

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

РЕФЕРАТ ПО КУРСУ "ВВЕДЕНИЕ В КОСМОМИКРОФИЗИКУ" НА  
ТЕМУ:

ТЕНЕВОЙ МИР С 1 ПОКОЛЕНИЕМ ФЕРМИОНОВ

Преподаватель

М. Ю. Хлопов

Выполнил

Н. М. Левашко

Москва 2020

# Содержание

<b>Содержание</b>	<b>1</b>
<b>Введение</b>	<b>2</b>
<b>1 Рассмотрение модели</b>	<b>3</b>
1.1 Описание модели . . . . .	3
1.2 Инфляция и бариосинтез . . . . .	3
1.3 Нуклеосинтез . . . . .	4
1.4 Рекомбинация . . . . .	5
1.5 Скрытая масса . . . . .	6
<b>Заключение</b>	<b>7</b>
<b>Список литературы</b>	<b>8</b>

# Введение

В 1956 году Ли и Янгом был впервые предложен термин “зеркальная частица” [1]. Они предположили, что при слабых взаимодействиях пространственная четность может не сохраняться. Поэтому для компенсации нарушения  $P$ -четности должны существовать зеркальные частицы. Позже в статье 1966 г. Кобзарева, Окуня и Померанчука [2] была фактически предложена первая модель скрытой массы. В статье [2] было показано, что если существуют “зеркальные” частицы, восстанавливающие  $CP$ - симметрию, то они могут взаимодействовать с обычными частицами только очень слабо: по гравитационному или слабому взаимодействию. Но после открытия  $W$  и  $Z$  бозонов слабое взаимодействие между мирами было исключено.

Предполагается, что в зеркальном мире частицы имеют массу как у обычных частиц, но другой знак  $CP$ -четности. Если состав и строение зеркального мира отличаются от обычного, то мир называется тeneвым. Изучение теории о тeneвом мире представляет интерес для возможного объяснения существования темной материи.

В данной работе будет рассмотрена модель тeneвого мира с 1 поколением фермионов.

# Глава 1

## Рассмотрение модели

### 1.1 Описание модели

В данной модели будет рассмотрен теневой мир с одним поколением фермионов (помимо обычного мира с его тремя поколениями фермионов). Будем считать, что поколение фермионов в зеркальном мире аналогично первому поколению фермионов в реальной, то есть их массы и их соотношения равны. Также будем считать, что переносчики взаимодействий (глюоны, фотоны,  $W$ ,  $Z$ -бозоны) в зеркальном мире аналогичным переносчикам взаимодействий в обычном мире.

### 1.2 Инфляция и бариосинтез

В нашей модели отсутствует какая-либо информация относительно механизмов инфляции и бариосинтеза, поэтому все необходимые условия для описания эволюции Вселенной мы будем вводить по мере их надобности.

В рамках модели хаотической инфляции начальные амплитуды обычных и зеркальных инфлатонов могут быть различными. Предполагается, что в областях, где амплитуда обычных инфлатонов выше, после инфляции должны доминировать обычные частицы, а примесь зеркальных частиц должна быть экспоненциально мала. И наоборот, доминантность зеркальных инфлатонов приводит к незначительной плотности обычных частиц после инфляции. Мы же будем считать, что амплитуды обычных и зеркальных инфлатонов одинаковы, поэтому развитие миров идет параллельно.

В Стандартной Модели нарушение  $CP$ -симметрии вводится с помощью комплексной фазы в матрице смешивания кварков. Необходимым условием для этого является существование трех поколений кварков. В данной модели теневого мира одно поколение, поэтому либо  $CP$ -симметрия не нарушается, либо существует механизм  $CP$ -нарушения, отличающийся от данного механизма в Стандартной Модели.

Известно, что в нашем мире барионное число  $B > 0$ . В нашей модели для теневого мира предполагается, что  $B_s > 0$ .

