

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

**РЕФЕРАТ
ПО КОСМОМИКРОФИЗИКЕ**

ЗЕРКАЛЬНЫЙ МИР

$$m_p - m_e < m_n < m_p$$

Выполнила

Студентка группы М21-115
М. А. Рахимова

Москва 2022

Содержание

1	Введение	2
2	Физические свойства зеркального мира с $m_p - m_e < m_n < m_p$	3
3	Влияние модели на космологические процессы	3
3.1	Инфляция и бариосинтез	3
3.2	Нуклеосинтез	6
4	Образование зеркальных структур	8
5	Заключение	10
	Список используемых источников	11

1 Введение

В 1956 году была опубликована статья Ли и Янга "Question of Parity Conservation in Weak Interactions" [1], в которой рассматривалось нарушение Р-четности в слабых взаимодействиях и были предложены идеи экспериментов для обнаружения данного эффекта.

Одна из идей заключалась в измерении углового распределения электронов, вылетающих в результате β -распада поляризованных ядер. В 1957 году соответствующий эксперимент был проведен [2]. Было получено, что зеркальное отражение этого процесса приводит к процессу с противоположным поляризации ядер предпочтительным направлением вылета электронов, что подтвердило нарушение Р-четности.

Помимо этого, Ли и Янгом в статье [1] была рассмотрена вытекающая из Р-нарушения теоретическая проблема — неэквивалентность лево- и право-ориентированных систем координат.

Данная проблема заключалась в том, что Р-преобразование нарушающего Р-четность процесса приводило к несуществующему в природе процессу. Для восстановления эквивалентности Ли и Янг выдвинули теорию о существовании зеркальных партнеров частиц. Такое предположение означало взаимную замену обычных частиц и их зеркальных партнеров при Р-преобразовании.

На основе предложенной Ландау, Ли и др. теории о строгом сохранении СР-четности, на роль зеркальных партнеров были выдвинуты античастицы. Однако данное предположение было опровергнуто экспериментальным обнаружением СР-нарушения в распадах K^0 -мезонов [3].

В 1966 году И. Ю. Кобзарев, Л. Б. Окунь и И. Я. Померанчук показали, что зеркальные частицы не могут взаимодействовать с частицами обычного мира посредством сильного и электрослабого взаимодействия. Кроме гравитационного взаимодействия между обычными и зеркальными частицами, существуют и другие возможности, такие как смешивание обычных и зеркальных фотонов [4], переход между обычным левым нейтрино и зеркальным правым [5] и др.

2 Физические свойства зеркального мира

$$с\ m_p - m_e < m_n < m_p$$

В данной работе предполагается эквивалентность механизмов генерации барионного избытка в обычном и зеркальном мире. В таком случае из-за того, что CP-нарушающие эффекты зеркальных партнеров должны иметь противоположный обычным знак, должен наблюдаться избыток зеркальных античастиц по сравнению с зеркальными частицами. Однако в следствие отсутствия электрослабых и сильных взаимодействий между зеркальными и обычными частицами в данной модели имеется свобода выбора знака барионного числа. [6] Тогда можно условиться, что в зеркальном мире также наблюдается избыток барионов по отношению к антибарионам.

Рассматриваемая модель предполагает следующее соотношение масс барионов:

$$m_p - m_e < m_n < m_p$$

Так как нейтрон в данной модели является самым легким, его распад запрещен законом сохранения энергии. Рассмотрим также распад протона:

$$p \rightarrow n + e^+ + \nu$$

Такой процесс также невозможен в виду соотношения масс: $m_p < m_e + m_n$.

Таким образом, в рассматриваемой модели и нейтрон, и протон являются стабильными частицами.

3 Влияние модели на космологические процессы

3.1 Инфляция и бариосинтез

Наличие зеркальной материи само по себе не решает проблем старого сценария горячей Вселенной. Таким образом, необходимо сделать дополнительные предположения о космологических процессах и оценить влияние модели на их протекание.

В качестве модели инфляции примем модель хаотической инфляции [7], предполагающую возможность различных амплитуд обычных и зеркальных инфлатонов. Такое предположение приводит к образованию доменной структуры в распределении обычного и зеркального вещества [8].

