

«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»

РЕФЕРАТ

ЗЕРКАЛЬНЫЙ МИР: $m_n < m_p - m_e$

Преподаватель: Хлопов М.Ю.

Студент гр. М20-115: Зубов Д.В.

Москва 2021

Содержание

Введение	2
1 Зеркальный мир $m_n > m_p - m_e$	3
1.1 Масса π -мезонов.	3
1.2 Закалка отношения $\frac{p}{n}$	3
1.3 Связанное состояние nn	4
1.4 Стабильность химических элементов.	4
1.5 Зеркальный нуклеосинтез	5
1.6 Образование галактик и звезд	6
1.7 Кандидаты на роль темной материи	7

Введение

В 1957 году был проведен знаменитый опыт Ву, показавший несохранение P -четности [1,2]. Для восстановления эквивалентности правых и левых систем координат пространственное отражение должно сопровождаться заменой частиц на зеркальные партнеры. Ли, Ландау и др. в 1957 году предложили на роль зеркальных частиц античастицы, то есть C -сопряженные. Однако после открытия нарушения CP -четности в 1964 году стало ясно, что зеркальными партнерами не могут быть античастицы [3]. В 1966 году Кобзарев, Померанчук и Окунь [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, не обнаруженным на практике (то есть противоречило бы наблюдениям). С открытием W , Z - бозонов стало ясно, что зеркальные частицы не могут обладать и обычным слабым взаимодействием, а могут обладать только обычным гравитационным (и своим набором "зеркальных" взаимодействий). Единственным "мостом" между обычными и зеркальными частицами может быть нейтральная по сохраняющемуся электрическому заряду частица с ненулевой массой (возможное кинетическое смешивание фотонов и т.п. не учитывается). Если нейтрино имеет массу, и имеет место смешивание обычного и зеркального нейтрино, то именно оно может стать "мостом" то есть через реакции с участием нейтрино обычные частицы могут превращаться в зеркальные и обратно, за счет чего возможно будет наблюдать зеркальные частицы на опыте. Пока такого смешивания не обнаружено. В 80'х годах вышел ряд работ Блинникова и Хлопова [5], в которых было показано, что наличие целого зеркального мира с массами частиц и константами связи своих, "зеркальных" взаимодействий, равными нашим, привело бы к противоречию с наблюдательными данными. Однако предположение о некотором отличии зеркального мира от нашего может сильно изменить эту картину. В моделях зеркальных миров, отличных от наших, роль темной материи могут играть некоторые зеркальные частицы и даже астрономические объекты из зеркальных частиц.

1 Зеркальный мир $m_n > m_p - m_e$

В данном реферате рассматривается модель зеркального мира, в котором $m_n < (m_p - m_e)$. Для осязаемых оценок следствий такой модели протон и нейтрон имеют определенные массы:

$$m_n^m = m_p^o = 938.272 \text{ МэВ}, \quad m_p^m = m_n^o = 939.565 \text{ МэВ}, \quad (1)$$

где верхние индексы m и o обозначают частицы зеркального и «нашего» мира соответственно¹. Зеркальные протоны и нейтроны с такими массами могут повиться, если в «нашей» Стандартной модели поменять массы u и d кварков или, что то же самое, поменять их электрические заряды:

$$m_u^m = m_d^o = 4.8 \text{ МэВ}, \quad m_d^m = m_u^o = 2.3 \text{ МэВ}, \quad (2)$$

$$q_u^m = q_d^o = -\frac{1}{3}, \quad q_d^m = q_u^o = \frac{2}{3}. \quad (3)$$

Различие масс u и d кварков предполагается единственным отличием зеркальной СМ от нашей. То есть, имеется в виду, что в зеркальной модели присутствуют также три поколения лептонов и кварков, такой же набор калибровочных бозонов ровно с такими же свойствами и параметрами. Из описания модели следует, что инфляция и бариосинтез происходили идентично в нашем и зеркальном мире. Отличие зеркального мира от нашего станет существенным на этапе нуклеосинтеза.

1.1 Масса π -мезонов.

Аналогично предположению, что замена зарядов u и d кварков перезарядит протон и нейтрон, можно заключить, что массы заряженного и нейтрального π -мезона в зеркальном и нашем мире будут в точности одинаковыми.

В модели киральной эффективной теории (КЭТ) [6] масса π -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 нашем и зеркальном мире.

1.2 Закалка отношения $\frac{p}{n}$.

Из предположения о том, что разность масс зеркальных нуклонов совпадает с разностью масс наших нуклонов, при рассмотрении зеркального

¹Далее эти индексы опущены и рассматриваются только зеркальные частицы, если не оговорено обратное.

мира можно пользоваться оценками значений, полученных для реального мира, с заменой протона на нейтрон.

$$\frac{p}{n} = \exp\left(-\frac{\Delta m}{T_*}\right) \approx \frac{1}{6}, \text{ где } T_* \approx 1 \text{ МэВ} - \text{температура закалки} \quad (4)$$

Так как протон не может существовать свободно, а только внутри ядра с присутствием нейтрона, а также, беря во внимание факт обратного выбивания протонов тепловыми фотонами окружающей среды, отношение $\frac{p}{n}$ может уменьшиться.

Нижнюю границу этого отношения можно оценить учтя только один путь спасения протонов от вымирания - в дейтроне:

$$p + n \rightarrow D + \gamma \quad (5)$$

Причем в момент закалки температура окружающих фотонов достаточна для протекания обратной реакции и тогда, за время остывания среды отношение $\frac{p}{n}$ уменьшится до $\frac{1}{7}$.

