

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

## РЕФЕРАТ

Зеркальный мир с  $m_n < m_p - m_e$

Выполнил: Р. В. Николаенко  
Группа: М22-115  
Преподаватель: М. Ю. Хлопов

Москва 2023

## Содержание

<b>Введение .....</b>	<b>3</b>
<b>Описание модели .....</b>	<b>4</b>
<b>Эволюция ранней Вселенной.....</b>	<b>5</b>
Механизм инфляции .....	5
Механизм бариосинтеза .....	6
<b>Некоторые отдельные следствия модели.....</b>	<b>8</b>
Масса $\pi$ -мезонов .....	8
Связанное состояние ( $nn$ ) .....	8
<b>Образование галактик и звезд.....</b>	<b>8</b>
<b>Кандидат на роль темной материи .....</b>	<b>10</b>
<b>Заключение.....</b>	<b>10</b>
<b>Список использованных источников .....</b>	<b>11</b>

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Стандартная Модель (СМ), построенная на группе симметрий  $SU(3) \times SU_L(2) \times U_Y(1)$  для описания сильного и электрослабого взаимодействий, оказалась весьма устойчивой к попыткам обнаружить экспериментально явления, прямо нарушающие её. Возможным указанием на наличие новой физики является сверхточное измерение аномального магнитного момента мюона [1]. Если не считать трудности с выводом некоторых свойств КХД из первых принципов (например, межкварковый потенциал, рождение глюболов, статические свойства адронов), единственным незавершённым сектором Стандартной Модели является квантовая гравитация. На данный момент не существует согласованной теории квантовой гравитации, равно как и чёткого представления о том, что представляет собой тёмная (или скрытая) материя и тёмная энергия. Примечательным космофизическим наблюдением является и само существование Вселенной: то факт, что наблюдаемая Вселенная состоит из материи означает наличие барионной асимметрии, которое не следует из СМ.

В некоторых теориях для компенсации асимметрии наблюдаемых частиц вводят так называемый «зеркальный мир», гипотетический скрытый сектор новых частиц и взаимодействий. Ещё в 1956 году Т. Д. Ли и Ч. Н. Янг обсуждали [2] возможность существования зеркальных партнёров наблюдаемых частиц. Было предположено, что в случае существования нарушения Р-чётности (зеркального преобразования координат), то есть лево-правой асимметрии, у известных частиц, то, возможно, есть и «зеркальные» частицы-партнёры с противоположной асимметрией, так что общая симметрия сохраняется.

Лишь годом позже нарушение Р-чётности действительно было обнаружено на опыте Ч. Ш. Ву в  $\beta$ -распаде кобальта  $^{60}\text{Co}$  [3]. После открытия нарушения СР-четности в 1964 году (С – зарядовое сопряжение) стало ясно, что зеркальными партнерами не могут быть античастицы [4]. В 1966 году И. Ю. Кобзарев, Л. Б. Окунь и И. Я. Померанчук [5] показали, что зеркальные частицы не могут участвовать в электромагнитном и сильном взаимодействии с обычными частицами, так как это приводило бы к увеличению числа состояний электрона в атоме и другим эффектам, не обнаруженным в эксперименте. С открытием W- и Z-бозонов стало ясно, что зеркальные частицы не могут участвовать и в слабом взаимодействии. Ширины массивных бозонов согласуются с предсказаниями СМ, следовательно, между обычными и зеркальными частицами не может быть слабого взаимодействия. Тем не менее, зеркальные частицы могут, в принципе, участвовать в гравитационном взаимодействии.

Таким образом, имеем следующее представление о наборе зеркальных частиц:

$$(O) \equiv \begin{pmatrix} \nu \\ e \\ W \\ Z \\ \gamma \\ q \\ g \end{pmatrix}_O \rightarrow (M) \equiv \begin{pmatrix} \nu \\ e \\ W \\ Z \\ \gamma \\ q \\ g \end{pmatrix}_M, \quad (1)$$

где индекс «О» обозначает обычные частицы (ordinary), а «М» - зеркальные (mirror). Зеркальные частицы обладают своими сильным, слабым и электромагнитным взаимодействиями, а гравитация является главным способом взаимодействия для обычных и зеркальных частиц.

