

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»

УДК 539.12.01

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

**КОСМОЛОГИЧЕСКИЕ ОГРАНИЧЕНИЯ НА ПАРАМЕТР
КИНЕТИЧЕСКОГО СМЕШИВАНИЯ В МОДЕЛЯХ С
ЗЕРКАЛЬНОЙ ТЕМНОЙ МАТЕРИЕЙ**

Научный руководитель

_____ В. Ю. Шаламова

Студент

_____ К. М. Зуев

Москва 2022

Содержание

Введение	3
1 Модель зеркального сектора	3
2 Уравнения, описывающие эволюцию зеркального сектора	3
Заключение	8

Введение

Темная материя — это одна из форм материи, которая по современным расчетам составляет порядка четверти массы-энергии всей Вселенной. Гипотеза о существовании такой формы материи возникла при попытке объяснения проблемы скрытой массы в эффектах аномально высокой скорости вращения внешних областей галактики и гравитационного линзирования.

Одной из моделей, предсказывающих существование темной материи, является так называемая модель зеркальной темной материи. Согласно данной модели, для каждой известной науке элементарной частицы должен существовать «зеркальный» партнер, т.е. частица, обладающая правой спиральностью. Идея состоит в том, чтобы ввести скрытый (зеркальный) сектор частиц и сил, точно дублируя известные частицы и взаимодействия, за исключением того, что в зеркальном секторе спиральность меняется на противоположную. В такой теории зеркальные протоны и ядра — стабильные и массивные, являются отличными кандидатами на роль темной материи.

Простейшей возможностью обнаружить взаимодействие частиц обычного сектора с зеркальным является кинетическое смешивание фотонов и зеркальных фотонов. Лагранжиан такого взаимодействия имеет вид

$$\mathcal{L}_{mix} = \frac{\epsilon}{2} F^{\mu\nu} F'_{\mu\nu}, \quad (1)$$

где ϵ — параметр кинетического смешивания, $F^{\mu\nu} = \partial^\mu A^\nu - \partial^\nu A^\mu$, $F'^{\mu\nu} = \partial^\mu A'^\nu - \partial^\nu A'^\mu$.

Целью настоящей работы является уточнение космологических ограничений на параметр кинетического смешивания частиц наблюдаемого сектора с частицами зеркального сектора. Данная тема является актуальной по состоянию на сегодняшний день. В частности, в экспериментах, посвященных изучению аннигиляции ортопозитрония [1], ожидается, что в случае отсутствия продуктов аннигиляции существует вероятность того, что они перешли в зеркальный сектор. Также интерес представляет расхождение значения параметра смешивания, представленного в [2], со значением, представленным в [3]. Кроме того, коррекция ограничений на параметр кинетического смешивания важна для интерпретации результатов уже проведенных экспериментов в рамках данной тематики, а также для будущих экспериментов.

1 Модель зеркального сектора

В основе модели зеркального вещества лежит, как уже было сказано выше, предположение о том, что помимо нашей Вселенной существует так называемый зеркальный сектор, состоящий из частиц, спиральность которых является, в отличие от наблюдаемых элементарных частиц, правой. Предполагается, что в условиях ранней Вселенной существовала асимметрия между температурой T обычного сектора и температурой T' зеркального сектора. Ограничение отношения данных температур, обусловленное первичным нуклеосинтезом, имеет вид $T'/T \lesssim 0.6$. Кроме того, анализы, базирующиеся на основе численного моделирования космического микроволнового излучения, устанавливают другое его значение: $T'/T \lesssim 0.3$ [2]. Согласно выстраиваемой модели, существует ограничение, что зеркальный сектор не может находиться в состоянии термодинамического равновесия с обычным сектором. В [2] приведена его численная оценка: $\epsilon \lesssim 3 \times 10^{-8}$. В силу данной оценки ожидается, что в результате кинетического смешивания зеркальный сектор будет заполнен с выполнением условия $T' < T$.

