

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский ядерный университет
«МИФИ»

Кафедра №40
«Физика элементарных частиц»

Реферат на тему:
Зеркальный мир с $G'_F = 2G_F$

Преподаватель

М.Ю. Хлопов

Выполнил
студент группы М19-115

А.С. Поваров

Москва - 2020

Содержание

Введение	3
1. Зеркальный мир с $G'_F = 2G_F$	4
1.1. Описание физической модели	4
1.2. Инфляция и бариосинтез зеркальной Вселенной	4
1.3. Константа Ферми и вакуумное среднее	5
1.3.1. Массы фермионов в зеркальном мире	5
1.3.2. Массы W и Z-бозонов	6
1.4. Первичный нуклеосинтез	6
1.4.1. Закалка нейтронов	7
1.4.2. Концентрация первичного гелия	8
1.5. Состав зеркальной Вселенной	8
1.5.1. Зеркальный водород	8
1.5.2. Температура рекомбинации	9
1.5.3. Скрытая масса	10
Заключение	11

Введение

Физические явления, происходящие с элементарными частицами, определяются четырьмя типами взаимодействий: электромагнитным, слабым, сильным и гравитационным. Слабое взаимодействие было описано Энрико Ферми в 1934 году в терминах четырехфермионного контактного взаимодействия, определяемого константой Ферми G_F . В настоящее время G_F измеряется экспериментально и имеет значение равное $1,4 \cdot 10^{-49}$ эрг·см³. Однако, существуют предпосылки полагать, что фундаментальные константы взаимодействий могли меняться со временем, как, например и константа Ферми. Данная работа посвящена изучению зеркального мира, для которого $G'_F = 2G_F$, и возможной асимметрии с обычным миром, в котором электрослабый сектор не подвергался изменениям.

1. Зеркальный мир с $G'_F = 2G_F$

1.1. Описание физической модели

Физическая модель, которая рассматривается в данной работе – это копия Стандартной модели (СМ). Отличием от СМ является увеличенная константа слабого взаимодействия в 2 раза.

В данной модели каждой частицы обычного мира будет сопоставляться партнер из зеркального мира. В итоге мы имеем зеркальный бозон Хиггса, зеркальные W , Z -бозоны, глюоны и фотон, а также 3 поколения зеркальных кварков (с зарядами $+\frac{2}{3}$ и $-\frac{1}{3}$) и 3 поколения зеркальных лептонов (лептон с зарядом -1 и соответствующее ему нейтрино).

Предполагаем, что зеркальный мир взаимодействует с обычным посредством гравитационного взаимодействия. Все параметры зеркальных партнеров совпадают с параметрами частиц из СМ, кроме масс W , Z -бозонов, так как их масса зависит от значения константы Ферми, которая увеличена в рассматриваемом зеркальном мире. Более подробно изменение масс и ширин W , Z -бозонов будет рассмотрено ниже.

Увеличение константы Ферми приводит к различным изменениям на разных этапах эволюции Вселенной. Например, изменение масс и ширин W и Z -бозонов или время жизни нейтрона, что изменит временные границы и результат нуклеосинтеза.

1.2. Инфляция и бариосинтез зеркальной Вселенной

Одним из самых первых этапов современной Вселенной считается этап инфляции - быстрое экспоненциальное расширение пространства. Модель зеркального мира, рассматриваемая в данной работе, не может подробно описать данный этап эволюции зеркальной Вселенной. Поэтому будем считать, что данная эпоха протекает одинаково как в рамках современного, так и в рамках зеркального миров. Единственное, можно сделать предположения о температуре зеркального вещества на момент конца инфляции. Данная температура может обеспечить достаточную плотность зеркального вещества для объяснения скрытой массы.

Будем считать, что бариосинтез в зеркальной Вселенной протекал точно также как и в обычной. Можем сделать предположение, что кандидатами на роль частиц скрытой материи могут выступать рожденные зеркальные барионы.

1.3. Константа Ферми и вакуумное среднее

Из теории электрослабого взаимодействия вакуумное среднее и константа Ферми связаны следующим соотношением

$$\frac{G_F}{\sqrt{2}} = \frac{g^2}{8m_W^2} = \frac{1}{2v^2} \quad (1)$$

отсюда получаем, что

$$v = (\sqrt{2}G_F)^{-1/2} \quad (2)$$

Для современной константы Ферми это значение равно $v = 246$ ГэВ. В зеркальном мире с $2G_F$ вакуумное среднее в $\sqrt{2}$ раз меньше и равно $v = 174$ ГэВ. В следствие уменьшения значения вакуумного среднего массы всех составных частиц зеркального мира изменятся, и физика дальнейших процессов будет значительно отличаться от существующей.