Будем предполагать симметричность начальных условий для обычных и зеркальных частиц. Таким образом получим, что за исключением областей очень больших зеркальных доменов релятивистские зеркальные и обычные частицы присутствуют в одинаковых количествах и имеют одинаковую температуру. Значит в ранней Вселенной необходимо учитывать вклад от обоих видов материи в общую плотность.

Оценим влияние наличия зеркальной материи на температуру закалки, при которой нарушается термодинамическое равновесие между нейтронами и протонами.

Термодинамическое равновесие нарушается в момент, когда характерное время слабого взаимодействия τ становится больше космологического времени t . Это соответствует моменту, когда скорость расширения Вселенной начинает превышать скорость процессов слабого взаимодействия.

Характерное время слабого взаимодействия можно вычислить следующим образом:

$$\tau = \frac{1}{n\sigma v}, \quad (1)$$

где n — концентрация электрон-позитронных пар, σv — скорость их взаимодействия с нейтрино.

На RD-стадии концентрация электрон-позитронных пар в зависимости от температуры определяется выражением:

$$n = \frac{4\zeta(3)T^3}{\pi^2} \quad (2)$$

Сечение слабого взаимодействия:

$$\sigma \sim G_F^2 T^2, \quad (3)$$

G_F — константа Ферми.

Скорость раширения Вселенной:

$$H \sim \frac{\sqrt{g_*} T^2}{m_{Pl}}, \quad (4)$$

g_* — число ультрарелятивистских степеней свободы

Число ультрарелятивистских степеней свободы:

$$g_* = 2 + \frac{7}{8} \cdot 4 + \frac{7}{8} \cdot 2 \cdot 3 = \frac{43}{4} \quad (5)$$

Комбинируя формулы (1)-(5), придём к зависимости температуры закалки от числа ультрарелятивистских степеней свободы:

$$T \sim \frac{g_*^{\frac{1}{6}}}{(G_F^2 m_{Pl})^{\frac{1}{3}}} \quad (6)$$

Подставляя численные значения, получим оценку темпаратуры закалки $T \sim 1$ МэВ. Подставляя это значение в уравнение Саха, можно получить отношение числа нетронов к числу протонов на момент закалки.

$$\frac{n_n}{n_p} = \left(\frac{m_n}{m_p} \right)^{\frac{3}{2}} \exp \left(-\frac{m_n - m_p}{T} \right) \quad (7)$$

Учтем вытекающие из массового соотношения ограничения на разность масс протона и нейтрона:

$$0 < m_p - m_n < 0.5 \text{ МэВ} \quad (8)$$

$$\left(\frac{m_n}{m_p} \right)^{\frac{3}{2}} \approx 1 \quad (9)$$

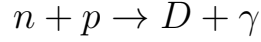
Таким образом получим диапазон допустимых значений отношения числа нейтронов к числу протонов:

$$1 < \frac{n_n}{n_p} < 1.65 \quad (10)$$

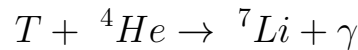
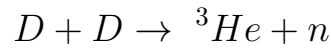
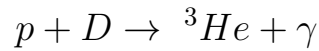
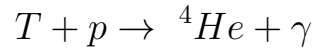
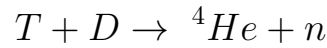
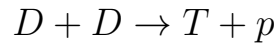
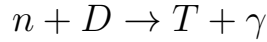
Полученный результат говорит о том, что в рамках рассматриваемой модели будет наблюдаться избыток зеркальных нейтронов. Также здесь важно вспомнить, что и протоны, и нейтроны в модели являются стабильными, поэтому в дальнейшем это соотношение меняться не будет.

3.2 Нуклеосинтез

В процессе нуклеосинтеза в результате термоядерных реакций нейтронов с протонами образуются сначала ядра дейтерия:



В дальнейшем происходят реакции образования более тяжелых ядер:



Определим первичный химический состав зеркального вещества. Массовую долю гелия можно оценить по следующей формуле:

$$X_{\text{He}} = \frac{m_{\text{He}} \cdot n_{\text{He}}}{m_p(n_p + n_n)} \quad (11)$$

$$\frac{m_{\text{He}}}{m_p} \approx 4 \quad (12)$$

Поскольку протоны и нейтроны являются стабильными в данной модели, их концентрации не изменяются со временем. Благодаря высокой скорости образования дейтерия и гелия, предположим, что практически все протоны перешли в ${}^4\text{He}$.

$$n_{\text{He}} = 0.5n_p \quad (13)$$

$$X_{\text{He}} = \frac{2}{\frac{n_n}{n_p} + 1} \quad (14)$$

Откуда получаем, что $0.75 < X_{\text{He}} < 1$.