Предполагая существование начального условия $T' \ll T$, можно оценить изменение отношения T'/T как функции от ϵ и тем самым проверить совместимость рассматриваемой теории с ограничениями от первичного нуклеосинтеза и космического микроволнового излучения.

2 Уравнения, описывающие эволюцию зеркального сектора

Кинетическое смешивание фотонов может заполнить зеркальный сектор в ранней Вселенной посредством процесса $e^+e^- \rightarrow e'^+e'^-$ перехода электронов и позитронов из обычного сектора в зеркальный. Это приводит к увеличению плотности энергии ρ' в зеркальном секторе, эволюция которой описывается уравнением

$$\frac{\partial \rho'}{\partial t} = n_{e^+} n_{e^-} \langle \sigma v_{Mol} \mathcal{E} \rangle, \quad (2)$$

где \mathcal{E} — энергия, передаваемая зеркальному сектору в процессе, v_{Mol} — скорость Мёллера, $n_{e^+} \simeq n_{e^-} \simeq \frac{3\zeta(3)}{2\pi^2} T^3$.

С учетом массы электрона выражение для концентрации n_{e^-} электронов и позитронов приобретает вид

$$n_{e^+} \simeq n_{e^-} \simeq \frac{1}{\pi^2} \int_{m_e}^{\infty} \frac{\sqrt{E^2 - m_e^2} E}{1 + e^{E/T}} dE. \quad (3)$$

С использованием программного пакета Maple путем численного интегрирования по параметру E построен график зависимости n_{e^-} от температуры T . Данный график представлен на рис. 3. В дальнейшем

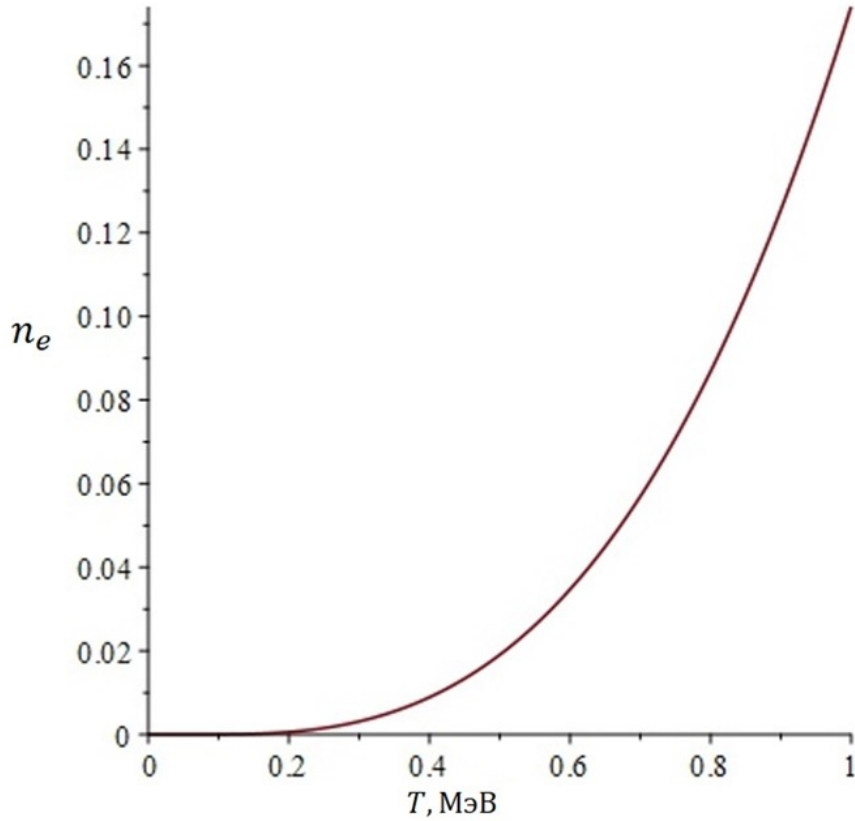


Рис. 1: График зависимости концентрации электронов n_{e^-} от температуры T

в уравнении (2) удобнее перейти к величине ρ'/ρ , чтобы исключить временную зависимость вследствие расширения Вселенной. Используя связь