Единственным «мостом» между обычными и зеркальными частицами может быть нейтральная частица с ненулевой массой (возможное кинетическое смешивание фотонов не учитывается). Если нейтрино имеет массу, и имеет место смешивание обычного и зеркального нейтрино, то именно оно может стать этим «мостом», то есть через реакции с участием нейтрино обычные частицы могут превращаться в зеркальные и обратно, за счет чего возможно наблюдать зеркальные частицы на опыте. Пока такого смешивания не обнаружено.

В работе С. И. Блинникова и М. Ю. Хлопова [6] показано, что наличие зеркального мира с массами частиц и константами связи своих, «зеркальных» взаимодействий, такими же, как в СМ, привело бы к противоречию с экспериментальными данными. Поэтому в моделях зеркального мира разумно использовать предположения о некоторых отличиях от мира обычных частиц. В моделях зеркальных миров, отличных от наших, роль скрытой могут играть некоторые зеркальные частицы и даже астрономические объекты из зеркальных частиц.

В данной работе рассматривается модель зеркального мира, в котором  $m_n < m_p - m_e$ .

## 2. ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

В модели рассматривается одно поколение частиц. Массы зеркальных лептонов и антилептонов в этой модели аналогичны массам в СМ. Массы нейтрино много меньше масс лептонов и кварков. За наличие массы частиц отвечает механизм Хиггса. Зеркальные частицы могут взаимодействовать с обычными частицами с помощью гравитационного взаимодействия. Единственным отличием зеркальной модели является различие масс кварков. Для количественных оценок в модели используются определённые массы протонов и нейтрона:

$$(m_n)^M = (m_p)^O = 938.272 \text{ МэВ}, \quad (m_p)^M = (m_n)^O = 939.565 \text{ МэВ}, \quad (2)$$

где верхние индексы «М» и «О» по-прежнему обозначают частицы зеркального и обычного мира соответственно. Зеркальные протоны и нейтроны с такими массами могут появиться, если в Стандартной Модели поменять массы  $u$  и  $d$  кварков или, что то же самое, поменять их электрические заряды:

$$(m_u)^M = (m_d)^O = 4.8 \text{ МэВ}, \quad (m_d)^M = (m_u)^O = 2.3 \text{ МэВ}, \quad (3)$$

$$(q_u)^M = (q_d)^O = -\frac{1}{3}, \quad (q_d)^M = (q_u)^O = \frac{2}{3}. \quad (4)$$

В мире с такими кварками первого поколения, несомненно, в той или иной степени изменится картина взаимодействия адронов, но в работе рассматриваются следствия с точки зрения протонов и нейтронов, что позволяет оценить влияния модели на эволюцию Вселенной.

Масса электрона остаётся неизменной:

$$(m_e)^M = (m_e)^O = 0.511 \text{ МэВ}. \quad (5)$$

Масса «зеркального» протона оказывается меньше массы нейтрона и, соответственно, разность масс протона и нейтрона положительна:  $\Delta m_{p-n} > m_e$ . Таким образом, «зеркальный» нейтрон является стабильной частицей, а «зеркальный» протон - нестабильной. Он распадается путем спонтанного  $\beta$ -распада:  $p \rightarrow n + e^+ + \nu_e$ . Время жизни протона можно оценить по формуле:

$$\tau_p \sim \frac{1}{G_F^3 \Delta m_{p-n}^5} \approx 900 \text{ секунд}. \quad (6)$$

### 3. ЭВОЛЮЦИЯ РАННЕЙ ВСЕЛЕННОЙ

#### 3.1. Механизм инфляции

Полагается, что рассматриваемый зеркальный мир включает те же механизмы инфляции и бариосинтеза, что и обычный.

Так, для реализации механизма инфляции вводится скалярное инфлатонное поле. Для зеркального мира вводится дополнительное инфлатонное поле [7]; таким образом существует одно для обычных и одно для для зеркальных частиц. При этом, чтобы удовлетворить космологическому ограничению на число сортов частиц (из наблюдательных данных по первичному гелию) [8], мы полагаем температуру зеркальных частиц на момент отцепления обычных частиц достаточно низкой, что означает, что инфляция зеркальных частиц произошла и закончилась несколько раньше, чем в нашем мире. Также, чтобы

допустить возможность объяснения темной материи частицами зеркального мира, мы полагаем начальные условия для зеркальных и обычных частиц такими, чтобы после заделки космологическая плотность зеркальных частиц (а как будет показано далее, особый интерес представляют зеркальные нейтроны) была равна

$$(\Omega_n)^M = \Omega_{DM} = 0.25 \quad (7)$$

Таким образом, в рассматриваемой модели постулируется несимметричность начальных условий относительно обычного и зеркального вещества.

