

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	4
3.1	Инфляция и бариосинтез . . . . .	4
3.2	Нуклеосинтез . . . . .	6
4	Образование зеркальных структур	8
5	Скрытая масса	10
6	Заключение	11
	Список используемых источников	12

# 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  $\beta$ -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

$$\text{с } m_p - m_e < m_n < m_p$$

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.

Свойства остальных частиц Стандартной Модели (СМ) обычного мира в данной модели предполагаются такими же. В данной модели предполагается, что инфляция и бариосинтез проходили идентично в обычном и зеркальном мире, их отличие станет существенно на стадии нуклеосинтеза.

Вопрос о зеркальных нейтрино выходит за рамки данной работы и будет рассмотрен в дальнейшем.

## 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.

На начальных этапах развития Вселенной, по аналогии с обычным миром, предполагается избыток зеркальных кварков над антикварками. Таким образом, после зеркального КХД фазового перехода образуется некоторое количество избыточных зеркальных нуклонов, образующих зеркальное вещество.

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  $\tau$  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,  $\sigma v$  — 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 расширения 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 температуры закалки  $T \sim 1$  МэВ. Подставляя это значение в уравнение Саха, можно получить отношение числа нейтронов 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:

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

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

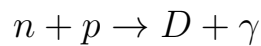
Таким образом получим диапазон допустимых значений отношения числа нейтронов к числу протонов:

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

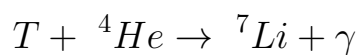
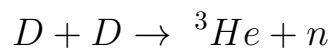
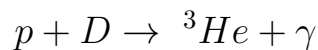
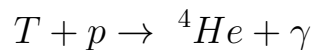
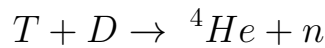
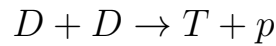
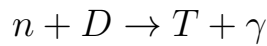
Полученный результат говорит о том, что в рамках рассматриваемой модели будет наблюдаться избыток зеркальных нейтронов. Также здесь важно вспомнить, что и протоны, и нейтроны в модели являются стабильными, поэтому в дальнейшем это соотношение меняться не будет.

## 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:

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

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

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  ${}^4He$ .

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

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

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

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

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  $\alpha$ -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  $\beta$ -распадов некоторых ядер. Полуэмпирическая формула Вайцеккера для энергии связи ядра:

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

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

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

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

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

Взяв верхнюю границу разности масс протона и нейтрона  $m_p - m_n \approx m_e$ , получим условие возможности протекания  $\beta^+$ -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  $\beta^-$ -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  $\beta$ -распады. В рамках данной модели расчет предсказывает  $\beta$ -радиоактивность всех изотопов углерода, кроме  $^{12}\text{C}$  и  $^{13}\text{C}$ , для азота — кроме  $^{14}\text{N}$  и  $^{15}\text{N}$ .

Также были рассмотрены изотопы более тяжелого элемента — урана. Оказалось, что в рамках данной модели и  $^{235}\text{U}$ , и  $^{238}\text{U}$ , как и в обычном мире, испытывают  $\beta^-$ -распады, но не испытывают  $\beta^+$ .

## 5 Скрытая масса

Кандидатами в скрытую массу (ТМ) в рамках рассматриваемой модели будут зеркальные барионы. Для объяснения всей скрытой массы мы можем сделать предположение о том, что плотность зеркальных барионов будет в 5 раз больше плотности обычных. В таком случае можно описать механизмы образования зеркальной ТМ и провести соответствующие оценки.

Исходя из оценок массовых долей, проведенных в разделе, посвященном нуклеосинтезу, основной вклад в ТМ будут давать зеркальные нейтроны и зеркальный гелий.

Газ зеркальных нейтронов будет взаимодействовать с ядрами гелия по сильному взаимодействию. Здесь нужно оценить скорости взаимодействия зеркальных нейтронов между собой и нейтронов с ядрами гелия. Необходимо проверить передачу энергии и импульса в столкновениях нейтронов с гелием. Если скорость передачи энергии и импульса больше, чем скорость расширения Вселенной, то устанавливается равновесие.

Зеркальный гелий также будет вести себя, как газ. При температуре рекомбинации зеркального гелия будут образовываться нейтральные атомы He, на которые не будут действовать силы давления излучения. Как только зеркальный гелий становится нейтральным, остаются только зеркальные нейтроны и атомы зеркального гелия. При этом отцепляется нерелятивистская компонента от зеркального излучения и начинает играть роль ТМ с масштабами структуры, определяемыми моментом рекомбинации гелия.

Описанную методику расчетов планируется реализовать в следующем семестре.

## 6 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  $\alpha$ -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  $\beta$ -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  $2\pi$  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 ITEP. — 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 космомикрофизики. — 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.