$$t = 0.3g^{-1/2} \frac{M_{Pl}}{T^2}, \quad (4)$$

где $g = 10.75$ и $M_{Pl} \simeq 1.22 \times 10^{22}$ МэВ, приходим к уравнению:

$$\frac{\partial \rho'/\rho}{\partial T} = \frac{-n_{e^+} n_{e^-} \langle \sigma v_{Mol} \mathcal{E} \rangle 0.6 M_{Pl}}{\pi^2 g T^4 / 30 \sqrt{g} T^3}. \quad (5)$$

Полученное соотношение является основным уравнением, описывающим эволюцию процесса заполнения зеркального сектора.

Рассмотрим теперь величину, характеризующую скорость заполнения зеркального сектора $\langle \sigma v_{Mol} \mathcal{E} \rangle$, учитывая массу электрона. В этом случае выражение для нее приобретает вид

$$\langle \sigma v_{Mol} \mathcal{E} \rangle = \frac{1}{8m_e^4 T^2 K_2^2(m_e/T)} \int_{4m_e^2}^{\infty} ds \sigma (s - 4m_e^2) \sqrt{s} \int_{\sqrt{s}}^{\infty} dE_+ e^{-E_+/T} E_+ \sqrt{\frac{E_+^2}{s} - 1}, \quad (6)$$

где сечение $\sigma = \frac{4\pi}{3} \alpha^2 \epsilon^2 \frac{1}{s^3} (s + 2m_e^2)^2$, $K_2(m_e/T)$ — функция Бесселя 2-го порядка. График данной величины, полученный путем численного построения в программном пакете Maple, представлен на рис. 1.

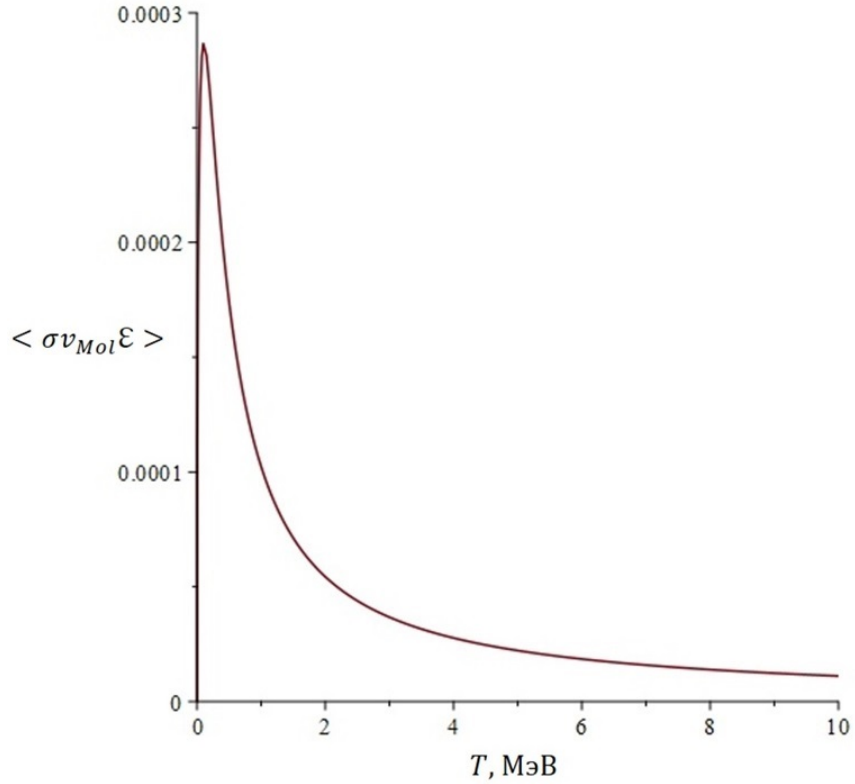


Рис. 2: График зависимости $\langle \sigma v_{Mol} \mathcal{E} \rangle$ от температуры T