Предполагается, что обычный и теневой мир имеют разную космологическую эволюцию. В частности, что они никогда не были в равновесии друг с другом. Концентрация барионов в теневом мире не совпадает с концентрацией барионов в нашем мире. Чтобы наличие теневого мира не повлияло на первичный нуклеосинтез в обычном мире, оба сектора должны иметь различные начальные условия формирования:

- 1 после Большого взрыва два сектора были рождены с двумя разными температурами,  $T_s < T_0$
- 2 взаимодействие между секторами слабое, термодинамическое равновесие не устанавливается
- 3 оба сектора расширяются адиабатически

## 1.3 Нуклеосинтез

Число поколений фермионов дает вклад в полную космологическую плотность Вселенной, что в свою очередь влияет на соотношение нейтронов и протонов в момент первичного нуклеосинтеза, а данное соотношение влияет на концентрацию первичного гелия.

Соотношение между концентрацией нейтронов и протонов даётся следующей формулой:

$$\frac{n_n}{n_p} = e^{-\frac{\Delta m}{T}}, \quad (1.1)$$

где  $\Delta m = 1.3$  МэВ разница масс нейтрона и протона,  $T$  - температура Вселенной.

Данное отношение определяется температурой закалки нейтронов  $T^*$

$$T^* \approx \frac{(kG)^{\frac{1}{6}}}{G_F^{\frac{2}{3}}}, \quad (1.2)$$

где  $G_F$  - константа Ферми,  $G$  - гравитационная постоянная,  $k$  - статистический фактор, характеризующий плотность Вселенной:

$$k = 1 + \sum_{bosons} \frac{g_s}{2} \left(\frac{T^*}{T}\right)^4 + \frac{7}{8} \sum_{fermions} \frac{g_s}{2} \left(\frac{T^*}{T}\right)^4, \quad (1.3)$$

где  $g_s$  - количество спиновых состояний,  $T$  - температура фотонной компоненты,  $T = T^*$ .

Таким образом, для  $k$  получаем:

$$k_s = 1 + \frac{7}{8} \left(2 + \frac{1 * 2 * 1}{2}\right) = 3.625, \quad (1.4)$$

Значения в обычном мире для 3-х поколений фермионов  $k_o = \frac{43}{8}$ ,  $(\frac{n_n}{n_p})_o = \frac{1}{7}$  [3]. Тогда:

$$\left(\frac{n_n}{n_p}\right)_s = \exp\left(-\frac{\Delta m}{T_o} \left(\frac{k_o}{k_s}\right)^{\frac{1}{6}}\right) = \left(\frac{n_n}{n_p}\right)_o \left(\frac{k_o}{k_s}\right)^{\frac{1}{6}} \approx 0.125, \quad (1.5)$$

Большинство нейтронов переходят в  ${}^4\text{He}$ . Образование более тяжелых ядер не происходит. Оценим долю первичного теневого гелия:

$$(Y_p)_s = \frac{\rho_{He}}{\rho_B} = \frac{2 * (\frac{n_n}{n_p})_s}{1 + (\frac{n_n}{n_p})_s} \approx 0.22, \quad (1.6)$$

Чтобы оценить влияние теневого мира на обычный необходимо учитывать общий фактор:

$$k = k_o + \left(\frac{T_s}{T}\right)^4 k_s,$$

$$k = 1 + \frac{7}{8} * \left(2 + \frac{3 * 2 * 1}{2}\right) + 0.9^4 + \frac{7}{8} * 0.9^4 \left(2 + \frac{1 * 2 * 1}{2}\right) \approx 7.75,$$

в котором отношение температур  $T_s/T$  для теневого мира считаем равным 0,9.

