

# РЕФЕРАТ

Зеркальный мир с  $m_p = m_n$

Серафима Нечаева

# Содержание

<b>1</b>	<b>Введение</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Описание модели Зеркального Мира <math>m_p = m_n</math></b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Следствия на микроуровне</b>	<b>3</b>
3.1	Нуклон-нуклонное взаимодействие в Зеркальном Море . . . . .	3
3.2	Стабильность атомных ядер . . . . .	3
<b>4</b>	<b>Ранние стадии эволюции Вселенной</b>	<b>4</b>
4.1	Инфляция . . . . .	4
4.2	Бариосинтез . . . . .	5
<b>5</b>	<b>Нуклеосинтез</b>	<b>5</b>
5.1	Закалка нейтронов. Нейтрон-протонное соотношение . . . . .	5
5.2	Начало нуклеосинтеза. Концентрация гелия-4. . . . .	6
<b>6</b>	<b>Эпоха рекомбинации</b>	<b>6</b>
<b>7</b>	<b>Состав Вселенной Зеркального Мира</b>	<b>7</b>
<b>8</b>	<b>Заключение</b>	<b>7</b>

# 1 Введение

Одной из моделей, описывающих природу скрытой массы, является Зеркальный Мир. В этой модели каждой частице Стандартной модели приписывается зеркальный партнер. В данной модели рассматривается Зеркальный Мир с равными массами зеркальных протонов и зеркальных нейтронов.

## 2 Описание модели Зеркального Мира $m_p = m_n$

Рассмотрим модель Зеркального Мира, в которой каждой частице Стандартной Модели ставится в соответствие зеркальный партнер.

Предполагается, что Зеркальный Мир взаимодействует с Обычным только с помощью гравитационного взаимодействия, остальные взаимодействия в Зеркальном мире заменяются на аналогичные зеркальные, переносчиками которых являются зеркальные партнеры соответствующих частиц Обычного мира. В результате мы получаем следующий набор зеркальных элементарных частиц:

- зеркальный бозон Хиггса;
- 12 калибровочных бозонов (зеркальные  $W^\pm$  и  $Z$  бозоны, а также 9 зеркальных глюонов);
- 3 поколения зеркальных кварков (в каждом поколении по одному кварку с зарядом  $+\frac{2}{3}e$  и  $-\frac{1}{3}e$ );
- 3 поколения зеркальных лептонов (в каждом поколении заряженный зеркальный лептон с зеркальным зарядом  $-e$  и зеркальное нейтрино)

Далее предполагаем, что все параметры зеркальных частиц совпадают с соответствующими параметрами частиц в Обычном Мире, кроме масс зеркальных  $u$  и  $d$  кварков, а именно, здесь предполагается, что:

$$m_{u_M} = m_{d_M} \quad (1)$$

Одним из следствий (1) является то, что в рамках данной модели Зеркального Мира, в отличие от модели Обычного Мира, нейтрон является стабильной частицей.

Подобные партнеры частиц в Обычном Мире называются зеркальными, а соответствующий мир называется Зеркальным, потому что предполагается, что для зеркальных партнеров эффекты нарушения CP-симметрии совпадают по величине с эффектами нарушения для обычных частиц, но имеют обратный знак, тем самым восстанавливая симметрию между «левым» и «правым».

### 3 Следствия на микроуровне

Условие (1) вносит существенные коррективы в параметры адронов. Ниже приведены некоторые из следствий:

- массы зеркальных протонов и нейтронов равны, нейтрон становится стабильной частицей;
- массы заряженных и незаряженных  $\pi$ -мезонов становятся также одинаковыми.

Равенство масс заряженных и нейтральных пионов приводит к тому, что исключается мода распада:  $\pi^\pm \longrightarrow e^\pm \nu_e \pi^0$  (так называемый «пионный бета-распад»). При этом заряженный пион не становится стабильной частицей из-за высокой вероятности лептонных мод распада [1], на которую подобное равенство масс не оказывает существенного влияния.

Далее изменения на микроуровне могут оказывать влияние на многие аспекты ядерной физики Зеркального Мира, в частности, на энергию связи ядер. Однако эти детали требуют более подробного исследования.

#### 3.1 Нуклон-нуклонное взаимодействие в Зеркальном Мире

В связи с равенством масс нуклонов, должна возникнуть большая симметрия в нуклон-нуклонном взаимодействии, которая не может не сказаться на энергиях связи зеркальных ядер.