Одной из ключевых проблем, решаемых в рамках работы, являлся поиск функции, наиболее точно фитирующую правую часть уравнения (5), поскольку в силу структуры параметра $\langle \sigma v_{Mol} \mathcal{E} \rangle$ данное уравнение нельзя решить аналитически. В результате выбрана фитирующая функция вида

$$F = \sum_{n=1}^{10} (-1)^{n+1} C_n e^{-\beta T} \sqrt{T}, \quad (7)$$

где β и C_n — параметры, подлежащие определению путем приближения к зависимости $\langle \sigma v_{Mol} \mathcal{E} \rangle (T)$. Получившийся график фитирующей функции $F(T)$, сопоставленный с графиком правой части уравнения (5), представлен на рис. 3.

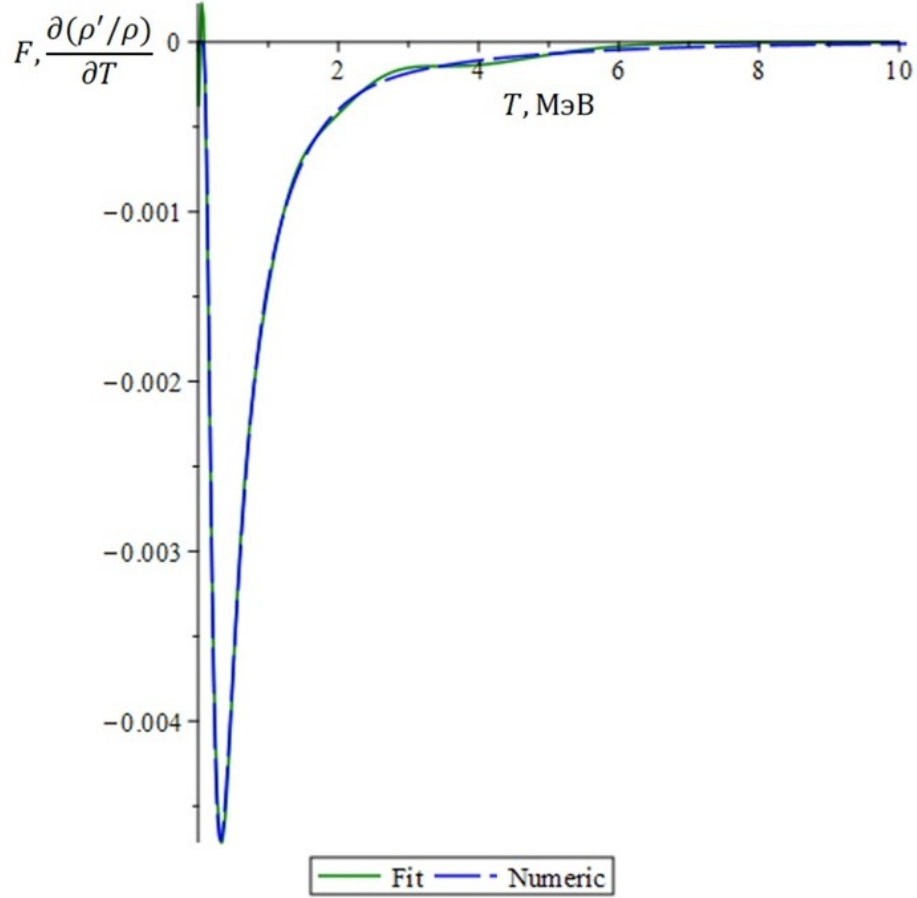


Рис. 3: График зависимости фитирующей функции F и правой части уравнения (5) от температуры T

В рамках работы получено численное решение уравнения (5) с учетом полученной фитирующей функции (7), график которого приведен на рис. 4. Также на данном графике представлена зависимость соотношения ρ'/ρ плотностей зеркального и обычного секторов соответственно для случая пренебрежения массой электрона.

