

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 2021

Содержание

Введение	3
1 Основные положения модели зеркального вещества	3
2 Уравнения, описывающие эволюцию зеркального сектора	3
Заключение	6

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.

Одна из теорий, предсказывающих существование темной материи, является так называемая модель зеркальной темной материи. Согласно данной теории, для каждой известной науке элементарной частицы должен существовать "зеркальный" партнер, т.е. частица с правым вращением. 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.

Целью настоящей работы является уточнение космологических ограничений на параметр кинетического смешивания частиц наблюдаемого сектора с частицами зеркального сектора.

Данная тема является актуальной на сегодняшний день. В частности, в экспериментах, посвященных изучению аннигиляции ортопозитрония [2], 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 [3], со значением, представленным в [1].

1 Основные положения модели зеркального вещества

В основе теории 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. Первичный нуклеосинтез предсказывает, что ограничение отношения данных температур имеет вид $T'/T \lesssim 0.6$. Кроме того, анализы, базирующиеся на основе численного моделирования космического микроволнового излучения, устанавливают другое его значение: $T'/T \lesssim 0.3$ [3]. Согласно выстраиваемой теории, существует ограничение, что зеркальный сектор не может находиться в состоянии термодинамического равновесия с обычным сектором. Ученые Карлсон и Глэшоу получили его численную оценку: $\epsilon \lesssim 3 \times 10^{-8}$ [3]. 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 перехода электронов и позитронов из обычного сектора в зеркальный. Это приводит к увеличению плотности энергии ρ' в зеркальном секторе, эволюция которой описывается уравнением

$$\frac{\partial \rho'}{\partial t} = n_{e^+} n_{e^-} \langle \sigma v_{Mol} \mathcal{E} \rangle, \quad (1)$$

где \mathcal{E} — энергия, передаваемая зеркальному сектору в процессе, v_{Mol} — скорость Мёллера,

$$n_{e^+} \simeq n_{e^-} \simeq \frac{3\zeta(3)}{2\pi^2} T^3.$$

В дальнейшем в уравнении (1) удобнее перейти к величине ρ'/ρ , чтобы исключить временную зависимость вследствие расширения Вселенной. Используя связь

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

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

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

Полученное соотношение является основным уравнением, описывающим эволюцию процесса заполнения зеркального сектора. При использовании статистики Максвелла вместо статистики Ферми-Дирака вид уравнения (3) упрощается. Пренебрегая массой электрона в пределе, получим выражение для $\langle \sigma v_{Mol} \mathcal{E} \rangle$ в виде

$$\langle \sigma v_{Mol} \mathcal{E} \rangle = \frac{2\pi\alpha^2\epsilon^2}{3T}, \quad (4)$$

где $\alpha = \frac{1}{137}$ — постоянная тонкой структуры. С учетом данного упрощения уравнение (3) приобретает вид

$$\frac{\partial \rho' / \rho}{\partial T} = \frac{-A}{T^2}, \quad (5)$$

где

$$A = \frac{27\zeta(3)^2\alpha^2\epsilon^2 M_{Pl}}{\pi^5 g \sqrt{g}}. \quad (6)$$

В достаточно хорошем приближении радиационная составляющая зеркального сектора состоит из зеркальных электронов, позитронов и фотонов. Это приводит к значению $g' = 11/2$ и, следовательно, к замене $\rho' / \rho = (g' / g)(T' / T)^4$, где $g' / g = 22/43$.

Видно, что в данном случае уравнение (5) является уравнением с разделяющимися переменными и, следовательно, имеет аналитическое решение, которое описывается формулой

$$\frac{T'}{T} = \left(\frac{g}{g'} A \right)^{1/4} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_i} \right)^{1/4} \quad (7)$$

и является решением краевой задачи $T'(T_i) = 0$.

Одной из задач, решаемых в данной работе, являлось построение графика решения краевой задачи (6). Эта часть работы производилась с использованием программного пакета Maple. График полученного решения представлен на рис.1.