В рамках модели хаотичной инфляции начальные амплитуды обычных и зеркальных инфлатонов могут быть различными, что приводит к образованию доменной структуры в распределении обычного и зеркального вещества.

В областях, где амплитуда обычных инфлатонов выше, после инфляции должны доминировать обычные частицы, а примесь зеркальных частиц - мала. И наоборот, доминантность зеркальных инфлатонов приводит к малой плотности обычных частиц после инфляции.

Если же инфлатон не имеет определенной зеркальности и после инфляции рождается равное количество зеркальных и обычных частиц, то доменная структура может сформироваться из-за случайной локальной асимметрии амплитуд обычного и зеркального полей в различные периоды после общей инфляции.

### 3.2. Механизм бариосинтеза

Для реализации механизма бариосинтеза в обычном мире может быть использован механизм «see-saw» образования малой майорановской массы нейтрино, при которой возникает тяжелое состояние нейтрино, процессы с участием которого нарушают лептонное число  $L$ . Впоследствии это лептонное число распределяется между лептонами и барионами вследствие сфалеронных процессов, сохраняющих более глобальную симметрию  $B-L=0$ .

Такой же механизм бариосинтеза предполагается и для зеркальных частиц. Поскольку температура зеркального мира при бариосинтезе в рассматриваемой модели ниже, чем в нашем, избыток зеркальных барионов может оказаться отличным от избытка обычных барионов ( $\sim 10^{-9}$ ). Тем не менее, это не повлияет существенно на дальнейший анализ, поскольку, как было сказано выше, начальные условия выбираются таким образом, чтобы объяснить зеркальным веществом скрытую массу, а фон зеркальных гамма-квантов не может быть обнаружен на опыте в рамках данной модели, поскольку кинетическое смешивание фотонов не учитывается.

Тот факт, что протон теперь тяжелее суммы масс нейтрона и электрона (масса которого равна массе позитрона): повлияет на соотношение концентраций  $n/p$  на момент заалки ( $T_f \sim 1$  МэВ,  $t \sim 1$  секунда после Большого Взрыва), которое дается соотношением:

$$n/p = e^{-\frac{\Delta m}{T_f}} \approx 6, \quad p/n = \frac{1}{6}. \quad (8)$$

При  $\Delta m < 0$  остаточная концентрация нейтронов будет превосходить концентрацию протонов.

К моменту начала нуклеосинтеза ( $t \sim 1$  с) имеется некая концентрация протонов, и в 6 раз большая концентрация нейтронов. Протоны при этом распадаются с рождением нейтронов и позитронов, а также нейтрино:  $p \rightarrow n + e^+ + \nu_e$ .

За 3 минуты, в течение которых идет нуклеосинтез, успевает распасться около 10% протонов, что приводит к изменению отношения  $p/n = 1/7$ .

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



А затем и более тяжелые ядра гелия, лития и других:



Их относительные концентрации можно оценить по формулам:

$$X(n) = \frac{1 - \frac{p}{n}}{1 + \frac{p}{n}} \approx 0.75, \quad (17)$$

$$X({}^4\text{He}) = \frac{\frac{2p}{n}}{1 + \frac{p}{n}} \approx 0.25. \quad (18)$$

Таким образом, после эпохи нуклеосинтеза Вселенная в основном состоит из нейтральных стабильных нейтронов и ядер гелия. Более тяжелые ядра представлены в значительно меньшей концентрации.

## 4. НЕКОТОРЫЕ ОТДЕЛЬНЫЕ СЛЕДСТВИЯ МОДЕЛИ

### 4.1. Масса $\pi$ -мезонов

Аналогично предположению, что замена зарядов  $u$  и  $d$  кварков перезарядит протон и нейтрон, можно заключить, что массы заряженного и нейтрального  $\pi$ -мезона в зеркальном и обычном мирах будут в точности одинаковыми.

В модели киральной эффективной теории (КЭТ) [9] масса  $\pi$ -мезона главным образом определяется массой входящих кварков. Электромагнитные поправки при этом малы и слабо отражаются на массе нуклона.

Таким образом, можно говорить о равенстве ядерных сил в обычном и зеркальном мире.

### 4.2. Связанное состояние ( $nn$ )

Возможность существования стабильного динейтрона ( $nn$ ) значительно перевернула бы картину нуклеосинтеза в зеркальном мире. Это отразилось бы на закалке отношения  $p/n$  в большую сторону за счет реакции

$$p + nn \rightarrow T + \gamma, \quad (19)$$

а также на изотопическом составе ранней Вселенной.