1.3.1. Массы фермионов в зеркальном мире

В теории стандартной модели Юкавское взаимодействие приводит к тому, что большая часть фермионов приобретает массу. Эта масса зависит от вакуумного среднего и может быть представлена следующей формулой:

$$m_f = \frac{y_f}{\sqrt{2}}v \quad (3)$$

где y_f - собственные значения матриц юкавских констант. В случае зеркального мира с увеличенной константой Ферми, массы фермионов должны уменьшиться в $\sqrt{2}$ раз, т.е. точно также как изменилось вакуумное среднее. Тогда массы кварков и лептонов первого поколения будут равны:

$$m'_e = 0.36 \text{ МэВ}$$

$$m'_u = 1.6 \text{ МэВ}$$

$$m'_d = 3.4 \text{ МэВ}$$

Данные изменения масс фермионов будут влиять на конфигурацию атомов зеркального вещества. Следовательно ядерная физика зеркального мира будет другой по сравнению с обычным миром. Аналогичные изменения масс фермионов произойдут для оставшихся двух поколений.

1.3.2. Массы W и Z-бозонов

Переносчиками слабого взаимодействия являются W- и Z-бозоны. Изменение константы слабого взаимодействия естественным образом отразится на их массах. Масса этих бозонов очень важна для понимания слабого взаимодействия, поскольку она ограничивает его радиус действия. Рассмотрим массы этих бозонов, которые могут быть оценены по следующим формулам:

$$m_W = \left(\frac{\pi\alpha}{G_F\sqrt{2}} \right)^{1/2} \frac{1}{\sin\theta_w} \quad (4)$$

$$m_Z = \left(\frac{\pi\alpha}{G_F\sqrt{2}} \right)^{1/2} \frac{1}{\sin\theta_w \cos\theta_w} \quad (5)$$

Массы W и Z-бозонов для современного мира равны 80 и 91 ГэВ соответственно. Для зеркального мира эти массы будут меньше в $\sqrt{2}$ раз и равны для W-бозона ≈ 57 ГэВ и для Z-бозона ≈ 64 ГэВ. Изменение массы W-бозона и увеличение константы Ферми в 2 раза приводит к изменению ширин распада.

$$\Gamma(W^+ \rightarrow e^+\nu_e) = \frac{G_F^2 m_W^3}{6\sqrt{2}\pi} = 0,232 \text{ ГэВ}, \quad (6)$$

$$\Gamma(W^+ \rightarrow e^+\nu_e) = \Gamma(W^+ \rightarrow \mu^+\nu_\mu) = \Gamma(W^+ \rightarrow t^+\nu_t), \quad (7)$$

$$\Gamma(W^+ \rightarrow u_i \bar{d}_j) = |V_{ij}|^2 \frac{G_F^2 m_W^3}{6\sqrt{2}\pi} = 0,232 \cdot |V_{ij}|^2 \text{ ГэВ}, \quad (8)$$

где V_{ij} – элементы матрицы Кабиббо-Кобаяши-Маскава. Из несложных вычислений можно сделать вывод, что парциальные ширины W-бозона увеличатся в 1,4 раза. В следствии увеличения парциальной ширины время жизни W-бозона уменьшится. Это следует из формулы $\tau \approx h/\Gamma$. Аналогичные заключения можно провести и для Z-бозона.

Изменение масс и времени жизни этих бозонов повлечет за собой изменения временных границ эпохи электрослабого взаимодействия, а также свойства слабого взаимодействия.

1.4. Первичный нуклеосинтез

Одним из важных этапов эволюции вселенной является первичный нуклеосинтез. При высоких температурах нейтроны и протоны находились в космической плазме по отдельности. Но в результате охлаждения Вселенной за счет её расширения становилось термодинамически выгодным объединение нейтронов и протонов в ядра. В результате образовывались ядра водорода (H),

первичный гелий (4He), а также небольшое количество дейтерия (2H), гелия-3 (3He) и лития-7 (7Li). Эта эпоха важна и интересна тем, что она является самой ранней стадией эволюции горячей Вселенной, для которой сегодня возможно прямое сравнение теории с наблюдаемыми данными.

