

РЕФЕРАТ

Зеркальный мир с $m_p = m_n$

Серафима Нечаева

Содержание

1	Введение	2
2	Описание модели Зеркального Мира $m_p = m_n$	2
3	Следствия на микроуровне	3
3.1	Общие закономерности	3
3.2	Стабильность атомных ядер	3
4	Ранние стадии эволюции Вселенной	4
4.1	Инфляция	4
4.2	Бариосинтез	5
5	Нуклеосинтез	5
5.1	Закалка нейтронов. Нейтрон-протонное соотношение	5
5.2	Начало нуклеосинтеза. Концентрация гелия-4.	6
5.3	Концентрация свободных нуклонов после закалки	6
6	Эпоха рекомбинации	7
7	Состав Вселенной Зеркального Мира	7
8	Заключение	8

1 Введение

Одной из моделей, описывающих природу скрытой массы, является Зеркальный Мир. Первой теоретической работой в этом направлении была работа Ли и Янга [1], которая была опубликована в 1956 году.

В данной работе рассматривается модель Зеркального Мира, где каждой частице Стандартной модели приписывается зеркальный партнер, при этом накладывается условие, что массы зеркальных протонов и зеркальных нейтронов равны. Далее будут рассмотрены основные закономерности, проявляющиеся в такой Вселенной.

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:

$$m_{u_M} = m_{d_M} \tag{1}$$

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 СР-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

3.1 Общие закономерности

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 π -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 [2], 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.

3.2 Стабильность атомных ядер

Энергия связи ядер E_b в Обычном Мире рассчитывается с помощью полуэмпирической формуле Вайцзеккера [3], 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 δ определяются эмпирически.

Используя формулу Вайцеккера, можно оценить равновесное количество протонов в ядре, которое соответствует максимуму энергии связи:

$$Z_0 = \frac{a_A A}{2(a_C A^{\frac{2}{3}} + a_A)} \quad (3)$$

β^+ -распад становится возможным при $Z > Z_0$, а также требуется, чтобы разность масс конечного и начального ядер должна быть выше двух масс электрона, что составляет 1022 кэВ.

Таким образом, ${}^4\text{He}$ является β^+ -стабильным. Позитронный распад будет наблюдаться у ядер с достаточно большим по сравнению с ${}^4\text{He}$ числом нуклонов в ядре, например ${}^{10}\text{C}$, ${}^{20}\text{Na}$, ${}^{25}\text{Al}$ и т.д.

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 Мире. Предполагается, что в целом во Вселенной отсутствует барионная асимметрия, однако, она будет присутствовать и в Обычном, и в Зеркальном Мире, 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 [4]. 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 [5]. 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:

$$p + e \longleftrightarrow n + \nu_e \quad (4)$$

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 [6]:

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

Запишем далее отношение концентраций зеркальных нейтронов и зеркальных протонов; $g_n = g_p = 2$, поскольку зеркальные протоны и нейтроны имеют по 2 спиновых состояния, $\mu_p = \mu_n$ [6]. В рассматриваемой модели зеркального мира $\Delta m \equiv m_n - m_p = 0$, следовательно:

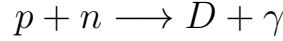
$$\frac{n_n}{n_p} = e^{-\frac{m_n - m_p}{T_n}} = e^{-\frac{\Delta m}{T_n}} = 1 \quad (6)$$

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 [6]:



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 ${}^4\text{He}$

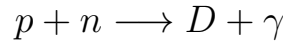
Концентрацию зеркального гелия ${}^4\text{He}$ Y_p^M среди зеркального барионного вещества можно оценить исходя из известного протон-нейтронного отношения [7]:

$$Y_p^M \simeq \frac{2n_n/n_p}{1 + n_n/n_p} = 100\% \quad (7)$$

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

5.3 Концентрация свободных нуклонов после закалки

Оценим концентрацию свободных зеркальных нейтронов и протонов после закалки. Для этого нужно проанализировать реакцию образования дейтерия:



Сечение образования дейтерия можно оценить следующим образом [6]:

$$\langle \sigma v \rangle \sim \frac{\alpha}{m_\pi^2} \simeq \frac{1}{137} \frac{1}{(200 \text{ МэВ})^2} = 2 \cdot 10^{-18} \frac{\text{см}^3}{\text{с}} \quad (8)$$

Конечная концентрация протонов может быть найдена следующим образом:

$$\begin{cases} \frac{dn_p}{dt} = -n_p n_n < \sigma v > \\ n_p(0) = 6.5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3} \end{cases} \quad (9)$$

Концентрация протонов (и нейтронов) после закалки: $n_p(t_{NS} - t_n) = n_n = 75 \text{ см}^{-3}$

Таким образом доля зеркальных протонов (и нейтронов), оставшихся в свободном состоянии, составляет:

$$X_p^M = \frac{n_p(t_{NS} - t_n)}{n_p(0)} = 1.15 \cdot 10^{-18} \quad (10)$$

6 Эпоха рекомбинации

В данной Зеркальной Вселенной происходит рекомбинация не ^1H , как в нашей Вселенной, а рекомбинация гелия ^4He , поскольку $Y_p \sim 1$, т.е. подавляющая часть барионного вещества в Зеркальном Мире на момент рекомбинации представлена зеркального 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 $z \simeq 6000$ [8];
2. $\text{He}^+ + e^- \longrightarrow \text{He} + \gamma$, красное смещение при этом: $z \simeq 2000$ [9].

Рекомбинация зеркального гелия-4 в данной модели задает масштаб крупномасштабной структуры скрытой массы, роль которой выполняет гелий. Энергия ионизации гелия составляет $E_{4\text{He}} = 24.6 \text{ эВ}$ [10]; эта величина определяет космологический сценарий скрытой массы, роль которой выполняет зеркальный гелий. Таким образом, частицы ^4He , составляющие подавляющую часть зеркального вещества, являются частицами горячей скрытой массы [11].

7 Состав Вселенной Зеркального Мира

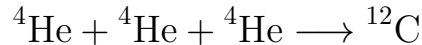
Рассмотрим формирование космологических объектов, формирующихся из зеркального вещества. Эти объекты в рассматриваемой модели взаимодействуют с космологическими объектами Обычного Мира гравитационно.

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 Вайцзеккера для для обычного вещества, можно получить $E_b({}^8\text{Be}) \simeq 57$ МэВ. Однако это ядро является α - нестабильным, следовательно, первой реакцией должно стать образование углерода-12:



Который, в свою очередь, в Обычном Мире 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 ${}^{4A}_{2Z}\text{X}$.

Предполагается, что зеркальный гелий-4 в данной модели будет основным кандидатом на роль скрытой массы, выполняя при этом роль горячей темной материи [11].

Список литературы

1. *Lee T.-D., Yang C.-N.* Question of parity conservation in weak interactions // *Physical Review*. — 1956. — Vol. 104, no. 1. — P. 254.
2. Review of Particle Physics, Prog. Theor / P. collaboration [et al.] // *Exp. Phys.* — 2020. — Vol. 2020. — P. 083C01.
3. *Фрауэнфельдер Г., Хенли Э.* Субатомная физика: пер. с англ. — Мир, 1979.
4. *Вайнберг С.* Космология // М.: УРСС. — 2013.
5. *Bento L., Berezhiani Z.* Leptogenesis via collisions: leaking lepton number to the hidden sector // *Physical review letters*. — 2001. — Vol. 87, no. 23. — P. 231304.
6. *Горбунов Д. С., Рубаков В. А.* Введение в теорию ранней Вселенной. — 2009.
7. BIG-BANG NUCLEOSYNTHESIS / K. Nakamura [et al.] // *new physics*. —. — Vol. 4. — P. 7.
8. *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.
9. *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.
10. Extreme ultraviolet frequency comb metrology / D. Z. Kandula [et al.] // *Physical Review Letters*. — 2010. — Vol. 105, no. 6. — P. 063001.
11. Structure formation with cold+ hot dark matter / A. Klypin [et al.] // *arXiv preprint astro-ph/9305011*. — 1993.