Стабильность состояния ( $nn$ ) в эпоху нуклеосинтеза зависит не от времени жизни нейтрона и скорости  $\beta$ -распада, а от энергии связи этого состояния. Несмотря на то, что «наш» нейтрон  $\beta$ -радиоактивен, динейтроны могли рождаться в ранней Вселенной и оказали бы влияние на концентрацию первичного гелия. Причем влияние на концентрацию зависело бы от энергии связи состояния ( $nn$ ). Таким образом, в нашем мире было получено космологическое ограничение на энергию связи динейтрона 2.5 МэВ [10].

Экспериментальные поиски динейтрона показали, что он способен существовать как коротко живущий резонанс с энергией связи не больше 70 кэВ [11, 12]. Полученный результат согласуется с теоретическими предсказаниями [13, 14], так как система двух нейтронов запрещена в  $^1S_0$  состоянии.

## 5. ОБРАЗОВАНИЕ ГАЛАКТИК И ЗВЕЗД

Основной составляющей в рассматриваемом зеркальном мире будут нейтроны. Поскольку они электрически нейтральны, они почти не будут терять энергию в процессе «трения» межгалактического газа, вследствие чего они не будут формировать дисковые структуры наподобие галактик, а будут формировать только сферически-симметричные



гало. Это означает, что по своим свойствам нейтроны оказываются близкими к темной материи. В таком случае нейтроны будут «столкновительной» темной материей с сечением взаимодействия порядка размера нейтрона. Как показано в [15], заметное отклонение от сферичности гало в случае «столкновительной» темной материи может быть замечено при:

$$\frac{\sigma}{m} \sim 1 \text{ см}^2/\text{г}. \quad (20)$$

Для нейтронов соотношение (20) равно  $\sim 0.01 \text{ см}^2/\text{г}$ , следовательно, не ожидается заметного отклонения формы гало из зеркальных нейтронов от сферически-симметричных.

Дисковые структуры и галактики же будут формироваться из атомов гелия, поскольку сечение взаимодействия атомов намного выше сечения соударения нейтронов, вследствие чего гелий может терять энергию и оседать в диск. Концентрация гелия в 3 раза меньше концентрации нейтронов, к тому же сечение электромагнитного взаимодействия атомов гелия, примерно равное радиусу атома, меньше, чем сечение взаимодействия атомов водорода в нашем мире (из-за заряда ядра гелия 2). По этой причине можно ожидать, что к современному моменту в зеркальном мире будет мало дисковых структур и галактик.

Спустя длительное время после образования гало из зеркальных нейтронов плотность таких сгустков может оказаться достаточной для начала термоядерных реакций в них – горения нейтронов аналогично горению водорода в наших звездах, то есть слияния нейтронов с образованием дейтерия, электрона и антинейтрино с выделением энергии. Это возможно, если предположить:

$$2m_n > m_D + m_e, \quad (21)$$

что является достаточно естественным предположением по аналогии с  $2m_p > m_D + m_e$  в нашем мире. В отличие от горения водорода, горение нейтронов не связано с преодолением потенциального барьера (нейтроны нейтральны), поэтому достижения пороговой температуры не требуется и не требуется образования горячего ядра. Таким образом, можно ожидать, что в какой-то момент зеркальные нейтроны по объему гало начнут медленно «сгорать», выделяя энергию через зеркальные гамма-кванты и нейтрино, с образованием дейтерия и затем гелия.

Поскольку горение будет медленным, этот эффект не произведет больших изменений в свойствах зеркальных гало к настоящему возрасту Вселенной. Если же условие (21) не выполнено, то зеркальные нейтроны вовсе не будут «гореть», будет иметь место только их упругое рассеяние друг на друге.

В зеркальных галактиках формирование звезд ожидается только из гелия, который, как известно, начинает «гореть» в термоядерных реакциях при гораздо больших температурах, чем водород. Большинство сгустков в зеркальных галактиках будет иметь

недостаточную для начала горения гелия массу и образуют гелиевые карлики, в которых электроны (до ионизации состоявшие в атомах гелия) образуют вырожденный газ, в который погружены полностью ионизированные ядра гелия с температурой, недостаточной для преодоления потенциального барьера и начала термоядерных реакций. Некоторые редкие сгустки будут иметь большую массу, достаточную для образования звезды, в центре которой будет гореть гелий. Такие звезды будут подобны звездам в обычном мире, с той разницей, что их количество будет намного меньше.