1.4.1. Закалка нейтронов

Первым этапом первичного нуклеосинтеза является закалка нейтронов. Нейтроны образуются и исчезают в ранней Вселенной в результате процессов слабого взаимодействия:



Реакции типа 9 прекращаются при температуре закалки нейтронов, которую можно найти по следующей формуле:

$$T_n = \frac{1}{(1, 2M_{Pl}^* G_F^2)^{1/3}} \quad (10)$$

где

$$M_{Pl}^* = \frac{M_{Pl}}{1, 66\sqrt{g_*}} \quad (11)$$

Подставляя в 10 значения $M_{Pl} = 1, 2 \cdot 10^{19} \text{ ГэВ}$, $G_F = 1, 17 \cdot 10^{-5} \text{ ГэВ}^2$ и $g_* = 10, 75$, получим значение температуры закалки:

$$T_n \approx 1, 4 \text{ МэВ}$$

Рассмотрим случай, когда на момент первичного нуклеосинтеза фермиевская константа G_F была в два раза больше, то есть $G'_F = 2G_F = 2, 34 \cdot 10^{-5} \text{ ГэВ}^2$. Вычислим температуру закалки для этого случая:

$$T'_n = \frac{1}{[1, 2 \cdot 0, 22 \cdot 10^{19} \cdot (2, 34 \cdot 10^{-5})^2]^{1/3}} \approx 0, 9 \text{ МэВ} \quad (12)$$

Оценим остаточную концентрацию нейтронов после их закалки. Запишем общую формулу для плотности числа частиц A в химическом равновесии:

$$n_A = g_A \left(\frac{m_A T}{2\pi} \right)^{3/2} e^{(\mu_A - m_A)/T} \quad (13)$$

где μ_A — химический потенциал частицы A . С учетом, что протон и нейтрон имеют по два спиновых состояния, и пренебрегая отличием масс в множителях перед экспонентой, из формулы 13 делаем вывод, что нейтрон-протонное отношение на момент закалки определяется только температурой закалки:

$$\frac{n_n}{n_p} = e^{-(m_n - m_p)/T_n} \equiv e^{-\Delta m/T_n} \quad (14)$$

Для вычисленных температур получаем значения нейтрон-протонного отношения равные: $n_n/n_p \approx 0,4$ для $T_n = 1,4$ МэВ и $(n_n/n_p)' \approx 0,2$ для $T_n' = 0,9$ МэВ.

$$t = \frac{1}{2H(T_n)} = \frac{M_{Pl}^*}{2T_n^2} \quad (15)$$

По формуле 15 оценим время жизни вселенной на момент начала нуклеосинтеза для двух значений константы Ферми: $t_n \approx 0,7$ с для $T_n = 1,4$ МэВ и $t_n' \approx 1,6$ с для $T_n' = 0,9$ МэВ.

1.4.2. Концентрация первичного гелия

Время жизни нейтрона зависит от константы Ферми. Поэтому в рамках данной модели время жизни нейтрона изменяется. Вычислим его. Ширина распада $\Gamma \approx 1/\tau$. С другой стороны $\Gamma \approx G_F^2 \cdot m_n^5$. Отсюда получаем, что в зеркальном мире время жизни нейтрона уменьшается в 4 раза и равно $\tau \approx 1/(4G_F^2 \cdot m_n^5) \approx 220$ с. В этом случае до того, как нейтроны начнут объединяться с протонами в дейтерий, приблизительно 40% нейтронов распадутся, из-за чего все нейтроны перейдут в ^4He . Исходя из этого, количество первичного гелия-4 уменьшается и равно $Y_{prim} \approx 0,14$ (14%), когда как концентрация при G_f составляет порядка 25%. Концентрация первичного зеркального водорода будет равна 86%. Таким образом подавляющую часть зеркального вещества будет составлять зеркальный водород ^1H .

1.5. Состав зеркальной Вселенной

Для рассмотрения состава зеркальной Вселенной и выбора кандидатов на скрытую массу для начала проведем небольшой анализ конфигураций зеркальных атомов.

1.5.1. Зеркальный водород

Изменение массы электрона изменит свойства зеркального вещества. Рассмотрим на примере водорода, концентрация которого в зеркальном мире увеличена и составляет 86%. В первом приближении ядро атома можно считать неподвижным, а электронные орбиты - круговыми орбитами. Запишем условие вращения электрона массы m_e по круговой орбите радиуса r под действием кулоновской силы со стороны ядра и формулу Бора квантования момента импульса электрона:

$$\begin{cases} \frac{m_e v^2}{r} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2} \\ m_e v r = n\hbar \end{cases} \quad (16)$$

Решая эту систему уравнений, получаем, что радиусы допустимых стационарных орбит электрона вычисляются по формуле:

$$r_n = \frac{4\pi\epsilon_0\hbar^2 n^2}{m_e e^2}, \quad n = 1, 2, \dots \quad (17)$$

где введем обозначение боровского радиуса:

$$r_0 = \frac{4\pi\epsilon_0\hbar^2}{m_e e^2} \quad (18)$$

Для скорости электрона на n -ой орбите получим выражение:

$$v_0 = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar n} \quad (19)$$

Полная энергия электрона на n -ой орбите будет складываться из кинетической E и потенциальной U энергий, которые выражаются следующими формулами:

$$E = \frac{m_e v^2}{2}, \quad U = -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_n} \quad (20)$$

$$E_{tot} = -\frac{m_e e^4}{32\pi^2 \epsilon_0^2 \hbar^2} \cdot \frac{1}{n^2} \quad (21)$$

Нас интересует полная энергия электрона на 1-ой орбите, так как эта энергия является энергией ионизации атома. В обычном мире ионизация водорода происходит при 13.6 эВ. В зеркальном мире с увеличенной константой Ферми энергия ионизации уменьшается в $\sqrt{2}$ раз и будет равна 9.6 эВ. Следует заметить, что радиус Бора увеличится в $\sqrt{2}$ раза. Из этих соображений можно сделать вывод, что атомы зеркального вещества будут менее связными системами.