#### 3.2 Стабильность атомных ядер

Энергия связи ядер  $E_b$  в Обычном Мире рассчитывается с помощью полуэмпирической формуле Вайцзеккера [2], в основе которой лежит капельная модель ядра:

$$E_b = a_V A + a_S A^{2/3} + a_C \frac{Z(Z-1)}{A^{1/3}} + a_A \frac{(A-2Z)^2}{A} + \delta(N, Z), \quad (2)$$

где коэффициенты  $a_V$ ,  $a_S$ ,  $a_C$ ,  $a_A$  и  $\delta$  определяются эмпирически.

Разность энергий связи зеркальных ядер  ${}^A_ZX$  и  ${}^A_{Z+1}Y$  при этом:

$$\Delta E_b = E_b(Z+1, N-1) - E_b(Z, N) = a_C \frac{2Z}{A^{1/3}} + a_A \frac{4(A-2Z-1)}{A} - 2\delta(N, Z) \quad (3)$$

Таким образом, только на основании формулы Вайцзеккера невозможно сделать вывод о возможных закономерностях стабильности ядер в Зеркальном Море с  $m_n = m_p$ .

Однако, как было упомянуто ранее, нейтрон является стабильной частицей, что исключает его  $\beta$ -распад. На основании этого можно сделать предположение о  $\beta$ -стабильности ядер в Зеркальном Море.

## 4 Ранние стадии эволюции Вселенной

Одной из задач данной модели является обеспечение достаточной плотности скрытой массы, исходя из предположения, что она будет состоять из зеркального вещества, а следовательно, потребуется обеспечить достаточное количество зеркальных (анти-)барионов.

Другой задачей модели является объяснение наличия барионной асимметрии в Обычном Море. Предполагается, что в целом во Вселенной отсутствует барионная асимметрия, однако, она будет присутствовать и в Обычном, и в Зеркальном Море, взаимно компенсируя друг друга. Далее будут рассмотрены механизмы, при помощи которых можно достичь требуемых условий.

### 4.1 Инфляция

В рамках модели современной космологии полагается, что после планковской эпохи происходит этап инфляции, во время которого происходит экспоненциальное расширение пространства [3]. Выбранная модель физики элементарных частиц на данный момент недостаточно широка, чтобы подробно описать этап инфляции, однако, можно сделать некоторые предположения относительно температур зеркального и обычного вещества после завершения инфляции, которые бы обеспечили достаточную плотность зеркального вещества, способную объяснить наличие скрытой массы за счет него.

## 4.2 Бариосинтез

Одним из следующих этапов эволюции является бариосинтез. На этапе бариосинтеза происходит формирование зеркальных барионов и разделение лептонов и барионов.

В рамках данной модели можно сделать предположение о том, что на этапе бариосинтеза также происходит разделение зеркального и обычного вещества, то есть заканчиваются осцилляции между зеркальными и обычными барионами. Данные осцилляции, при неравновесном протекании могут приводить к генерации избытка зеркальных барионов, обеспечивая тем самым барионную асимметрию как в Обычном, так и в Зеркальном Мире.

## 5 Нуклеосинтез

### 5.1 Закалка нейтронов. Нейтрон-протонное соотношение

Закалка нейтронов:



Закалка нейтронов происходит, когда удовлетворяется условие  $T \geq \Delta m, m_e$ , то есть  $T \geq 0.5$  МэВ.

Концентрация частиц  $A$  в химическом равновесии при температуре  $T \ll m_A$  описывается формулой [4]:

$$n_A = g_A \left( \frac{m_A T}{2\pi} \right)^{3/2} e^{\frac{\mu_A - m_A}{T}} \quad (5)$$

Запишем далее отношение концентраций зеркальных нейтронов и зеркальных протонов;  $g_n = g_p = 2$ , поскольку зеркальные протоны и нейтроны имеют по 2 спиновых состояния,  $\mu_p = \mu_n$  [4]. В рассматриваемой модели зеркального мира  $\Delta m \equiv m_n - m_p = 0$ , следовательно:

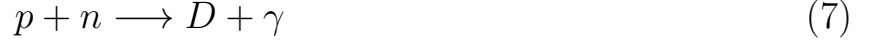
$$\frac{n_n}{n_p} = e^{-\frac{m_n - m_p}{T_n}} = e^{-\frac{\Delta m}{T_n}} = 1 \quad (6)$$

То есть концентрации зеркальных протонов и зеркальных нейтронов равны ( $n_n = n_p$ ). Так как зеркальные протоны и нейтроны в свободном состоянии стабильны, то

данное соотношение в дальнейшем меняться не будет.