Как уже упоминалось во введении к работе, интерес представляет расхождение значений параметров кинетического смешивания в [2], и [3]. Ранее рассматривались расчеты, приведенные в [2], где значение данного параметра составляет $\epsilon \simeq 8,5 \cdot 10^{-10}$.

Обратимся теперь к результатам, представленным в [3]. Существенным различием является тот факт, что выражение для параметра, отвечающего за скорость заполнения зеркального сектора, имеет иную структуру, чем в [2], в силу того, что усреднение в данном случае ведется по сечению взаимодействия σ и скорости Мёллера v_{Mol} , исключая энергию:

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

где $K_1\left(\frac{\sqrt{s}}{T}\right)$ — функция Бесселя 1-го порядка.

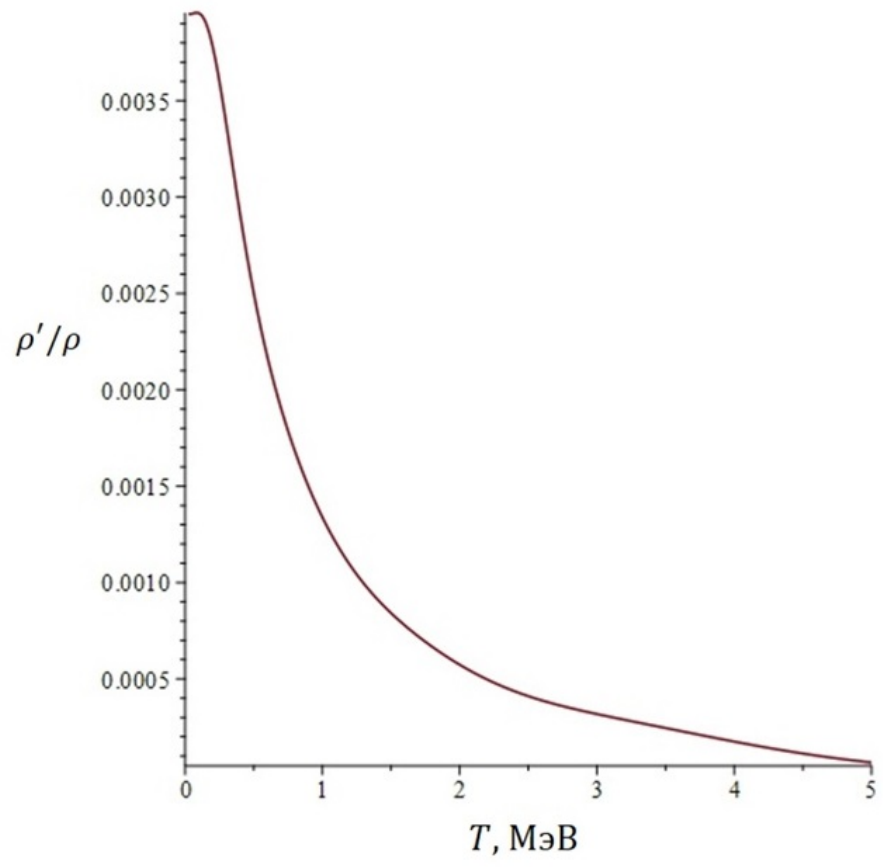


Рис. 4: График зависимости фитирующей функции F и исходной функции $\langle \sigma v_{Mol} \mathcal{E} \rangle$ от температуры T

Как и в предыдущем случае, в рамках работы получен график параметра (8) путем численного построения. Данный график представлен на рис. 5.