Отношение температур закалки в обычном мире и мире, предполагаемом в нашей модели:

$$\frac{T_o^*}{T_m^*} = \left(\frac{k_o}{k}\right)^{\frac{1}{6}} \approx 0.94,$$

Тогда нейтрон-протонное соотношение для обычного мира в нашей модели:

$$\left(\frac{n_n}{n_p}\right)_m = \exp\left(-\frac{\Delta m}{T_o} \left(\frac{k_o}{k}\right)^{\frac{1}{6}}\right) = \left(\frac{n_n}{n_p}\right)_o \left(\frac{k_o}{k}\right)^{1/6} \approx 0.16 \quad (1.7)$$

Доля первичного гелия в таком случае:

$$(Y_p)_m = \frac{2 * \left(\frac{n_n}{n_p}\right)_m}{1 + \left(\frac{n_n}{n_p}\right)_m} \approx 0.28 \quad (1.8)$$

Экспериментально полученное значение доли гелия  $Y_p = 24.9 + / - 1.8\%$ . Полученный результат для нашей модели не входит в данный предел, однако путем подбора температуры теневого мира этой проблемы можно избежать. Например, при  $T_s/T = 0.7$  доля гелия уже входит в доверительный интервал.

Теперь определим влияние обычного мира на долю первичного теневого гелия. Начнем также с определения фактора  $k$ .

$$k = \left(\frac{T}{T_s}\right)^4 k_o + k_s,$$

$$k = 1.11^4 + \frac{7}{8} * 1.11^4 * \left(2 + \frac{3 * 2 * 1}{2}\right) + 1 + \frac{7}{8} * \left(2 + \frac{1 * 2 * 1}{2}\right) \approx 11.82,$$

здесь отношение температур  $T_s/T$  для теневого мира считаем также равным 0,9.

Для отношения температур закалки получаем:

$$\frac{T_o^*}{T_{ms}^*} = \left(\frac{k_o}{k}\right)^{\frac{1}{6}} \approx 0.877,$$

Тогда нейтрон-протонное соотношение для теневого мира в нашей модели:

$$\left(\frac{n_n}{n_p}\right)_{ms} = \exp\left(-\frac{\Delta m}{T_o} \left(\frac{k_o}{k}\right)^{\frac{1}{6}}\right) = \left(\frac{n_n}{n_p}\right)_o^{\left(\frac{k_o}{k}\right)^{1/6}} \approx 0.182 \quad (1.9)$$

И для доли первичного теневого гелия имеем:

$$(Y_p)_{ms} = \frac{2 * \left(\frac{n_n}{n_p}\right)_{ms}}{1 + \left(\frac{n_n}{n_p}\right)_{ms}} \approx 0.31 \quad (1.10)$$

При уменьшении температуры теневого мира, доля теневого гелия будет расти. Например, при  $T_s/T = 0.7$  доля гелия составит уже 0,36.

## 1.4 Рекомбинация

В данной модели в теновом мире происходит рекомбинация преимущественно водорода, так как при данном соотношении температур  $T_s/T = 0.9$  он составляет большую часть. Однако данный состав довольно легко изменить путем варьирования температуры теневого мира. Рекомбинация будет происходить в несколько этапов:

$$1 \text{ } He^{++} + e^- \rightarrow He^+ + \gamma, \text{ происходит на } z \approx 6000 \text{ [4]}$$

$$2 \text{ } He^+ + e^- \rightarrow He + \gamma, \text{ происходит на } z \approx 2000 \text{ [4]}$$

$$3 \text{ } p^+ + e^- \rightarrow H + \gamma, \text{ происходит на } z \approx 1400 \text{ [5]}$$

Рекомбинация теневого гелия и теневого водорода в данной модели задает тип скрытой массы, реализуемый в нашем случае. Так как скрытая масса представляет из себя не бесстолкновительный газ, то масштаб энергии скрытой массы - это прежде всего энергия ионизации, а не энергия самих частиц. Энергия ионизации гелия составляет  $\Delta_{He} = 24.6$  [6], водорода -  $\Delta_H = 13.6$  [5]. Эти величины определяют космологический сценарий скрытой массы, частицами которой может быть как теновый гелий, так и теновый водород. Таким образом, в нашем случае реализуется случай горячей скрытой массы.

