

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
«МОСКОВСКИЙ ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ»
КАФЕДРА №40 «ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ»

РЕФЕРАТ ПО КУРСУ "ВВЕДЕНИЕ В КОСОМИКРОФИЗИКУ"
ПО ТЕМЕ
"ЗЕРКАЛЬНЫЙ МИР ПРИ $m_p = m_n$ "

Студент: Щукин Д.А. Т01-40М
Преподаватель: Хлопов М.Ю.

Москва, 2016

1 Введение

В 1956 году в своей статье о сохранении четности в слабых взаимодействиях Ли и Янг[1] впервые указали на причины существования зеркальных партнеров у элементарных частиц. До работы Ли и Янга предполагалось, что четность сохраняется во всех фундаментальных взаимодействиях элементарных частиц. Ли и Янг предложили экспериментально проверить сохранение четности в слабых взаимодействиях, исследуя β -распад поляризованных ядер.

Впервые несохранение пространственной четности в слабых взаимодействиях было обнаружено в эксперименте Ву[2] в 1957 г. На основе идеи СР-инвариантности на роль зеркальных партнеров были предложены античастицы, однако открытие СР-нарушения[3] в 1964 году показало ошибочность выбора античастиц в качестве зеркальных партнеров.

В 1966 году в Кобзарев, Окунь и Померанчук[4] постулировали существование гипотетических зеркальных частиц, зеркального мира и СРА-симметрии. Согласно [4] зеркальные частицы не могут участвовать в обычных сильных и электромагнитных взаимодействиях. Зеркальный сектор должен обладать собственными сильным, слабым и электромагнитным взаимодействиями. В качестве связи между обычными и зеркальными частицами в [4] рассматривалось гравитационное взаимодействие и обмен нейтрино.

2 Описание модели

В работе рассмотрена модель в которой наряду с обычными частицами присутствуют их зеркальные партнёры. Сектор обычных частиц включает в себя 3 семейства лептонов и кварков(и соответствующие им античастицы), переносчики взаимодействия и бозон Хиггса:

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \\ u \\ d \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \\ c \\ c \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \\ t \\ b \end{pmatrix}$$

$$g, W^\pm, Z^0, \gamma, H$$

В данной работе, зеркальные частицы образуют симметричный сектор с условием:

$$m_u = m_d \Rightarrow m_p = m_n$$

Однако, строгая симметрия между обычными и зеркальными электронами приводит к проблемам в атомной физике, если обычный и зеркальные миры обладают идентичным электромагнитным взаимодействием(из-за дополнительных степеней свободы, связанных с зеркальными электронами, ожидается удвоение атомных состояний)[4]. Измерение ширины W^\pm - и Z^0 -бозонов, в свою очередь, исключает общее слабое взаимодействие

обычных и зеркальных частиц. Следовательно, зеркальных партнеров должны иметь как обычные частицы вещества, так и калибровочные бозоны.

Для включения зеркальных частиц в модель элементарных частиц вводят калибровочную группу вида:

$$[SU(2) \otimes U(1) \otimes SU(3)_c]_O \otimes [SU(2) \otimes U(1) \otimes SU(3)_c]_M$$

В данной работе единственным звеном, связывающим обычный и зеркальный мир, является нейтрино(смешивание фотонов, гибридные частицы и т.п. не будут рассмотрены).

3 Инфляционная модель

Старая модель горячей Вселенной(расширяющуюся Вселенную рассматривают как замкнутую систему с термодинамическими параметрами, меняющимися в процессе расширения) не может обеспечить решение проблем горизонта[5], плоскостности[6] и переизбытка магнитных монополей[7]. Предположение о наличии зеркальной материи само по себе не решает указанных проблем. Наиболее предпочтительной является модель, подразумевающая инфляционный сценарий с бариосинтезом[8] и скрытой массой.

Выбор открытой, замкнутой или плоской космологической модели связан с механизмом инфляции, наблюдаемое соотношение барионов и фотонов рассматривается как результат бариосинтеза, а разница между современной полной и барионной плотностями объясняется наличием небарионной скрытой массы.

В рамках модели хаотической инфляции[9] начальные амплитуды зеркальных и обычных инфлатонов могут различаться. Это приводит к образованию доменной структуры в распределении обычного и зеркального вещества[10]. Однако вся скрытая масса не может объясняться только зеркальным веществом, так как это противоречит широко распространённому верхнему пределу на обилие первичного гелия($Y < 25\%$).

