

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

Реферат по дисциплине
«Введение в космофизику»

Зеркальный мир $m_p = m_n$

Выполнил
студент группы М21-115

_____ Г. А. Толкачёв

Проверил

_____ М. Ю. Хлопов

Москва 2022

Содержание

1	Введение	2
2	Описание физики зеркальной модели	3
2.1	Горячая Вселенная	3
2.2	Первичный термоядерный синтез	5
2.3	Формирование крупномасштабных структур	7
3	Заключение	9
Список использованных источников		9

1 Введение

Начало зеркальной физике было положено в 1956 с работы[4] физиков Ли и Янга, в которой они предположили, что C и P четность не сохраняется в слабых взаимодействиях. Далее была предложена идея о проведении эксперимента по поиску псевдоскалярных корреляций спина и импульса sr , а для объяснения сохранения четности между левым и правым была выдвинута гипотеза о существовании «симметричных» частиц. Полгода спустя был проведен эксперимент, который показал лево-правую асимметрию в β распадах ^{60}Co и в $\pi \rightarrow \mu \rightarrow \gamma$ - распадах[2; 3]. После чего Ландау выдвинул идею о строгом сохранении комбинированной CP четности[6]. Однако в 1964 году Кронин и Фитч показали[1], что CP -симметрия тоже может быть нарушена. Гипотезу о существовании гипотетических зеркальных частиц, зеркального мира и CPA -симметрии впервые высказали российские физики Кобзарев, Окунь и Померанчук в статье «О возможности экспериментального обнаружения зеркальных частиц» в журнале «Ядерная физика» в 1966 году[7]. Согласно этой статье все зеркальные частицы могут принимать участие в обычным сильным и электромагнитным взаимодействиях. При этом зеркальные частицы должны также иметь свои собственные сильные, слабые, электромагнитные взаимодействия.

Идея существования зеркального мира является актуальной по сей день. Поиски производятся в основном с использованием астрофизических методов: гравитационное линзирование, мощные гамма-всплески, гравитационные аномалии и строение галактик. Помимо астрофизических методов производятся поиски и на ускорительных установках.

2 Описание физики зеркальной модели

В данной работе рассматривается модель зеркального мира. В данном зеркальном мире существует 1 поколение фермионов, переносчики слабого, сильного и электромагнитного взаимодействия. А также бозон Хиггса. Все эти частицы являются зеркальными партнерами реальных частиц. Все частицы зеркальной модели имеют такие же характеристики как и частицы реального мира, за исключением протона и нейтрона, которые в данной модели рассматриваются как частицы с одинаковой массой $m_p = m_n$. Так как рассматриваемая модель предполагает нулевую разность масс протона и нейтрона, то распад таких частиц запрещен законом сохранения энергии. При этом, внутри ядер данные частицы также будут стабильными.

Необходимо также отметить, что в зеркальном мире так же как и в реальном присутствует проблема барионной асимметрии, которая состоит в отсутствии наблюдаемых проявления антивещества во Вселенной. О барионной асимметрии также свидетельствует большая величина наблюдаемого отношения $n_\gamma/n_b \sim 10^9$. В модели горячей Вселенной реликтовые фотоны образовались в основном при аннигиляции частиц и античастиц в эпоху бариогенезиса (например, пар кварков и антикварков при $T > 150$ МэВ), после чего каждый фотон многократно рассеивался, поглощался и переизлучался, а энергия фотонов постепенно падала до современных значений, соответствующих температуре реликтового излучения. Если бы число частиц и античастиц было одинаковым, при падении температуры они бы все проаннигилировали в фотоны, и вещества в природе не было бы. Однако наличие одной лишней частицы на миллиард пар частица-античастица привело к «выживанию» барионной материи.

По предложению А. Д. Сахарова [5], барионная асимметрия Вселенной должна быть связана с нарушением закона сохранения барионного числа, идентичности свойств частиц и античастиц (СРТ-инвариантность) и условии полного ТДР в расширяющейся Вселенной. Эта проблема пока не решена.