## 1.5 Скрытая масса

Наличие теневого мира не может объяснить существование всей темной материи, так как, если предположить, что плотность вещества в двух мирах одинакова, то

$$\Omega_{DM} \approx 22\% > \Omega_{OM} \approx \Omega_{SM} \approx 4\%,$$

где  $\Omega_{DM}$ ,  $\Omega_{OM}$ ,  $\Omega_{SM}$  – вклад темной материи, обычной материи или теневой материи в плотность энергии Вселенной. Чтобы как-то обойти это несоответствие, можно увеличить плотность барионов теневого мира в  $w$  раз :

$$w = \frac{\Omega_{DM}}{\Omega_{SM}},$$

В этом случае возможно образование целых зеркальных звезд или зеркальных планет. Обнаружить такие объекты можно по эффекту микролинзирования. Так как наш зеркальный мир представляет собой горячую скрытую массу, то формирование структур там идет от большего к меньшему, сначала образовались галактики, потом внутри них образуются звезды, а сами галактики образуют скопления. Согласно [7] образование звезд возможно как в момент рекомбинации, так и позже, в галактическом диске. Эволюция теневых звезд может происходить быстрее (вплоть до 30 раз быстрее), чем эволюция звезд с такой же массой в нашем мире [8]. И таким образом частые вспышки теневых сверхновых подогревают невидимое вещество в галактиках, в результате чего оно образует сферическое гало, в отличие от обычного вещества, формирующего диск. Так, найденные в гало по микролинзированию невидимые объекты МАСНО с массами 0.2 — 0.9 массы Солнца подходят на роль зеркальных звезд, но их количества не достаточно, чтобы объяснить всю темную материю.

# Заключение

В данной работе была рассмотрена возможность существования теневого мира с одним поколением фермионов. Оценена доля первичного гелия в теновом мире. Исходя из результатов, получено, что для того, чтобы обеспечить существование однородной смеси обычного и зеркального вещества температура теневого мира должна быть меньше температуры обычного мира.

Была рассмотрена модель, в которой теневой мир используется как кандидат в темную материю. При одинаковых вкладах обычного и теневого мира это невозможно, однако если увеличить плотность барионов в теновом мире в несколько раз, то такое предположение становится возможным.

# Список литературы

1. T. D. Lee and C. N. Yang, Phys. Rev. 104 (1956) 254.
2. Kobzarev, L. Okun and I. Pomeranchuk, Sov. J. Nucl. Phys. 3 (1966) 837.
3. Хлопов М.Ю., «Основы космомикрoфизики», М.:УРСС, 2004,2010.
4. Switzer E. R., Hirata C. M. Primordial helium recombination. III. Thomson scattering, isotope shifts, and cumulative results // Physical Review D. — 2008. — Vol. 77, no. 8. — P. 083008.
5. Рубаков В.А., Горбунов Д.С, "Введение в теорию ранней Вселенной: Теория горячего Большого взрыва 2008
6. Extreme ultraviolet frequency comb metrology / D. Z. Kandula [et al.] // Physical Review Letters. — 2010. — Vol. 105, no. 6. — P. 063001.
7. R. Foot, "Mirror dark matter: Cosmology, galaxy structure and direct detection", Int. J. Mod. Phys. A, 29, 1430013 (2014)
8. Z. Berezhiani, P. Ciarcelluti, S. Cassisi, A. Pietrinferni, "Evolutionary and structural properties of mirror star MACHOs", Astropart. Phys 24 (2006) 495
9. Okun L.B. "Problems related to the violation of CP invariance (Sect. V: Mirror symmetry and mirror particles)"Sov. Phys. Usp. 11 462 (1969)
10. Foot R "Have mirror planets been observed?"Phys. Lett. B 471 191 (1999); Foot R astro-ph/9908276
11. Foot R "Have mirror stars been observed?"Phys. Lett. B 452 83 (1999); Foot R astro-ph/9902065
12. Bell N. F., Volkas R. R. "Mirror matter and primordial black holes"Phys. Rev. D 59 107301 (1999)