Предполагают, что барионный избыток был образован в процессе бариосинтеза[11], который приводит к барионной асимметрии изначально барион-симметричной Вселенной. В оригинальном сценарии бариосинтеза барионный избыток возникает из-за CP -нарушающих эффектов при выходе из равновесия процессов с несохранением барионного числа(продукты распада частиц по различным каналам имеют разное барионное число).

Для зеркальных партнеров CP -нарушающие эффекты равны по величине, но обратны по знаку по отношению к эффектам в обычном мире. Таким образом, генерация барионного избытка обычных частиц соответствует генерации антибарионного избытка для зеркальных частиц, но поскольку знак барионного числа для зеркальных частиц не наблюдаем, то избыток относят к «барионному» в случае обеих зеркальностей. Симметрия в эволюции обычного и зеркального вещества приводит к одновременному производству равных барионных избытков в обычной и зеркальной материях.

4 Космология горячей Вселенной

Сделаем предположение о симметричности начальных условий: релятивистские частицы обычного и зеркального вещества присутствуют в одинаковом количестве и имеют одинаковую температуру. Следовательно, необходимо учитывать вклад в общую плотность (в период ранней горячей Вселенной) как обычного, так и зеркального вещества. Покажем, что наличие зеркального вещества влияет на значение температуры отцепления нейтрино. Термодинамическое равновесие означает, что в расширяющейся Вселенной темп процессов поддерживающих равновесие превышает темп расширения. Но как только характерное время физического процесса превышает космологическое время - система выходит из равновесия относительно данного процесса.

Характерное время слабого взаимодействия можно вычислить по формуле:

$$\tau = (n\sigma v)^{-1} \quad (1)$$

где n – концентрация электрон-позитронных пар, (σv) – скорость их взаимодействия с нейтрино. Электрон-позитронные пары подчиняются распределению Ферми-Дирака, и их концентрация (RD-стадия) в зависимости от температуры имеет следующий вид:

$$n = \frac{4\zeta(3)T^3}{\pi^2} \quad (2)$$

Сечение слабого взаимодействия можно оценить по формуле:

$$\sigma \sim G_F^2 T^2 \quad (3)$$

Скорость расширения Вселенной зависит от плотности вещества следующим образом:

$$H \sim \frac{\sqrt{k_\epsilon} T^2}{m_{pl}} \quad (4)$$

где k_ϵ – число ультрарелятивистских степеней свободы.

При помощи формул (1) – (4) можно получить зависимость температуры отцепления нейтрино от числа ультрарелятивистских степеней свободы:

$$H \sim \frac{k_\epsilon^{\frac{1}{6}}}{(G_F^2 m_{pl})^{\frac{1}{3}}} \quad (5)$$

Так как общее число ультрарелятивистских степеней свободы:

$$k_\epsilon = 1 + \frac{7}{2} \cdot 2 + \frac{7}{8} \cdot 3 = \frac{43}{8} \quad (6)$$

С учетом зеркального вещества число степеней свободы вырастет в 2 раза, что приведет к увеличению температуры отцепления нейтрино в 1,12 раз.

Когда характерное время слабого взаимодействия превышает космологическое время, β -процессы, в которых протоны преобразуются в нейтроны и нейтроны в протоны,

$$\nu_e n \rightarrow ep, \bar{\nu}_e p \rightarrow e^+ n, e^+ n \rightarrow \bar{\nu}_e p \quad (7)$$

выходят из равновесия, и происходит закалка отношения количества нейтронов и количества протонов. Оценим отношение количества нейтронов к количеству протонов, как в зеркальном, так и обычном мире с учетом увеличения температуры отщепления нейтрино. Так как нейтроны и протоны являются нерелятивистскими при данной температуре, их отношение может быть вычислено следующим образом:

$$\frac{n}{p} = e^{-\frac{\Delta m_{np}}{T}} \quad (8)$$

Тогда, для обычных протонов и нейтронов без учёта зеркальных частиц:

$$\frac{n}{p} \sim 0.17 \quad (9)$$

А с учётом зеркальных частиц:

$$\frac{n_O}{p_O} \sim 0.20 \quad (10)$$

Для зеркальных протонов и нейтронов это отношение зависит от разницы их масс. Учитывая, что $m_n = m_p$:

$$\frac{n_M}{p_M} = 1.0 \quad (11)$$

Так как разность масс протона и нейтрона в данной модели равно нулю, то обе эти частицы остаются стабильными в свободном состоянии, а также находясь внутри ядер, нейтрон и протон будут стабильными и не смогут переходить друг в друга.