## 6. КАНДИДАТ НА РОЛЬ ТЕМНОЙ МАТЕРИИ

Очевидно, в рассматриваемой модели роль темной материи могли бы выполнять нейтроны, концентрация которых в 3 раза превышает концентрацию зеркальных ядер гелия, и которые образуют сферически-симметричные гало вокруг галактик. Возможно, что рассматриваемая модель зеркального мира совместима с имеющимися наблюдательными данными, если полагать нейтроны зеркального мира за темную материю.

## 7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрена модель зеркального мира с  $m_n < m_p - m_e$ . Показано, что при определенном выборе начальных данных и предположений (о механизме инфляции и бариосинтеза в зеркальном мире, о концентрации и температуре отцепления зеркальных частиц и др.) такая модель может быть совместима с известными наблюдательными данными.

Простейшими следствиями обсуждаемой модели являются: зеркальный нейтрон является стабильной частицей, зеркальный протон является нестабильной частицей и распадается по каналу  $p \rightarrow n + e^+ + \nu_e$ , закалка зеркальных нейтронов заменяется закалкой зеркальных нейтронов, соотношение концентраций зеркальных протонов и нейтронов составляет  $\sim 0.18$ .

Наибольший интерес в такой модели представляет собой формирование структур: гало, галактик, звезд и подобных астрономических объектов, поскольку эти процессы в зеркальном мире сильно отличаются от обычного мира.

Показано, что кандидатом на роль нашей темной материи могут служить зеркальные нейтроны, которые имеют достаточную плотность, почти стабильны и образуют гравитационно связанные сферически-симметричные гало и клампы.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. T. Aoyama, et. al., *The anomalous magnetic moment of the muon in the Standard Model*, Phys. Rep. V. **887**. P. 1-166. (2020)
2. T. D. Lee, C.-N. Yang, *Question of Parity Conservation in Weak Interactions*, Phys. Rev. V. **104**. P. 254-258. (1956)
3. C. S. Wu, et. al., *Experimental Test of Parity Conservation in  $\beta$  Decay*, Phys. Rev. V. **105**. P. 1413–1414. (1957)
4. J. H. Christenson, J. W. Cronin, V. L. Fitch, R. Turlay, *Evidence for the 2 decay of the  $K^2_0$  meson*, Phys. Ref. Lett. **13**. P. 138. (1964)
5. И. Ю. Кобзарев, Л. Б. Окунь, И. Я. Померанчук, *О возможности экспериментального обнаружения зеркальных частиц*, Советский журнал ядерной физики. **3**. С. 837. (1966)
6. С. И. Блинников, М. Ю. Хлопов, *О возможных проявлениях «зеркальных» частиц*, Ядерная Физика. **36**. 809. (1982)
7. В. К. Дубрович, М. Ю. Хлопов, *О доменной структуре теневой материи*, Астрон. журн. **66**. 232. (1989)
8. G. Steigman, K. A. Olive, D. N. Schramm, Phys. Lett. **50**. 928. (1979)
9. Б. Л. Иоффе, *Киральная эффективная теория сильных взаимодействий*, Успехи физических наук. **171**. 1273. (2001)
10. J. P. Kneller, G. C. McLaughlin, *The Effect of Bound Dineutrons upon BBN*, Phys. Rev. D. **70**. 043512. (2004)
11. A. Spyrou, Z. Kohley, T. Baumann, D. Bazin, *First Observation of Ground State Dineutron Decay*, Phys. Rev. Lett. **108**. 102501. (2012)
12. F. M. Marques, N. A. Orr, N. L. Achouri, F. Delaunay, J. Gibelin, *Comment on First Observation of Ground State Dineutron Decay*, Phys. Rev. Lett. **109**. 239201. (2012)
13. А. И. Базь, В. И. Гольданский, Я. Б. Зельдович, *Неоткрытые изотопы легких ядер*, Успехи физических наук. **72**. 211. (1960)
14. А. И. Базь, В. И. Гольданский, Я. Б. Зельдович, *Систематика легчайших ядер*, Успехи физических наук. **85**. 445. (1965)
15. R. Massey et al., *The behaviour of dark matter associated with four bright cluster galaxies in the 10 kpc core of Abell 3827*, MNRAS. **4**. 449. (2015)