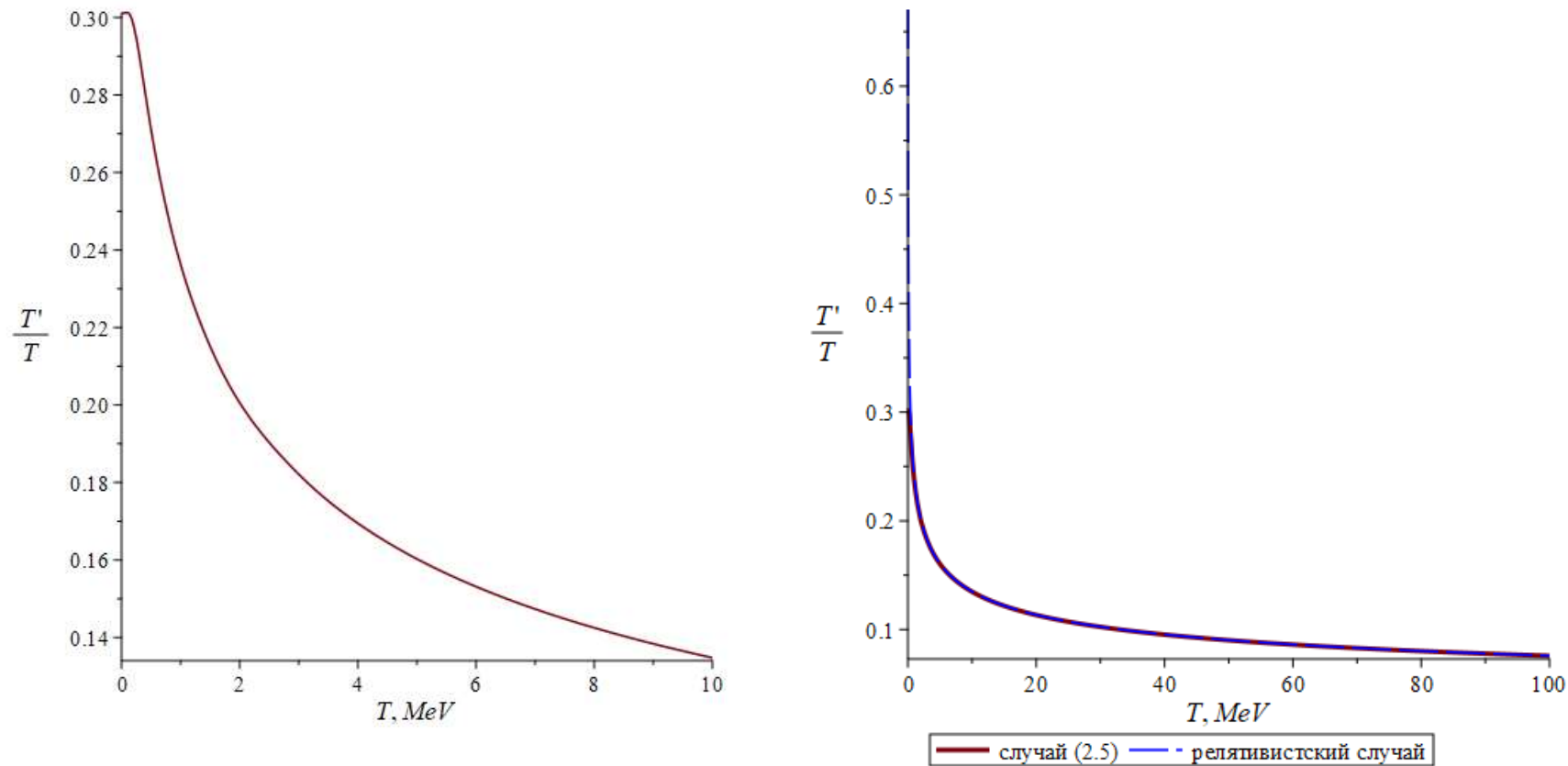
Результаты работы:

1. Получены решения уравнений эволюции для [1] и [2], воспроизведены значения параметров кинетического смешивания.
2. Проведен анализ расхождения данных параметров, в результате чего получена новая оценка параметра смешивания:  
 $\epsilon \approx 8,7 \cdot 10^{-10}$ .
3. Проанализированы источники погрешностей.

Спасибо за внимание!

# Приложение

## 1. Асимптотика решений уравнения эволюции



## 2. Полное выражение для лагранжиана взаимодействия:

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4}(F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} + F'_{\mu\nu}F'^{\mu\nu} + 2\epsilon F_{\mu\nu}F'^{\mu\nu}) - eq_f A_\mu(\bar{f}\gamma^\mu f) - eq_f A'_\mu(\bar{f}'\gamma^\mu f')$$