Оценим долю обычного первичного гелия при условии наличия зеркального вещества. При температурах выше 0,1 МэВ образованию первичного гелия препятствует реакция фото-расщепления дейтерия:

$$\gamma + D \rightarrow p + n \quad (12)$$

За время, необходимое для достижения такой температуры, часть нейтронов распадется, и отношение количества нейтронов к количеству протонов составит :

$$\frac{n_O}{p_O} \simeq 0.19 \quad (13)$$

Тогда вклад первичного гелия в плотность барионного вещества составит:

$$\frac{\rho_{He}}{\rho_B} \simeq \frac{2 \frac{n}{p}}{1 + \frac{n}{p}} \simeq 0.30 \quad (14)$$

Полученный результат противоречит широко распространенному верхнему пределу на обилие первичного гелия ($Y < 25\%$). Но учитывая, что наблюдаемое обилие гелия составляет:

$$Y_{obs} = (0.28 \pm 0.12) \quad (15)$$

что само по себе не противоречит (14).

Определим первичный химический состав зеркального вещества. Первая реакция первичного нуклеосинтеза в зеркальной материи – образование дейтерия:

$$p + n \rightarrow D + \gamma \quad (16)$$

Необходимо протекание этой реакции при низких температурах, иначе энергии фотонов будет достаточно для разрушения образовавшихся ядер дейтерия. В связи с расширением Вселенной не все нейтроны и протоны успеют объединиться в дейтерий. Часть протонов и нейтронов останется в свободном состоянии. Для обеспечения синтеза ${}^4\text{He}$ необходимо протекание следующих промежуточных реакций:

$$p + D \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma, D + D \rightarrow {}^3\text{He} + n, D + D \rightarrow T + p \quad (17)$$

В дальнейшем синтез ${}^4\text{He}$ обеспечивается реакциями:

$$p + D \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma, n + {}^3\text{He} \rightarrow \gamma + {}^4\text{He}, D + {}^3\text{He} \rightarrow p + {}^4\text{He} \quad (18)$$

Оценим массовую доли ${}^4\text{He}$ относительно общего количества барионов:

$$X_{He} = \frac{2 \frac{n}{p}}{1 + \frac{n}{p}} = 1 \quad (19)$$

References

- [1] T. D. Lee and C. N. Yang Phys. Rev. 104, 254 "Question of Parity Conservation in Weak Interactions"
- [2] C. S. Wu, E. Ambler, R. W. Hayward, D. D. Hoppes, and R. P. Hudson Phys. Rev. 105, 1413 "Experimental Test of Parity Conservation in Beta Decay"
- [3] J.W. Cronin, V.L. Fitch, R. Turlay Phys.Rev.Lett. 138-140 "Evidence for the 2π Decay of the K_2^0 Meson"
- [4] Кобзарев И.Ю., Окунь Л.Б., Померанчук И.Я. ЯФ 3 1154 "О возможности экспериментального обнаружения зеркальных частиц"
- [5] Alan H. Guth Phys. Rev. D 23, 347 "Inflationary universe: A possible solution to the horizon and flatness problems"
- [6] A.D. Linde Reports on Progress in Physics 8, 47 "The inflationary Universe"
- [7] Zeldovich Ya., Khlopov M. Phys. Lett. 79B, 239 "On the concentration of relic magnetic monopoles in the universe"
- [8] A.D. Linde Phys. Lett. 160B, 243 "A new mechanism of baryogeneses and the inflationary universe"
- [9] A.D. Linde Phys. Lett. 139B, 27 "Chaotic inflation in supergravity"
- [10] V.K. Dubrovich, M.Yu. Khlopov Astron. Zh. 66, 232 "On the domain structure of shadow matter"
- [11] A.D. Sakharov JETP Lett. 5, 1, 24 "Violation of CP invariance, C asymmetry, and baryon asymmetry of the universe"