

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	Рекомбинация Гелия	7
2.4	Образование вещества	7
2.5	Стабильность ядер	8
3	Заключение	10
Список использованных источников		10

1 Введение

Начало зеркальной физике было положено в 1956 с работы [4] физиков Ли и Янга, в которой они предположили, что P —четность не сохраняется в слабых взаимодействиях. До их работы предполагалось, что P —четность сохраняется во всех взаимодействиях элементарных частиц. Ли и Янг предложили экспериментально проверить сохранение четности в слабых взаимодействиях, исследуя β -распад поляризованных ядер. Полгода спустя был проведен опыт Ву [3], который показал лево-правую асимметрию в β распадах ^{60}Co . Для сохранения левого и правого, Ли и Янг предположили, что зеркальные партнеры должны существовать для всех известных частиц. В этом случае P —инверсия должна сопровождаться взаимной заменой обычных частиц и их зеркальных партнеров. После чего Ландау выдвинул идею о строгом сохранении комбинированной CP четности [7]. Согласно идеи CP -инвариантности уже найденные партнеры частиц обычной материи, то есть античастицы, были идентифицированы с зеркальными двойниками. Однако, в 1964 году было показано [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 [8]. Согласно этой статье все зеркальные частицы не могут принимать участие в обычным сильным и электромагнитных взаимодействиях, так как это привело бы к увеличению числа состояний электрона в атоме и другим эффектам, не обнаруженных на практике. А так как ширины W , Z -бозонов согласуются с предсказаниями Стандартной Модели, можно сделать вывод о том, что зеркальные частицы не могут обладать обычным слабым взаимодействием. Поэтому зеркальные частицы обладают только обычным гравитационным взаимодействием а также собственным набором зеркальных воздействий. 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 Зеркальной Вселенной, в которой массы нуклонов равны $m_p = m_n$. 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 мира 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 [6], 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

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 ней-

трино 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:

$$k_\epsilon = 1 + \frac{7}{8}(2 + 1) = \frac{29}{8}. \quad (6)$$

В формуле 6 первое слагаемое обусловлено фотонами, второе электронами и позитронами, а третье электронным нейтрино. Таким образом, можно получить, что температура отцепления нейтрино $T = 0.93$ МэВ.

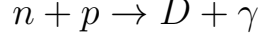
Одним из важных следствий отцепления нейтрино заключается в том, что когда характерное время слабого взаимодействия превышает космологическое время, β - процессы, в которых протоны преобразуются в нейтроны и нейтроны в протоны выходит из равновесия и происходит закалка количества протонов и нейтронов.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

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

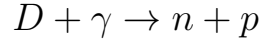
Разность масс протона и нейтрона в Зеркальной Вселенной равны нулю, поэтому на ранних стадия количество протонов и нейтронов должны быть равны. А так как в рассматриваемой модели нейтрон также как и протон является стабильной частицей, отношения $\frac{n}{p} = 1$ останется постоянным.

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 образовать 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:

$$X_D(T_{NS}) \sim \eta_b \left(\frac{2.5 T_{NS}}{m_p} \right)^{\frac{3}{2}} e^{\frac{\Delta D}{T_{NS}}} \sim 1 \quad (8)$$

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

$$\Delta D = m_n(Z + N) - m_D = 939.6 * 2 - 1875,6 = 3.6 \text{ МэВ}, \quad (9)$$

Подставляя барион-фотонное отношение $\eta_B \sim 0.6 \cdot 10^{-9}$ и энергию связи дейтерия в формулу 8 получим:

$$T_{NS} \sim 108 \text{ кэВ} \quad (10)$$

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

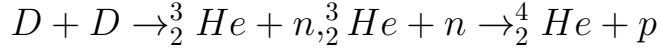
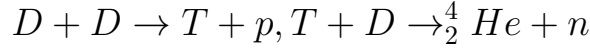
$$\Gamma_{p(n\gamma)D} = n_{p,n} \langle \sigma_{p(n\gamma)D} v_{np} \rangle_{p(n\gamma)D} = \eta_B \frac{2\zeta(3)}{\pi^2} T^3 \langle \sigma_{p(n\gamma)D} v_{np} \rangle_{p(n\gamma)D} \approx 1.7 c^{-1}, \quad (11)$$

где $\langle \sigma_{p(n\gamma)D} v_{np} \rangle_{p(n\gamma)D} \approx 6 \cdot 10^{-20} \text{ см}^2/\text{с}$. 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