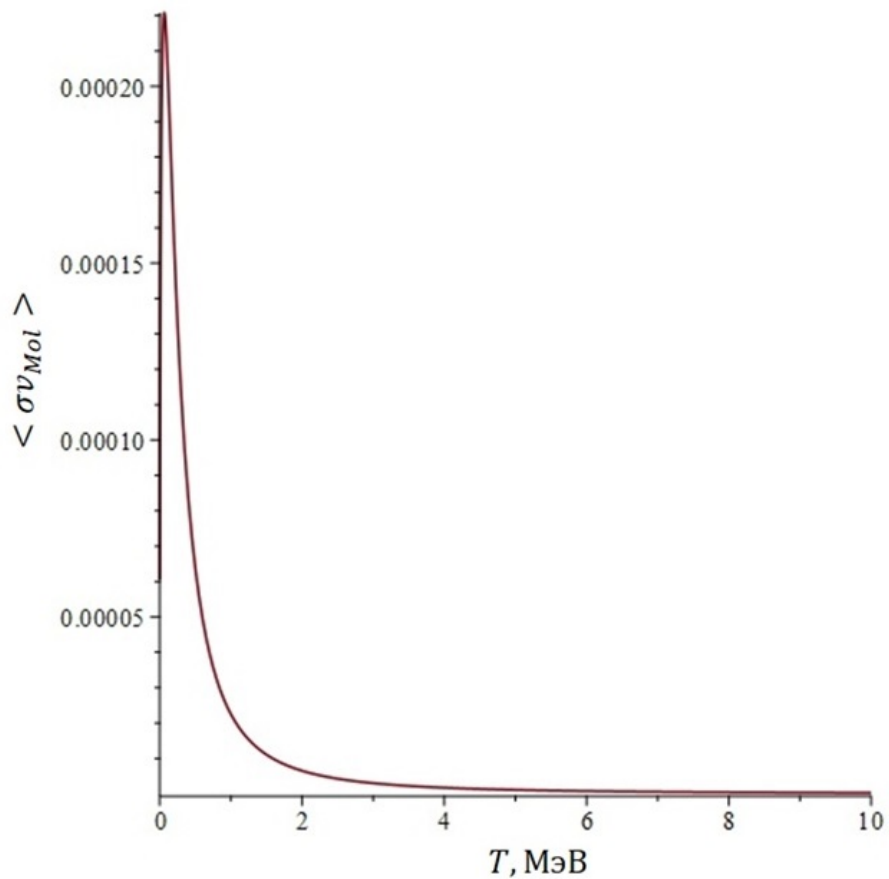


Рис. 5: График зависимости $\langle \sigma v_{Mol} \rangle$ от температуры T

Заключение

Таким образом, в результате работы:

- Найдена фитирующая функция (7) правой части уравнения (5), получен ее график;
- Получено численное решение уравнения эволюции (5) зеркального сектора с учетом массы электрона и его график;
- Построен численный график зависимости $\langle \sigma v_{Mol}(T) \rangle (T)$ [3].

Дальнейшее развитие работы состоит в следующем:

- Численное решение дифференциального уравнения эволюции из [3];
- Поиск параметра кинетического смешивания и сравнение его с полученным на основе рассмотренного материала.
- Получение ограничений на параметр кинетического смешивания для рассмотренной модели зеркальной темной материи.

Список литературы

- [1] L. Gerchow C. Vigo et al. First search for invisible decays of ortho-positronium confined in a vacuum cavity. *Phys. Rev. D* 97, 092008, 3 2018.
- [2] P. Ciarcelluti and R. Foot. Early Universe cosmology in the light of the mirror dark matter interpretation of the DAMA/Libra signal. *Phys.Lett.B*679:278-281, 9 2008.
- [3] Zurab Berezhiani and Angela Lepidi. Cosmological bounds on the "millicharges" of mirror particles. *Phys.Lett.B*681:276-281, 11 2009.