

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

РЕФЕРАТ

Зеркальный мир $m_n < m_p - m_e$

Выполнила: В. В. Верзакова

Группа: М21-115

Преподаватель: М.Ю. Хлопов

Москва 2022

Содержание

Содержание	1
1 Введение	2
2 Зеркальный мир $m_n < m_p - m_e$	3
2.1 Стабильность нейтрона и протона	3
2.2 Эволюция ранней Вселенной	4
2.2.1 Механизм инфляции	4
2.2.2 Механизм бариосинтеза	4
2.3 Протон-нейтронное соотношение	4
2.4 Первичный нуклеосинтез	5
2.5 Формирование галактических структур и скрытая масса . .	6
3 Заключение	8
Список использованных источников	9

1 Введение

Стандартная модель электрослабых и сильных взаимодействий элементарных частиц не встречает никаких экспериментальных противоречий, однако существует целый ряд причин считать ее неполной и обращаться к ее расширениям. Для объяснения скрытой массы и темной энергии, а также барионной асимметрии во Вселенной, необходимо существование большего числа новых частиц и полей. Для этого вводится понятие «скрытого сектора». Термином «зеркальный мир» обозначают гипотетический скрытый сектор частиц и взаимодействий, который компенсирует асимметрию обычных частиц.

Первые причины существования зеркальных партнеров впервые были указаны в статье Ли и Янга [1], в которой они поставили под сомнение сохранение пространственной четности в слабом взаимодействии. Ранее предполагалось, что Р-четность сохраняется во всех фундаментальных взаимодействиях элементарных частиц. Это значит, что инверсия координатных осей приводит к преобразованию поля некоторой частицы в другое поле, описывающее частицы, которые также существуют в природе.

Позже нарушение четности было обнаружено на опыте β -распада кобальта [2]. Несохранение Р-четности приводит к неэквивалентности лево- и правоориентированных систем координат. Чтобы восстановить эквивалентность левого и правого, Ли и Янг предположили, Р-инверсия должна сопровождаться взаимной заменой обычных частиц и их зеркальных партнеров.

По этой причине, Ландау и многие другие выдвигали теории комбинированной четности (СР-симметрия), в которой гипотетические зеркальные частицы - это античастицы. Однако после открытия нарушения СР-четности в 1964 году стало ясно, что зеркальными партнерами не могут быть античастицы [3].

Кобзарев, Померанчук и Окунь в 1966 году [4] показали, что зеркальные частицы не могут обладать электромагнитным и сильным взаимодействиями обычных частиц, так как это приводило бы к увеличению числа состояний электрона в атоме и другим эффектам, противоречащим экспериментальным наблюдениям. Также, на основании того, что ширина W- и Z-бозонов согласуется с предсказаниями Стандартной Модели (т.е. в ней нет вклада зеркальных частиц), делается предположение о том, что между зеркальными и обычными частицами нет слабого взаимодействия. Следовательно, зеркальные партнёры должны быть не только у частиц вещества, но и у калибровочных бозонов, осуществляющих их взаимо-

действие.

Таким образом, зеркальные частицы обладают своими сильным, слабым и электромагнитным взаимодействиями, а гравитация является главным способом взаимодействия для обычных и зеркальных частиц. В моделях зеркальных миров, отличных от наших, роль скрытой могут играть некоторые зеркальные частицы [5] и даже астрономические объекты из зеркальных частиц.

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

2 Зеркальный мир $m_n < m_p - m_e$

В модели рассматривается одно поколение частиц. Массы зеркальных лептонов и антилептонов в этой модели аналогичны массам в реальном мире. 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.

2.1 Стабильность нейтрона и протона

В реальном мире из многочисленных экспериментов известны массы нейтрона, протона и электрона:

$$m_n = 939,272 \text{ МэВ}, \quad m_p = 938,272 \text{ МэВ}, \quad m_e = 0,511 \text{ МэВ}.$$

Масса нейтрона меньше массы протона и соответственно разность масс нейтрона и протона положительна $\Delta m_{n-p} > m_e$. Таким образом, протон является стабильной частицей, а нейтрон - нестабильной. Он распадается путем спонтанного β -распада: $n \rightarrow p + e^- + \tilde{\nu}_e$.

В случае зеркального мира, при условии $m_n < m_p - m_e$, разность масс протона и нейтрона должна быть больше массы электрона: $\Delta m_{p-n} > m_e$. Так как масса протона больше суммы масс нейтрона и электрона, это определяет возможность его спонтанного распада. Нейтрон является стабильной частицей, протон - нестабильным и в свободном состоянии: $p \rightarrow n + e^+ + \nu_e$. Время жизни протона можно оценить по формуле:

$$\tau_p \sim \frac{1}{G_F^2 \Delta m_{p-n}^5} \approx 900 \text{ с} \quad (1)$$

2.2 Эволюция ранней Вселенной

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

2.2.1 Механизм инфляции

Для реализации механизма инфляции вводится скалярное инфлатонное поле. В рамках модели хаотической 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 [6].

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 [7].

2.2.2 Механизм бариосинтеза

Для реализации механизма бариосинтеза в нашем 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. Впоследствии это лептонное число распределяется между лептонами и барионами вследствие сфалеронных процессов.