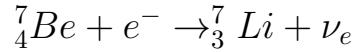
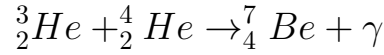
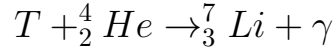
нейтронов происходит очень быстро. Из формулы 11 можно определить концентрацию нейтронов и протонов на момент нуклесинтеза:

$$n_{p,n} \approx 2.8 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3} \quad (12)$$

Образовавшийся дейтерий принимает участие в термоядерных реакциях



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

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

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

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

Оценим также долю свободных нуклонов. Концентрация свободных протонов определяется формулой:

$$n_p(t_{NS}) = n_p(0)e^{-n_n \langle \sigma v \rangle t_{NS}}, \quad (15)$$

где t_{NS} определяется формулой:

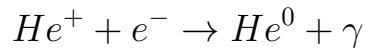
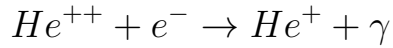
$$t_{NS} = \frac{1}{2H(T_{NS})} \approx 43c. \quad (16)$$

Массовая доля свободных протонов и нейтронов может быть выражена формулой:

$$X_p = \frac{n_p(t_{NS})}{1 + \frac{e^-}{n_p(0)}} \approx 10^{-32} \quad (17)$$

2.3 Рекомбинация Гелия

В Зеркальной Вселенной рекомбинация будет происходить преимущественно с гелием из-за того, что его массовая доля в Зеркальной Вселенной составляет 100 %. Гелий имеет два электрона и рекомбинирует в две стадии:



Энергии ионизации составляют 54,4 и 24,6 эВ, соответственно. Это больше чем ионизация водорода, поэтому гелий рекомбинирует раньше. He^{++} рекомбинирует в He^{+} при $z = 5800$. Скорость реакции достаточно высока, чтобы эта рекомбинация протекала в равновесии. Вторая рекомбинация гелия сложнее. Уравнение Саха предсказывает, что He^{+} рекомбинирует в He^0 при $z = 2500$. Однако эта рекомбинация не происходит в соответствии с уравнением Саха. Вычисления являются достаточно трудоемкими, поскольку требуют анализа формы линий [5] и рассеяния излучения.

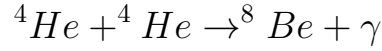
Образование крупномасштабной структуры зеркального гелия может играть роль скрытой массы реальной Вселенной. При этом, для сопоставления зеркального гелия с скрытой массой в реальной Вселенной плотность вещества Зеркальной Вселенной должна быть в 5 раз больше.

2.4 Образование вещества

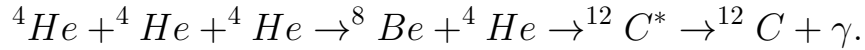
Согласно массовым оценкам первичного вещества все первичные зеркальные звезды будут состоять преимущественно из гелия. Фактически, точные исследования показали [2], что звездная эволюция более быстрый при более высоком начальном содержании H , а при $Y_{He} \approx 1.0$ это может быть на порядки быстрее, чем в стандартном случае $Y_{He} \approx 0.25$ у обычных звезд тех же масс.

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.

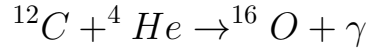
Рассмотрим основную реакцию, которая будет происходить на гелиевой зеркальной звезде.



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



Тройной α -процесс эффективно происходит при температурах ~ 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 ${}^{12}\text{C}$ они начинают вступать во взаимодействие с ${}^4\text{He}$ с образованием ядер ${}^{16}\text{O}$:



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

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

2.5 Стабильность ядер

Для оценки стабильности ядер Зеркальной Вселенной в работе используется полуэмпирическая формула Вайцзеккера¹⁸, с помощью которой можно оценить энергию связи ядра.

$$E_{\text{св}} = a_1 A - a_2 A^{2/3} - a_3 Z^2 / A^{1/3} - a_4 (A/2 - Z)^2 / A + a_5 / A^{3/4} \quad (18)$$

Входящие в формулу коэффициенты a_1 , a_2 , a_2 , a_3 , a_4 , a_5 оцениваются из экспериментальных данных по энергиям связи ядер. Используя формулу 18 можно определить условие, связывающие A и Z для β - стабильных ядер. Для это рассмотрим массу ядра:

$$M = Zm_p + (A - Z)m_n - [a_1 A - a_2 A^{2/3} - \frac{a_3 Z^2}{A^{1/3}} - \frac{a_4 (A/2 - Z)^2}{A} + \frac{a_5}{A^{3/4}}] \quad (19)$$

$$\frac{dM}{dZ} = m_p - m_n + a_3 \frac{2Z}{A^{1/3}} - \frac{2a_4 (A/4 - Z)}{A} = 0, \quad (20)$$