Массовая доля свободных нейтронов может быть посчитана следующим образом:

$$X_n = \frac{n_n - n_p}{n_n + n_p} \quad (15)$$

Таким образом, получим, что $0 < X_n < 0.25$

Отсутствие стабильных ядерных состояний с атомным номером $A = 5$ создает почти непроходимый барьер для дальнейших ядерных превращений первичного нуклеосинтеза. Таким образом, первичный химический состав зеркального вещества — это в основном стабильные нейтроны и ядра гелия.

Однако так как Вселенная расширяется, не все протоны могли быть захвачены ядрами дейтерия с последующим образованием гелия. Оценим концентрацию свободных протонов. Для этого найдем сначала температуру, при которой происходит нуклеосинтез. Её можно оценить из следующего соотношения:

$$X_D(T_{NS}) \approx \eta_B \left(\frac{2.5T_{NS}}{m_p} \right)^{\frac{3}{2}} e^{\frac{\Delta_D}{T_{NS}}} \sim 1, \quad (16)$$

где $\eta_B \sim 10^{-9}$ — барион-фотонное отношение;

$\Delta_D = 2$ МэВ — энергия связи дейтерия.

Подставив числовые значения, получим оценку:

$$T_{NS} \approx 60 \text{кэВ} \quad (17)$$

Концентрация протонов на момент нуклеосинтеза в таком случае:

$$n_p = \eta_B \frac{2\zeta(3)}{\pi^2} T_{NS}^3 \approx 4 \cdot 10^{18} \text{см}^{-3} \quad (18)$$

Оценим скорость реакции $n + p \rightarrow D + \gamma$.

$$\Gamma_{p(n\gamma)D} = n_p \cdot (\sigma v) \approx 0.24 \text{с}^{-1}, \quad (19)$$

где $(\sigma v) \approx 6 \cdot 10^{-20} \frac{\text{см}^3}{\text{с}}$ — сечение реакции.

Полученное значение скорости реакции значительно превышает темп расширения Вселенной при температуре нуклеосинтеза.

$$H(T_{NS}) = \frac{1.66 T_{NS}^2 \sqrt{g_*}}{M_{\text{Pl}}} \approx 3.5 \cdot 10^{-3} \text{с}^{-1} \quad (20)$$

Концентрация свободных протонов определяется выражением:

$$n_p(t_{NS}) = n_p(0) \cdot e^{-n_n(\sigma v)t_{NS}}, \quad (21)$$

где $t_{NS} = \frac{1}{2H(T_{NS})} \approx 142c$

Окончательно определим массовую долю свободных протонов, которые могут образовывать атомы водорода:

$$X_p = \frac{n_p(t_{NS})}{n_p(0) + n_n} = \frac{e^{-n_n(\sigma v)t_{NS}}}{1 + \frac{n_n}{n_p(0)}} \quad (22)$$

Подставив числовые значения, получим верхнюю и нижнюю оценки массовой доли свободных протонов: $10^{-22} < X_p < 10^{-15}$.

4 Образование зеркальных структур

Из проведенных оценок результатов нуклеосинтеза вытекает вывод, что в рамках данной модели будут образовываться звезды, состоящие из нейтронов и гелия. В таких звездах в результате реакций горения гелия и последующего захвата α -частиц будут образовываться $N\alpha$ -элементы. В дальнейших реакциях горения этих элементов могут образовываться ядра, отличающиеся по своему нуклонному составу от ядер обычного мира.

Оценим возможность протекания β -распадов некоторых ядер. Полуэмпирическая формула Вайцеккера для энергии связи ядра:

$$E_{cb} = \alpha A - \beta A^{\frac{2}{3}} - \gamma Z^2 A^{-\frac{1}{3}} - \delta(A - 2Z)^2 A^{-1} + \xi A^{-\frac{1}{2}}, \quad (23)$$

где $\alpha = 15.67$ МэВ, $\beta = 17.21$ МэВ, $\gamma = 0.75$ МэВ, $\delta = 93.2$ МэВ, ξ для чётно-чётных ядер = 12 МэВ, ξ нечётно-нечётных = -12 МэВ, ξ нечётных = 0 .