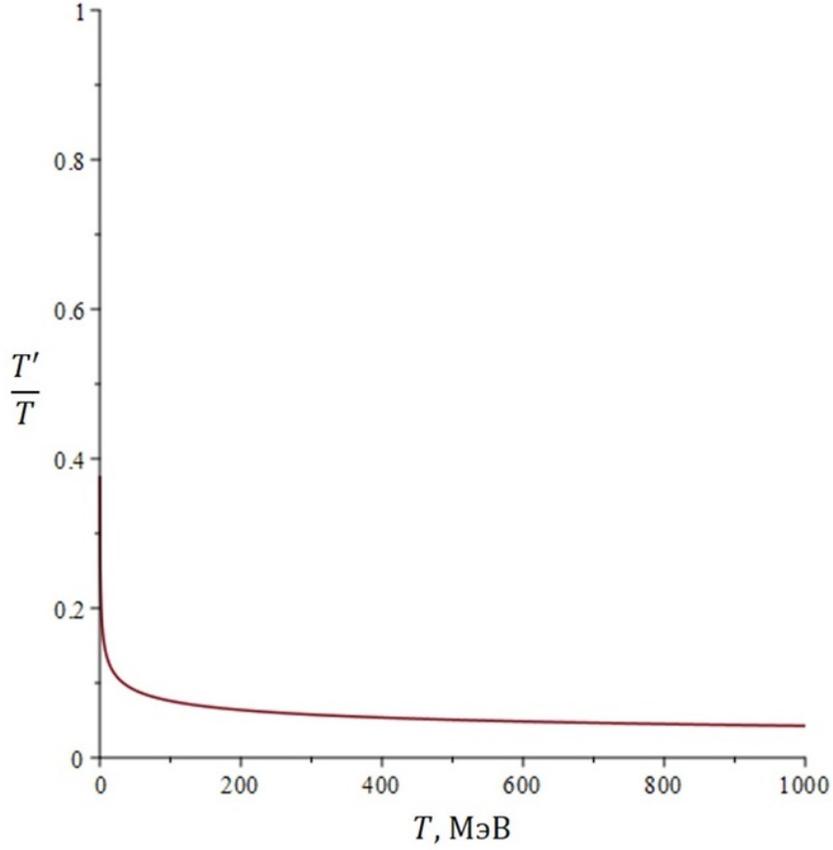


Рис. 1: График зависимости отношения температур в зеркальном и обычном секторах от температуры.

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

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

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.

С использованием программного пакета Maple построен график зависимости $\langle \sigma v_{Mol} \mathcal{E} \rangle$ от температуры T . Данный график представлен на рис. 2.

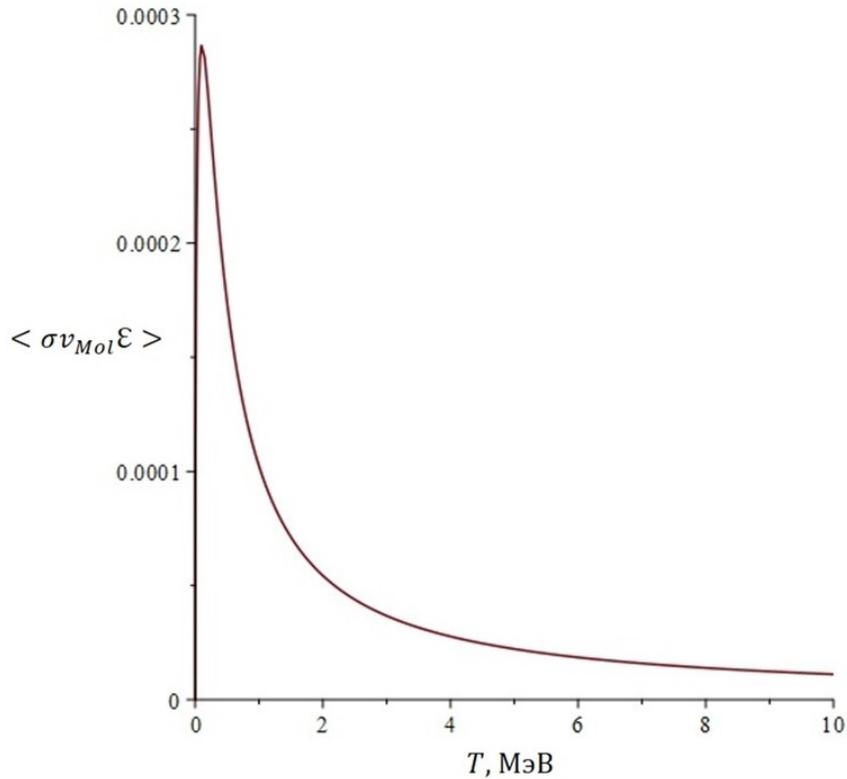


Рис. 2: График зависимости $\langle \sigma v_{Mol} \mathcal{E} \rangle$ от температуры T

Заключение

Таким образом, в результате работы:

- изучен теоретический материал, касающийся модели зеркального вещества для темной материи;
- освоены основные навыки работы в программном пакете компьютерной математики Maple;
- получены аналитическое решение краевой задачи для уравнения эволюции зеркального сектора в случае использования статистики Максвелла в пределе безмассового электрона, его график с помощью программного пакета Maple;
- получен график зависимости $\langle \sigma v_{Mol} \mathcal{E} \rangle$ от температуры T с помощью программного пакета Maple.

Дальнейшее развитие работы состоит в следующем:

- численное решение дифференциального уравнения эволюции с учетом массы электрона;
- получение ограничений на параметр кинетического смешивания для рассмотренной модели;
- изучение других работ по данной тематике, поиск параметра кинетического смешивания и сравнение его с полученным на основе рассмотренного материала.

Список литературы

- [1] Zurab Berezhiani and Angela Lepidi. Cosmological bounds on the "millicharges" of mirror particles. 11 2009.
- [2] L. Gerchow C. Vigo et al. First search for invisible decays of ortho-positronium confined in a vacuum cavity. 3 2018.
- [3] P. Ciarcelluti and R. Foot. Early Universe cosmology in the light of the mirror dark matter interpretation of the DAMA/Libra signal. 9 2008.