С учетом $m_p = m_n$, получим:

$$Z_0 = \frac{A}{2.0 + 0.015A} \quad (21)$$

Если значение $Z_0 > Z$, то возможен β^+ распад, а при $Z_0 < Z$ возможен β^- распад. При этом необходимо также учитывать условие при котором выгоден β^- распад. В случае β^- распада необходимо наложить условие на массу начальных и конечных ядер:

$$M(A, Z) - M(A, Z - 1) > m_e, \quad (22)$$

с учетом $m_p = m_n$ можно записать:

$$-E_{\text{св}}(A, Z) + E_{\text{св}}(A, Z - 1) > m_e, \quad (23)$$

аналогичное условие для β^+ распада:

$$M(A, Z) - M(A, Z + 1) > m_e, \quad (24)$$

$$-E_{\text{св}}(A, Z) + E_{\text{св}}(A, Z + 1) > m_e, \quad (25)$$

Оценим будут ли стабильными легкие ядра в Зеркальной Вселенной ($Z < 40$). Легкие стабильные ядра имеют приблизительно равные числа нейтронов и протонов. Подавляя значение $A = 2Z$ в выражение 23 получим:

$$\frac{a_3(2Z - 1)}{(2Z)^{1/3}} - \frac{a_4}{2Z} > m_e \quad (26)$$

Из данного условия следуют энергетически выгоден β^- распад для легких ядер с $Z > 10$. Проверим аналогичное условие для β^+ распад, тогда из условия 25 получим:

$$-\frac{a_3(2Z + 1)}{(2Z)^{1/3}} + \frac{a_4}{2Z} > m_e \quad (27)$$

Из данного условия следуют, что энергетически выгоден β^+ распад для легких ядер с $Z < 9$. Из условий 23 и 23 также следует, что изотопы железа ^{54}Fe и ^{56}Fe и изотопы никеля ^{60}Ni и ^{61}Ni являются β^- активными.

3 Заключение

В данной работе была рассмотрена эволюция Зеркальной Вселенной с $m_p = m_n$. В ходе выполнения данной была оценена температура оцепления нейтрино:

$$T = 0.93 \text{ МэВ},$$

данная температура оцепления нейтрино в Зеркальной Вселенной ниже, чем в обычной Вселенной. Оценена скорость горения нейтронов:

$$\Gamma_{p(n\gamma)D} \approx 1.7 \text{ с}^{-1} \text{с}^{-1} \text{с}^{-1} \text{с}^{-1},$$

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

$$T_{NS} \sim 108 \text{ кэВ}.$$

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

Для Зеркальной Вселенной оценена массовая доля гелия, водорода и нуклонов, которая составляет:

$$X_H \approx 0.0, \quad X_{He} \approx 1.0, \quad X_{n,p} \approx 10^{-32}.$$

Сделан вывод о том, что образование крупномасштабных структуры зеркального гелия может играть роль скрытой массы реальной Вселенной. При этом, плотность Зеркальной Вселенной должна быть в 5 раз больше обычной.

Основываясь на результатах оценки массовой доли первичного вещества сделан вывод о том, что зеркальные звезды состоят преимущественно из гелия, время их жизни 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.

С использованием полуэмпирической формулы Вайцеккера была определена зависимость Z от A для Зеркальной Вселенной. Было показано, что легкие ядра, для которых выполняется условие $A = 2Z$ являются β активными при $Z > 10$, и $Z < 9$. Было также показано, что некоторые стабильные в обычной Вселенной изотопы железа и никеля являются β активными в Зеркальной Вселенной.

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. Evolutionary and structural properties of mirror star MACHOs / Z. Berezhiani [и др.] // Astropart. Phys. — 2006. — Т. 24. — С. 495—510.
3. Experimental Test of Parity Conservation in Beta Decay / C. S. Wu [и др.] // Phys. Rev. — 1957. — Февр. — Т. 105, вып. 4. — С. 1413—1415.
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. *Switzer E. R., Hirata C. M.* Primordial helium recombination. 1. Feedback, line transfer, and continuum opacity // Phys. Rev. D. — 2008. — Т. 77. — С. 083006.
6. *А. Д. Сахаров.* Нарушение СР-инвариантности. С-асимметрия и барионная асимметрия Вселенной // УФН. — 1991. — Т. 161. — С. 61—64.
7. *Ландау Л. Д.* О законах сохранения при слабых взаимодействиях // ЖЭТФ. — 1957. — Т. 32 405.
8. *Ожунь Л. Б., Кобзарев И. Ю., Померанчук И. Я.* О возможности экспериментального обнаружения зеркальных частиц // ЯФ. — 1966. — Т. 3 1154.