β^+ -распад $(A, Z) \rightarrow (A, Z - 1) + e^+ + \nu$ является энергетически выгодным при выполнении следующего условия:

$$M_{(A,Z)} - M_{(A,Z-1)} > 2m_e \quad (24)$$

$$m_p - m_n - E_{cb(A,Z)} + E_{cb(A,Z-1)} > 2m_e \quad (25)$$

Взяв верхнюю границу разности масс протона и нейтрона $m_p - m_n \approx m_e$, получим условие возможности протекания β^+ -распада:

$$\gamma(2Z - 1)A^{-\frac{1}{3}} + 4\delta(2Z - A - 1)A^{-1} - 2\xi A^{-\frac{1}{2}} > m_e \quad (26)$$

Аналогично для β^- -распада:

$$-\gamma(2Z + 1)A^{-\frac{1}{3}} + 4\delta(A - 2Z - 1)A^{-1} - 2\xi A^{-\frac{1}{2}} > 3m_e \quad (27)$$

Используя полученные выражения, можно сделать вывод о том, что ядра со значительным избытком нуклонов могут испытывать β -распады. В рамках данной модели расчет предсказывает β -радиоактивность всех изотопов углерода, кроме ^{12}C и ^{13}C , для азота — кроме ^{14}N и ^{15}N .

5 Заключение

В данной работе была рассмотрена модель зеркального мира с отношением масс нуклонов $m_p - m_e < m_n < m_p$. Были установлены следующие свойства зеркального мира:

- Зеркальные нейтроны и протоны являются стабильными частицами.
- Наблюдается избыток зеркальных нейтронов по сравнению с зеркальными протонами. Диапазон допустимых значений отношения числа нейтронов к числу протонов:

$$1 < \frac{n_n}{n_p} < 1.65$$

- Первичный химический состав зеркального вещества — это нейтроны и ядра гелия со следующими массовыми долями:

$$0.75 < X_{He} < 1$$

$$0 < X_n < 0.25$$

- При температуре нуклесинтеза скорость реакции $n + p \rightarrow D + \gamma$ значительно превышает темп расширения Вселенной, поэтому концентрация свободных протонов очень низкая. Массовая доля свободных протонов лежит в пределах:

$$10^{-22} < X_p < 10^{-15}$$

- Образовываются звёзды, состоящие из нейтронов и гелия. В таких звёздах в результате реакций горения гелия и последующего захвата α -частиц рождаются $N\alpha$ -элементы. В дальнейших реакциях горения этих элементов могут образовываться ядра, отличающиеся по своему нуклонному составу от ядер обычного мира.
- Зеркальные ядра со значительным избытком нуклонов могут испытывать β -распады.

Список используемых источников

1. *Lee T. D., Yang C. N.* Question of Parity Conservation in Weak Interactions // Phys. Rev. — 1956. — Oct. — Vol. 104, issue 1. — P. 254–258.
2. *Wu C. S.* [et al.]. Experimental Test of Parity Conservation in Beta Decay // Phys. Rev. — 1957. — Feb. — Vol. 105, issue 4. — P. 1413–1415.
3. *Christenson J.* [et al.]. Evidence for the 2π decay of the K_2^0 meson // Phys. Rev. — 1964. — July. — Vol. 13. — P. 138–140.
4. *Okun L. B.* On a search for mirror particles // preprint ИТЕР. — 1983. — Vol. 149.
5. *Зельдович Я., Хлопов М.* Масса нейтрино в физике элементарных частиц и космологии ранней Вселенной // УФН. — 1981. — Vol. 135. — P. 45–77.
6. *Хлопов М. Ю.* Основы космомикрoфизики. — 2011.
7. *Linde A.* Chaotic inflation // Physics Letters B. — 1983. — Vol. 129, no. 3. — P. 177–181. — ISSN 0370-2693.
8. *Дубрович В., Хлопов М.* О доменной структуре теневой материи // Астрон. журн. — 1989. — Vol. 66. — P. 232.