2.1 Горячая Вселенная

Предположим что наша модель симметрична относительно начальных условий. То наша модель содержит одинаковое число зеркальных и обычных частиц и они имеют одинаковую температуру. Из за добавления зеркальных частиц необходимо учесть вклад в общую плотность вещества зеркальных частиц, а также обычных частиц. В любой системе устанавливается термодинамическое равновесие, если темп процессов поддержания равновесия, превышает темп изменения параметров системы. В расширяющейся Вселенной темп такого изменения совпадает с темпом расширения. Если же характеристическое время физического процесса превышает

космологическое время, то система выходит из равновесия относительно данного процесса.

Оценим температуру отцепления нейтрино. Условие отцепления нейтрино можно выразить формулой, которая совпадает с условием закалки:

$$H = (n\sigma v), \quad (1)$$

n - где концентрация электрон позитронных пар, v - относительная скорость воздействия электронов с нейтрино с сечением σ . Концентрация n электрон позитронных пар на RD-стадии зависит от температуры следующим образом:

$$n \sim T^3, \quad (2)$$

Сечение σ взаимодействия:

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

где G_F - константа Ферми. Скорость расширения вселенной

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

Используя формулы 2-4 можно найти температуру при которой происходит закалка:

$$T \sim \frac{k_\epsilon^{1/6}}{(G_F^2 m_{Pl})^{1/3}}, \quad (5)$$

где k_ϵ - эффективное число ультрарелятивистских степеней свободы, которое определяется формулой:

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

В формуле 6 первое слагаемое обусловлено фотонами, второе электронами и позитронами, а третье нейтрино. Таким образом, можно получить, что температура отцепления нейтрино $T = 1MeV$. Если учесть зеркальные частицы, то количество степеней свободы увеличиться в 1.67 раза и как следствие температура станет в 1.1 раз выше.

Одним из важных следствий отцепления нейтрино заключается в том, что когда характерное время слабого взаимодействия превышает космологическое время, β - процессы, в которых протоны преобразуются в нейтроны и нейтроны в протоны выходит из равновесия и происходит закалка количества протонов и нейтронов. Отношение нейтронов к протонам на момент закалки можно определить используя уравнение Саха:

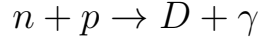
$$\frac{n}{p} = \exp\left(-\frac{\Delta m}{T}\right). \quad (7)$$

Разность масс протона и нейтрона в зеркальной модели равны нулю, поэтому на ранних стадия количество протонов и нейтронов должны быть равны. А так как в рассматриваемой модели нейтрон также как и протон является стабильной частицей, отношения $\frac{n}{p} = 1$ останется постоянным. Для реального мира с учетом вклада дополнительных степеней свободы отношение протонов к нейтронам измениться и составит:

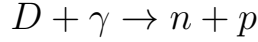
$$\frac{n'}{p'} = \exp\left(\frac{1}{6}\right)^{1/1.1} = 0.2 \quad (8)$$

2.2 Первичный термоядерный синтез

В первичном термоядерном синтезе в реальном мире образовались самые легкие атомные ядра - изотопы водорода и гелия. Из за симметричности реального и зеркального мира, можно предположить, что и в зеркальном мире в первичный нуклеосинтез начинается с образования легчайших ядер. Образование дейтерия является первой реакцией первичного нуклеосинтеза.



Из за расширения Вселенной не все нейтроны и протоны успевают образовывать дейтерий, поэтому часть протонов и нейтронов остается в свободном состоянии. Для избежания фоторасщепления дейтерия



необходимо, что бы данная реакция протекала при температуре, при которой фоторасщепление не эффективно $T < T_D \sim 10^2$. Нуклеосинтез начинается тогда, когда образование дейтерия становится энергетически выгодной и равновесные концентрации нуклонов и дейтерия становятся одинаковыми. Оценим температуру, при которой происходит термоядерный синтез или горение нейтронов. Для этого рассмотрим уравнение Саха для дейтерия:

$$X_D(T_{NS}) \sim \eta_b \left(\frac{2.5 T_{NS}}{m_p} \right)^{\frac{3}{2}} e^{\frac{\Delta D}{T_{NS}}} \sim 1 \quad (9)$$

Если учесть, что масса дейтерия в зеркальной вселенной такая же как в реальной вселенной, а $m_p = m_n$, то энергия связи дейтерия равна:

$$\Delta D = m_n(Z + N) - D = 939.6 * 2 - 1875,6 = 3.6 MeV, \quad (10)$$

Подставляя барион-фотонное отношение $\eta_B \sim 0.6 \cdot 10^{-9}$ и энергию связи дейтерия в формулу 9 получим:

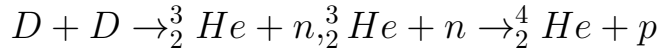
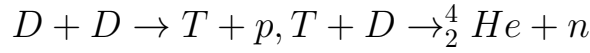
$$T_{NS} \sim 108 keV \quad (11)$$

Найдем скорость горения нейтронов, которая определяется как частота столкновения, нейтронов с протонами в результате которого образовался дейтерий:

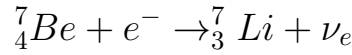
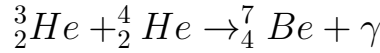
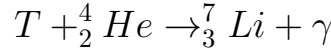
$$\Gamma_{p(n\gamma)D} = n_{p,n} \langle \sigma_{p(n\gamma)D} v_{np} \rangle_{p(n\gamma)D} = \eta_B \frac{2\zeta(3)}{\pi^2} T^2 \langle \sigma_{p(n\gamma)D} v_{np} \rangle_{p(n\gamma)D} \approx 0.8c^{-1}, \quad (12)$$

где $\langle \sigma_{p(n\gamma)D} v_{np} \rangle_{p(n\gamma)D} \approx 6 \cdot 10^{-20} \text{ cm}^2/\text{с}$. Полученное значение скорости горения нейтронов на несколько порядков выше темпа расширения вселенной $H(T_{NS}) \approx 1.15 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$. Поэтому можно сделать вывод, что выгорание нейтронов происходит очень быстро

Образовавшийся дейтерий принимает участие в термоядерных реакциях



при которых образуется "первичный химический состав". Некоторая часть ядер гелия-4 сформировала литий. К образованию лития-7 приводили следующие реакции:



Кроме этих элементов, при первичном нуклеосинтезе образовались и более тяжёлые ядра, однако из-за отсутствия стабильных ядер с атомным весом 5 или 8 доля этих элементов оказалась крайне мала.

Оценим массовую долю гелия и водорода относительно общего количества барионов.

$$\frac{\rho_H}{\rho_B} \approx \frac{1 - n/p}{1 + n/p} = \frac{1 - 1}{1 + 1} = 0 \quad (13)$$

$$\frac{\rho_{He}}{\rho_B} \approx \frac{2n/p}{1 + n/p} = \frac{2}{1 + 1} = 1 \quad (14)$$

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

Для реального мира с учетом вклада дополнительных степеней свободы массовая доля гелия и протона:

$$\frac{\rho'_H}{\rho'_B} \approx \frac{1 - n'/p'}{1 + n'/p'} = \frac{1 - 0.2}{1 + 0.2} = 0.67 \quad (15)$$

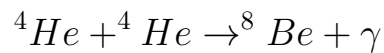
$$\frac{\rho'_{He}}{\rho'_B} \approx \frac{2n'/p'}{1 + n'/p'} = \frac{0.4}{1 + 0.2} = 0.33 \quad (16)$$

Полученный результат противоречит верхнему пределу массовой доле первичного гелия, которая составляет 25%. Однако, не противоречит наблюдаемой массовой доле гелия $Y_{He} = 0.28 - 0.40$

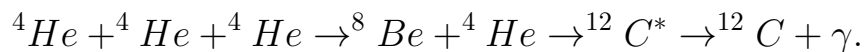
2.3 Формирование крупномасштабных структур

Согласно массовым оценкам первичного вещества все первичные зеркальные звезды будут состоять преимущественно из гелия. В реальном мире неизвестны механизмы образования гелиевых звезд из молекулярных облаков. В данной работе не будут рассмотрены стадии формирования и эволюции гелиевых звезд. Однако, необходимо отметить, что термоядерные реакции на зеркальных гелиевых звездах будут протекать намного быстрее, чем на звезде главной последовательности. Это связано с несколькими фактами. Скорости термоядерных реакций очень чувствительны к температуре, а для реакций синтеза более тяжелых элементов температура должна быть намного выше (требуется преодоление более высокого кулоновского барьера $\sim Z^2$, где Z — заряд ядра), и поэтому, когда эти реакции начинаются, при высокой температуре они протекают очень быстро. Вследствие энергетических потерь температура в центре достаточно массивной звезды непрерывно повышается во время ее эволюции из-за отрицательной теплоемкости звезды.