## 5.2 Начало нуклеосинтеза. Концентрация гелия-4.

Образование зеркального вещества будет происходить при помощи реакций, аналогичным образованию обычного вещества, и будет начинаться с образования зеркального дейтерия [4]:



Далее следуют реакции:

- $D(p, \gamma) {}^3\text{He}$ ,  $D(D, n){}^3\text{He}$ ,  $D(D, p)\text{T}$  – реакции, подготавливающие образование  ${}^4\text{He}$
- $\text{T}(D, n){}^4\text{He}$ ,  ${}^3\text{He}(D, p){}^4\text{He}$  – образование  ${}^4\text{He}$

Концентрацию зеркального гелия  ${}^4\text{He}$   $Y_p^M$  среди зеркального барионного вещества можно оценить исходя из известного протон-нейтронного отношения [5]:

$$Y_p^M \simeq \frac{2n_n/n_p}{1 + n_n/n_p} = 100\% \quad (8)$$

Таким образом, подавляющую часть зеркального вещества в данной модели составляет  ${}^4\text{He}$ .

## 6 Эпоха рекомбинации

В данной Зеркальной Вселенной происходит рекомбинация не  ${}^1\text{H}$ , как в нашей Вселенной, а рекомбинация гелия  ${}^4\text{He}$ , поскольку  $Y_p \sim 1$ , т.е. подавляющая часть барионного вещества в Зеркальном Мире на момент рекомбинации представлена зеркальным гелием-4.

Рекомбинация гелия происходит раньше рекомбинации водорода и делится на два этапа:

1.  $\text{He}^{++} + e^- \longrightarrow \text{He}^+ + \gamma$  – этот процесс происходит при  $z \simeq 6000$  [6];
2.  $\text{He}^+ + e^- \longrightarrow \text{He} + \gamma$ , красное смещение при этом:  $z \simeq 2000$  [7].

## 7 Состав Вселенной Зеркального Мира

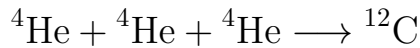
Рассмотри формирование космологических объектов, формирующихся из зеркального вещества. Эти объекты в рассматриваемой модели взаимодействуют с космологическими объектами Обычного Мира гравитационно.

Материалом для зеркальных космологических объектов является зеркальный гелий-4, а также более тяжелые зеркальные химические элементы.

Так как подавляющую часть барионного вещества к моменту завершения рекомбинации составляет  ${}^4\text{He}$ , предположим существование звезд с ядром из зеркального гелия-4. Первой реакцией нуклеосинтеза в подобных зеркальных звездах будет синтез бериллия-8:



Оценивая энергию связи бериллия-8 по формуле Вайцеккера для для обычного вещества, можно получить  $E_b({}^8\text{Be}) \simeq 57$  МэВ. Однако это ядро является  $\alpha$  - нестабильным, следовательно, первой реакцией должно стать образование углерода-12:



Который, в свою очередь, в Обычном Море является стабильным, из чего можно сделать предположение о стабильности и зеркального углерода-12. Далее, наиболее выгодным будет образование ядер  ${}^{4A}_{2Z}\text{X}$ .

Другой формой существования зеркального вещества являются газовые скопления  ${}^4\text{He}$ . Подобные скопления в гало галактик из обычного вещества могут объяснять наличие скрытой массы во Вселенной при условии достаточной плотности.

## 8 Заключение

В рамках данной работы была рассмотрена модель Зеркального мира с равными массами зеркальных протонов и зеркальных нейтронов. Зеркальное вещество рассматривается как кандидат в скрытую материю.

В ходе работы было выяснено, что в подобном мире наблюдаются следующие закономерности:

- Массы зеркальных протонов и нейтронов равны;
- Массы нейтральных и заряженных зеркальных пионов равны;



- Большую часть зеркального вещества составляет гелий-4;
- Далее по распространенности вещества после гелия-4 следуют ядра с параметрами  ${}^A_ZX$ .

Предполагается, что зеркальный гелий-4 в данной модели будет основным кандидатом на роль скрытой массы, выполняя при этом роль холодной темной материи.

## Список литературы

1. Review of Particle Physics, Prog. Theor / P. collaboration [et al.] // Exp. Phys. — 2020. — Vol. 2020. — P. 083C01.
2. *Фраунфельдер Г., Хенли Э.* Субатомная физика: пер. с англ. — Мир, 1979.
3. *Вайнберг С.* Космология // М.: УРСС. — 2013.
4. *Горбунов Д. С., Рубаков В. А.* Введение в теорию ранней Вселенной. — 2009.
5. BIG-BANG NUCLEOSYNTHESIS / K. Nakamura [et al.] // new physics. —. — Vol. 4. — P. 7.
6. *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.
7. *Switzer E. R., Hirata C. M.* Primordial helium recombination. I. Feedback, line transfer, and continuum opacity // Physical Review D. — 2008. — Vol. 77, no. 8. — P. 083006.