

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(наблюдения распадов $K_{\pi 2}^+$, $K_{\pi 3}^+$ мезонов, нарушение четности в β распадах, распадах Λ^0 -гиперонов) 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 и слабых(исключено открытием промежуточных W^\pm - и Z^0 -бозонов и измерением их ширин) 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.

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.

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 модели, зеркальные частицы представляют собой симметричный сектор с условием (массы остальных частиц обычного мира равны массам соответствующих зеркальных партнёров):

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

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 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 отщепления 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 отщепления 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,

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

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:

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

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

$$\frac{n_M}{p_M} = 1.0 \quad (10)$$

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 эффект влияния зеркального вещества на долю **обычного** первичного гелия. При температурах выше 0,1 МэВ обычному образованию первичного гелия препятствует реакция фото-расщепления дейтерия:

$$\gamma + D \rightarrow p + n \quad (11)$$

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

$$\frac{n_O}{p_O} \simeq 0.19 \quad (12)$$

Тогда вклад первичного гелия в плотность барионного вещества составит:

$$\frac{\rho_{He}}{\rho_B} \simeq \frac{2 \frac{n}{p}}{1 + \frac{n}{p}} \simeq 0.30 \quad (13)$$

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

$$Y_{obs} = (0.28 \pm 0.12) \quad (14)$$

что само по себе не противоречит (28).

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

$$p + n \rightarrow D + \gamma \quad (15)$$

В связи с расширением Вселенной не все нейтроны и протоны успевают объединиться в дейтерий. Часть остаётся в свободном состоянии.

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 4He необходимо протекание следующих промежуточных реакций:

$$p + D \rightarrow {}^3He + \gamma, D + D \rightarrow {}^3He + n, D + D \rightarrow T + p \quad (16)$$

В дальнейшем синтез 4He обеспечивается реакциями:

$$p + D \rightarrow {}^4He, n + {}^3He \rightarrow \gamma + {}^4He, D + {}^3He \rightarrow p + {}^4He \quad (17)$$

Оценим массовые доли 4He и водорода относительно общего количества барионов при температуре нуклеосинтеза ($T_N S \sim 0.1 MeV$):

$$X_{He} = \frac{m_{4He} n_{4He}(T_N S)}{m_p(n_p(T_N S) + n_n(T_N S))} = \frac{2}{\frac{n_p(T_N S)}{n_n(T_N S)}} = 1 \quad (18)$$

$$X_H = \frac{1 - \frac{n}{p}}{1 + \frac{n}{p}} = 0 \quad (19)$$

Таким образом первичный гелий в зеркальном мире будет составлять 100% вещества.

Система из двух протонов и двух нейтронов может находиться в двух состояниях: свободное ($2p + 2n$) и в виде ядра гелия (4He). Отношение числа систем в таких состояниях оцениваем по формуле:

$$\frac{N(2p + 2n)}{N({}^4He)} = e^{-\frac{\Delta m}{kT}} \quad (20)$$

$$\Delta m = 4m_n - m_{He} \quad (21)$$

Распад и образование ядер гелия будут происходить пока средняя температура не станет меньше энергии связи в ядрах. Дальнейшее отношение числа свободных нуклонов к числу ядер гелия меняться не будет. Концентрация водорода может быть найдена при помощи выражения:

$$\frac{N(p)}{N({}^4He)} = 2e^{-\frac{\Delta m}{kT_q}} \quad (22)$$

Температура закалки T_q определяется выражением:

$$T_q \sim \frac{k_\epsilon^{\frac{1}{6}} G^{\frac{1}{6}}}{G_F^{\frac{2}{3}}} \simeq 10^9 K = 1 MeV \quad (23)$$

где $k_\epsilon(T \sim 1 MeV) = 1 + \frac{7}{8}(2 + N_\nu)$ (предполагаем, что все сорта нейтрино дают вклад в k_ϵ)

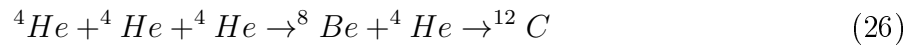
Получаем, что концентрация водорода очень близка к нулю:

$$\frac{N(p)}{N({}^4He)} = 2e^{-\frac{\Delta m}{kT_q}} = 2.6 \cdot 10^{-1300} \quad (24)$$

Можно предположить, как будет происходить образование более тяжёлых элементов. Например, в результате реакции горения гелия в звёздах зеркальной материи:



образуется изотоп 8Be . Из-за высокой концентрации ядер 4He прежде чем распасться изотопы 8Be могут провзаимодействовать с ещё одним ядром 4He с образованием углерода:



Нестабильность изотопа ${}^8\text{Be}$ может быть подтверждена с помощью полуэмпирической формулы Вайцеккера для энергии связи ядра, в результате имеем:

$$E_c/A = 7.01 \text{ MeV/nucleon} \quad (27)$$

Столь малое значение удельной энергии связи свидетельствует о нестабильности ядра ${}^8\text{Be}$.

4 Выводы

В данной работе была рассмотрена модель зеркального мира с отношением масс нуклонов $m_p = m_n$. Были получены следующие результаты:

–Вклад первичного гелия в плотность обычного барионного вещества с учетом зеркальных частиц составляет:

$$\frac{\rho_{He}}{\rho_B} \simeq \frac{2\frac{n}{p}}{1 + \frac{n}{p}} \simeq 0.30 \quad (28)$$

–Во Вселенной будет доминировать ${}^4\text{He}$.

–Из-за практически полного отсутствия первичного водорода будут отсутствовать звёзды, в которых происходит процесс горения водорода. В зеркальных звездах будут протекать реакции горения ${}^4\text{He}$ с образованием ${}^{12}\text{C}$.

–На роль тёмной материи претендует доминирующий ${}^4\text{He}$.

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"
- [12] М.Ю. Хлопов "Основы космомикрoфизики". Изд. 2-е. — М.: Едиториал УРСС, 2011. — 368с.