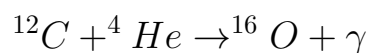
Рассмотрим основную реакцию, которая будет происходить на гелиевой зеркальной звезде.



Основная особенность данной реакции заключается в том, что реакция приводит к образованию неустойчивого 8Be , который распадается на две альфа частицы. Из-за высокой плотности ядер 4He оказывается, что прежде чем ядро 8Be снова распадется на две альфа частицы, оно успевает провзаимодействовать с еще одним ядром 4He с образованием изотопа ${}^{12}C$ в возбужденном состоянии: Рассмотрим основную реакцию, которая будет происходить на гелиевой зеркальной звезде.



Тройной α -процесс эффективно происходит при температурах $\sim 100 - 200$ млн К. Поэтому процесс горения гелия начнется лишь тогда, когда в результате гравитационного сжатия в центре звезды будут достигнуты такие температуры. По мере накопления ядер ${}^{12}C$ они начинают вступать во взаимодействие с 4He с образованием ядер ${}^{16}O$:



Далее при последовательном подхвате α - частицы будут образовываться $N \cdot \alpha$ - ядра: ${}^{12}C, {}^{16}O, {}^{20}Ne, {}^{24}Mg, {}^{28}Si$.

Таким образом, реакции горения гелия приводят к образованию в центре звезды плотного ядра, состоящего преимущественно из углерода и кислорода. После водорода и гелия углерод и кислород являются наиболее распространенными элементами в звездах главной последовательности

3 Заключение

В данной работе была рассмотрена эволюция зеркальной модели $m_p = m_n$. В ходе выполнения данной работы была оценена скорость горения нейтронов

$$\Gamma_{p(n\gamma)D} \approx 0.8c^{-1},$$

которая на несколько порядков выше темпа расширения вселенной, при температуре горения нейтронов

$$T_{NS} \sim 108keV,$$

. На основе данного результата сделан вывод о том, что выгорание нейтронов происходит достаточно быстро.

Для зеркальной модели оценена массовая доля гелия и водорода, которая составляет:

$$\begin{aligned}\frac{\rho_H}{\rho_B} &\approx 0, \\ \frac{\rho_{He}}{\rho_B} &\approx 1.\end{aligned}$$

Произведена оценка вклада первичного гелия в плотность первичного вещества с учетом зеркальных частиц:

$$\frac{\rho'_{He}}{\rho'_B} \approx 0.33$$

Полученный результат не противоречит наблюдаемой доле гелия.

Основываясь на результатах оценки массовой доли первичного вещества сделан вывод о том, что зеркальные звезды состоят преимущественно из гелия, время их жизнь будет меньше из за высокой скорости реакций. В звездах такого типа в результате горения водорода происходят реакции подхвата α - частиц, в результате которых образуются $N \cdot \alpha$ - ядра.

Список использованных источников

1. Evidence for the 2π Decay of the K_2^0 Meson / J. H. Christenson [и др.] // Phys. Rev. Lett. — 1964. — Июль. — Т. 13, вып. 4. — С. 138—140.
2. Experimental Test of Parity Conservation in Beta Decay / C. S. Wu [и др.] // Phys. Rev. — 1957. — Февр. — Т. 105, вып. 4. — С. 1413—1415.
3. *Garwin R. L., Lederman L. M., Weinrich M.* Observations of the Failure of Conservation of Parity and Charge Conjugation in Meson Decays: the Magnetic Moment of the Free Muon // Phys. Rev. — 1957. — Февр. — Т. 105, вып. 4. — С. 1415—1417.
4. *Lee T. D., Yang C. N.* Question of Parity Conservation in Weak Interactions // Phys. Rev. — 1956. — Окт. — Т. 104, вып. 1. — С. 254—258.
5. *А. Д. Сахаров.* Нарушение СР-инвариантности. С-асимметрия и барионная асимметрия Вселенной // УФН. — 1991. — Т. 161. — С. 61—64.
6. *Ландау Л. Д.* О законах сохранения при слабых взаимодействиях // ЖЭТФ. — 1957. — Т. 32 405.
7. *Окунь Л. Б., Кобзарев И. Ю., Померанчук И. Я.* О возможности экспериментального обнаружения зеркальных частиц // ЯФ. — 1966. — Т. 3 1154.