1.5.2. Температура рекомбинации

Сценарий рекомбинации в зеркальном мире будет похож на рекомбинацию в обычном мире, так как основным веществом является водород. Изменениям подвергнутся температура и время рекомбинации. Можно было бы предположить, что рекомбинация водорода будет происходить при температурах близким к энергии ионизации. На самом деле рекомбинация происходит при более низких температурах. Температуру рекомбинации можно вычислить по формуле:

$$T_r = \frac{\Delta_H}{\ln \left[\frac{\sqrt{\pi}}{4\sqrt{2}\xi(3)} \left(\frac{m_e}{\Delta_H} \right)^{3/2} \eta_B^{-1} \right]} \quad (22)$$

Температура рекомбинации в обычном мире ≈ 0.38 эВ, в зеркальном ≈ 0.27 эВ. То есть получаем, рекомбинация произойдет при более низкой температуре, а следовательно и позже по времени.

1.5.3. Скрытая масса

Если для безстолкновительных частиц масштаб структур задается массой, то в данном случае данный масштаб будет связан с моментом рекомбинации. Протоны связаны с плазмой и излучением до момента рекомбинации. В этом случае вместо массы частицы роль играет энергия ионизации зеркального водорода. В зеркальном мире с увеличенной постоянной Ферми энергия ионизации водорода равна 9.6 эВ. Следовательно можно предположить, что скрытая масса будет горячей и крупномасштабные структуры будут сверхскоплениями галактик.

Так как зеркальный мир будет отличаться от обычного только другими концентрациями первичных легких элементов, можно предположить, что дальнейшая его эволюция будет схожа. Из первичного зеркального водорода будут образовываться зеркальные звезды, которые будут начинать свое существование с pp-цикла. Так как константа Ферми увеличена в два раза, то все реакции в звездах будут протекать быстрее в 4 раза. Из-за чего эволюция зеркальных звезд будет проходить быстрее. В следствие чего образование таких объектов как белые карлики, нейтронные звезды и черные дыры будут образовываться раньше. Так как зеркальный мир может взаимодействовать с обычным только с помощью гравитационного взаимодействия, можно считать, что объектами скрытой массы будут являться эти компактные объекты.

С другой стороны, так как концентрация зеркального водорода выше, это может увеличить плотность зеркальных звезд. А следовательно они могут формировать сверхскопления, которые также могут рассматриваться как объекты скрытой массы.

Заключение

В данной работе была рассмотрена физическая модель зеркального мира, в котором $G'_F = 2G_F$. Предполагается, что зеркальное вещество можно рассматривать как кандидата в скрытую материю.

При увеличении константы Ферми в два раза вакуумное среднее становится меньше, из-за чего изменяются массы и ширины W- и Z-бозонов. Это однозначно влияет на физику дальнейших процессов, а также на временные границы электрослабой эпохи. Также расширяются временные и сужаются температурные границы эпохи нуклеосинтеза, уменьшая количество образовавшегося первичного гелия-4, но увеличивается количество первичного зеркального водорода. Зеркальный водород можно считать основным материалом для скрытой массы. Масштаб структур будет определяться энергией ионизации. Сценарий скрытой массы реализуемый в данной модели – это горячая скрытая масса. Объектами скрытой массы можно считать зеркальные компактные объекты такие как белые карлики, нейтронные звезды и черные дыры, а также зеркальные сверхскопления.

Список литературы

- [1] Высоцкий М. И. Лекции по теории электрослабых взаимодействий.
- [2] Емельянов В. М. Стандартная модель и ее расширения. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. - 584 с.
- [3] Горбунов Д. С., Рубаков В. А. Введение в теорию ранней Вселенной: Теория горячего Большого взрыва. — М.: Издательство ЛКИ, 2008. - 552 с.
- [4] Хлопов М. Ю. Основы космомикрофизики. Изд. 2-е. — М.: Едиториал УРСС, 2011. — 368 с.
- [5] Емельянов В.М., Белоцкий К.М. Лекции по основам электрослабой модели и новой физике: Учебное пособие. — М.: МИФИ, 2007. — 236 с.