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. 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.

2.3 Протон-нейтронное соотношение

Как было указано ранее, протон в зеркальном мире с $m_n < m_p - m_e$ является нестабильной частицей со временем жизни порядка 15 минут. Тот факт, что протон теперь тяжелее суммы масс нейтрона и электрона: $\Delta m_{p-n} \approx 1,3 \text{ МэВ}$,

повлияет также на соотношение концентраций n/p на момент закалки ($T_F \sim 1 \text{ МэВ}, t \sim 1 \text{ с}$ с момента Большого Взрыва), даваемое соотношением:

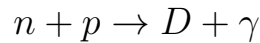
$$\frac{n}{p} = \exp \left(-\frac{\Delta m_{p-n}}{T_F} \right) \approx 6$$

2.4 Первичный нуклеосинтез

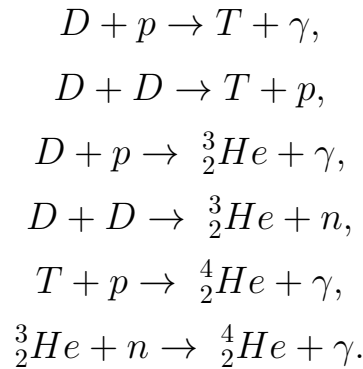
Таким образом, к моменту начала нуклеосинтеза ($t \sim 1 \text{ с}$) имеется некая концентрация протонов, и в 6 раз большая концентрация нейтронов.

За время нуклеосинтеза ($\approx 3 \text{ мин}$), успевает распасться около 10% протонов, что приводит к изменению отношения $p/n \approx 1/7$.

Цепочки термоядерных реакций в ранней Вселенной начинаются с образования дейтерия в реакции:



Затем, образовавшиеся в результате горения протонов ядра дейтерия, служат материалом для образования трития и ${}^3\text{He}$ и далее ${}^4\text{He}$:



Можно провести оценку концентраций ${}^4\text{He}$ и нейтронов по формуле:

$$\begin{aligned} n_n &= \frac{1 - p/n}{1 + p/n} \approx 0,75, \\ n_{{}^4\text{He}} &= \frac{2p/n}{1 + p/n} \approx 0,25. \end{aligned}$$

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

2.5 Формирование галактических структур и скрытая масса

В рассматриваемом зеркальном мире доминирующим веществом 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 скрытой массе. В таком случае нейтроны будут столкновительной скрытой массой с сечением взаимодействия порядка размера нейтрона. Как показано в [8], заметное отклонение от сферичности гало в случае столкновительной скрытой массы может быть замечено при $\frac{\sigma}{m} \sim 1 \text{ см}^2/\text{г}$. Для нейтронов это соотношение 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, равного 2-м). По этой причине можно ожидать, что к современному моменту в зеркальном мире будет мало дисковых структур и галактик.

Спустя длительное время 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. В отличие от горения водорода, горение нейтронов не связано с преодолением потенциального барьера, поэтому достижения пороговой температуры не требуется и не требуется образования горячего ядра.

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 нашем мире, с той разницей, что их количество будет намного меньше.

3 Заключение

В данной работе была рассмотрена модель зеркального мира при условии: $m_n < m_p - m_e$. В данной модели Вселенная будет состоять из гелия, а также из свободных стабильных нейтронов.

Отсюда следует, что возможно существование только массивных звезд, в которых будет проходить процесс горения гелия. Формирование галактических структур в зеркальном мире будет отличаться от процессов формирования в нашем мире.

Тем не менее, возможно, рассматриваемая модель зеркального мира совместима с имеющимися наблюдательными данными, если полагать нейтроны зеркального мира кандидатом в скрытую массу.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Lee T. D., Yang C.-N.* Question of Parity Conservation in Weak Interactions // Phys. Rev. — 1956. — Т. 104. — С. 254–258.
2. *Wu C. S.* [et al.]. Experimental Test of Parity Conservation in β Decay // Phys. Rev. — 1957. — Vol. 105. — P. 1413–1414.
3. *Christenson J. H.* [et al.]. Evidence for the 2π Decay of the K_2^0 Meson // Phys. Rev. Lett. — 1964. — Vol. 13. — P. 138–140.
4. *Kobzarev I. Y., Okun L. B., Pomeranchuk I. Y.* On the possibility of experimental observation of mirror particles // Sov. J. Nucl. Phys. — 1966. — Vol. 3, no. 6. — P. 837–841.
5. *Foot R.* Mirror dark matter: Cosmology, galaxy structure and direct detection // International Journal of Modern Physics A. — 2014. — Т. 29. — С. 1430013.
6. *Хлопов М. Ю.* Основы космомикрoфизики. — 2011.
7. *Дубрович В. К., Хлопов М. Ю.* О доменной структуре теневой материи // Астрoн. журн. — 1989. — Т. 66. — С. 232.
8. *Massey R.* [et al.]. The behaviour of dark matter associated with four bright cluster galaxies in the 10 kpc core of Abell 3827 // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2015. — Vol. 449, no. 4. — P. 3393–3406.