1.3 Связанное состояние nn

Возможность существования стабильного динейтрона (nn) значительно перевернула бы картину нуклеосинтеза в зеркальном мире. Это отразилось бы на закалке отношения $\frac{p}{n}$ в большую сторону за счет реакции $p + nn \rightarrow T + \gamma + Q$, а так же на изотопическом составе ранней вселенной.

Стабильность состояния nn в эпоху нуклеосинтеза зависит не от времени жизни нейтрона и скорости β -распада, а от энергии связи этого состояния. Не смотря на то, что «наш» нейтрон β -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 [7].

Экспериментальные поиски динейтрона показали, что он способен существовать как коротко живущий резонанс с энергией связи не больше 70 кэВ [8-9]. Полученный результат согласуется с теоретическими предсказаниями [10, 11], так как система двух нейтронов запрещена в 1S_0 состоянии.

1.4 Стабильность химических элементов.

Первым и самым очевидным следствием выбранной модели является факт нестабильности протона, что препятствует существованию стабильного атома водорода (протия). Нейтрон в свою очередь будет стабильным. При этом протон будет распадаться на нейтрон, позитрон и электронное нейтрино:

$$p^+ \rightarrow n + e^+ + \nu \quad (6)$$

Важным этапом нуклеосинтеза является процесс производства дейтерия.

$$p + n \rightarrow D + \gamma \quad (7)$$

Как и «наш» дейтерий, зеркальный собрат также будет стабильным, так как энергия связи предполагается 2.2 МэВ, а разность масс протона и нейтрона получается равной 1.3 МэВ. Из аналогичных соображений следует стабильность изотопа 4He .

Рассматривая изобары 3T и 3He в нашем и зеркальном мире, можно сделать вывод, что в зеркальном мире картина будет перевернутой, то есть 3T будет стабильным, а 3He будет β^+ активным (в смысле распада протона).

1.5 Зеркальный нуклеосинтез

В виду невозможности существования связанного динейтрона, зеркальный нуклеосинтез будет мало отличаться от нашего

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

$$n + p \rightarrow D + \gamma \quad (8)$$

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

$$n + D \rightarrow T + \gamma \quad (9)$$

$$D + D \rightarrow T + p \quad (10)$$

$$D + T \rightarrow {}^4He + n \quad (11)$$

$$p + T \rightarrow {}^4He + \gamma \quad (12)$$

$$p + D \rightarrow {}^3He + \gamma \quad (13)$$

$$D + D \rightarrow {}^3He + n \quad (14)$$

$$T + {}^4He \rightarrow {}^7Li + \gamma \quad (15)$$

Их относительные концентрации можно оценить по формулам:

$$X(n) = (1 - p/n)/(1 + p/n)0,75 \quad (16)$$

$$X({}^4He) = (2p/n)/(1 + p/n)0,25 \quad (17)$$

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

1.6 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 [12], заметное отклонение от сферичности гало в случае столкновительной темной материи может быть замечено при:

$$\frac{\sigma}{m} \approx 1 \text{ см}^2/\text{г} \quad (18)$$

Для нейтронов соотношение это равно $\approx 0.01 \text{ см}^2/\text{г}$, 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 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: $2mn > mD + me$, что является достаточно естественным предположением по аналогии с $2mp > mD + me$ 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 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 начал 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.

1.7 Кандидаты 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.

Заключение

Была 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. 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 известных процессов в нашем мире. 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 используемых источников

1. T. D. Lee, C. N. Yang «Question of Parity Conservation in Weak Interactions», Physical Review, 104, 254–258, 1956.
2. C.S. Wu, E. Ambler, R.W. Hayward, D.D. Hoppes, R.P. Hudson, «Experimental Test of Parity Conservation in Beta Decay», Phys. Rev. 105, 1413 – 1957.
3. 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, 138 – 1964.
4. И. Ю. Кобзарев, Л. Б. Окунь, И. Я. Померанчук, «О возможности экспериментального обнаружения зеркальных частиц», Советский журнал ядерной физики, 3, 837 ,1966
5. Блинников С.И., Хлопов М.Ю., «О возможных проявлениях «зеркальных» частиц» ЯФ 36 809 (1982)
6. Б.Л. Иоффе, «Киральная эффективная теория сильных взаимодействий», Успехи физических наук, декабрь 2001
7. James P. Kneller and Gail C. McLaughlin. «The Effect of Bound Dineutrons upon BBN». Phys.Rev. D70 (2004) 043512.
8. A. Spyrou, Z. Kohley, T. Baumann, D. Bazin, «First Observation of Ground State Dineutron Decay» Phys. Rev. Lett. 108, 102501 – Published 9 March 2012
9. F. M. Marqués, N. A. Orr, N. L. Achouri, F. Delaunay, and J. Gibelin «Comment on First Observation of Ground State Dineutron Decay», Phys. Rev. Lett. 109, 239201 – Published 5 December 2012
10. А. И. Бааь, В. И. Гольданский, Я. Б. Зельдович, «НЕОТКРЫТЫЕ ИЗОТОПЫ ЛЕГКИХ ЯДЕР», Успехи физических наук, 1960 г. Октябрь
11. А. И. Вазь, В. И. Гольданский, Я. В. Зельдович, «СИСТЕМАТИКА ЛЕГЧАЙШИХ ЯДЕР», Успехи физических наук, 1965 г. Март
12. Massey R. et al. / The behaviour of dark matter associated with four bright cluster galaxies in the 10 kpc core of Abell 3827 // MNRAS (2015) 449 (4)