НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

«МОСКОВСКИЙ ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»

КАФЕДРА №40 «Физика элементарных частиц»

Реферат по курсу космомикрофизики

на тему

«ЗЕРКАЛЬНЫЙ МИР

 $m\_{p}-m\_{e}<m\_{n}<$ $m\_{p}$»

Выполнил: студент группы Т9-40

Зайцев А. С.

Преподаватель: Хлопов М. Ю.

Москва

2015 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

[Введение 3](#_Toc280556611)

[Основная часть.](#_Toc280556612) 5

[Заключение](#_Toc280556615) 13

[Список литературы 1](#_Toc280556616)4

**ВВЕДЕНИЕ**

 По данным экспериментов PLANK и WMAP, только около 4,9 % массы Вселенной составляет обычная барионная материя. Приблизительно 26,8 % приходится на невидимую небарионную тёмную материю, которую можно зарегистрировать по гравитационным эффектам, таким как гравитационное линзирование и высокая скорость вращения периферических частей галактик [1]. Одной из важнейших задач космомикрофизики на данный момент является определение кандидатов на роль скрытой массы [2]. Возможным кандидатом является зеркальное вещество – вещество, состоящее из зеркальных частиц.

 В 1956 году была опубликована статья Ли и Янга, в которой рассматривалось нарушение P-четности и предлагался эксперимент по ее обнаружению [3]. Кроме того, в этой работе была впервые выдвинута гипотеза о существовании зеркальных партнеров частиц. После экспериментального подтверждения нарушения P-четности в слабых взаимодействиях (опыт Ву, 1957 [4]) Ландау, Ли и другие выдвинул гипотезу о строгом сохранении CP-четности [5]. На роль зеркальных партнеров частиц Ландау предлагал их античастицы. Однако эта гипотеза не подтвердилась – Фитч, Кронин, Кристонсен и Турле экспериментально обнаружили нарушение CP-четности в распаде $K\_{2}^{0}$-мезона [6].

И. Ю. Кобзарев, Л. Б. Окунь и И. Я. Померанчук в статье 1966 года «О возможности экспериментального обнаружения зеркальных частиц» [7] показали, что зеркальные частицы не могут взаимодействовать с частицами обычного мира посредством сильного и электрослабого взаимодействия. Таким образом, для описания зеркальных частиц необходимо расширить Стандартную модель, например, до группы $[U(1)⨂SU(2)⨂SU(3)]\_{O}⨂[U(1)⨂SU(2)⨂SU(3)]\_{M}$, что приводит к существованию зеркальных бозонов, аналогичных бозонам обычного мира. Зеркальные частицы с обычными могут взаимодействовать гравитационно, кроме того возможно кинетическое смешивание бозонов обычного мира с бозонами зеркального [8], смешивание нейтрино [9].

Если гипотеза о существовании зеркальной материи верна, то следует отметить, что в Солнечной системе доля зеркального вещества по отношении к обычному невысока. Зеркальное вещество должно образовывать структуры, такие как планеты или звезды. Но существование таких структур в Солнечной системе было бы замечено в результате их гравитационного взаимодействия с обычным веществом. Однако не отрицается возможность существования зеркальной планеты внутри Солнца с массой $M< 10^{-6}M\_{⨀}$ – она может образоваться в результате аккреции зеркального газа [10].

**ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ**

 Современные экспериментальные данные дают следующие значения для масс протона, нейтрона и электрона [11]:

$m\_{p}=938.272 \frac{MeV}{c^{2}}$

$m\_{n}=939.565 \frac{MeV}{c^{2}}$

$m\_{e}=0.510999 \frac{MeV}{c^{2}}$ (1)

 Возможен распад нейтрона по слабому взаимодействию:

$n \rightarrow p+ e^{-}+ \tilde{ν}\_{e}$. (2)

В данной работе рассматривается модель зеркального мира со следующим соотношением масс протона, нейтрона и электрона:

$m\_{p}-m\_{e}<m\_{n}< m\_{p}$. (3)

 Гипотеза о существовании зеркального мира предполагает наличие зеркальных партнеров для всех известных частиц и античастиц. Таким образом, в данной модели имеются следующие зеркальные частицы: 6 лептонов, 6 антилептонов, 6 кварков, 6 антикварков, 8 глюонов, 3 бозона слабого взаимодействия, фотон, бозон Хиггса. Считаем, что за счет ненулевой массы нейтрино, возможен переход из левых нейтрино обычного мира в зеркальные правые нейтрино.

 Гипотеза зеркального мира сама по себе не решает проблему инфляции и бариогенезиса, однако зеркальная материя является одним из возможных кандидатов в скрытую массу.

 Для зеркальных партнеров CP-нарушающие эффекты должны иметь противоположный знак, что приводит к избытку зеркальных античастиц по отношению к зеркальным частицам, в предположении, что в зеркальном мире имеет место механизм, аналогичный механизму генерации барионного избытка в обычном мире. Однако следует отметить, что в отсутствии электрослабых и сильных взаимодействий между частицами разной зеркальности, имеется свобода в выборе знака барионного числа. В таком случае, можно условно считать, что в зеркальном мире наблюдается избыток барионов по отношению к антибарионам, как и в обычном мире. (Если же считать, что барионное число частицы равно барионному числу её зеркального партнёра, то можно условно считать, что в обычном мире античастицы имеют отрицательное барионное число, тогда как в зеркальном мире – положительное).

 В данной модели самым легким барионом является нейтрон (считаем, что в зеркальном мире кварки (лептоны) второго и третьего поколений тяжелее кварков (лептонов) первого поколения). Значит, распад нейтрона на другие барионы запрещен законом сохранения энергии.

 Легчайшей частицей с зарядом +1 в данной модели является позитрон, откуда следует, что наиболее энергетически выгодным является распад

$p \rightarrow n+ e^{+}+ ν\_{e}$ (4)

Но он также невозможен в виду закона сохранения энергии:

$m\_{p}<m\_{e}+m\_{n}$. (5)

 Распады протона и нейтрона, не содержащие в конечном состоянии барионов, запрещены, так как в них не сохраняется барионное число. Таким образом, в данной модели зеркального мира нейтрон и протон являются стабильными частицами.

 На самой ранней стадии развития Вселенной термодинамическое равновесие между нейтронами и протонами поддерживается следующими реакциями:

$$n+ ν\_{e } \rightarrow p+ e^{-} $$

$p+ e^{-} \rightarrow n+ ν\_{e} $ (6)

 Эти реакции прекращаются при температуре закалки Tn, которую можно найти следующим образом. Время свободного пробега нейтрона по отношению к реакциям (6) можно оценить из размерных соображений:

$τ\_{n\leftrightarrow p}^{-1}= Γ\_{n}= C\_{n}G\_{F}^{2}T^{5},$ (7)

где $C\_{n}$ - константа, порядка единицы. Процессы (6) прекращаются, когда время $τ\_{n}$ становится порядка хаббловского времени:

$Γ\_{n}\left(T\right) \~ H\left(T\right)=\frac{1.66 T^{2}\sqrt{g\_{\*}}}{M\_{Pl}}$, (8)

причем число ультрарелятивистских степеней свободы равно

$g\_{\*}=2+ \frac{7}{8}∙4+ \frac{7}{8} ∙2 ∙3$ (9)

 Из формул (7), (8) и (9) получаем температуру, при которой прекращают протекать реакции (6). Численное значение Tn ~ 1.4 МэВ. Подставляя это значение в уравнение Саха, можно получить отношение числа нейтронов к числу протонов на момент закалки:

$\frac{n\_{n}}{n\_{p}}= (\frac{m\_{n}}{m\_{p}})^{\frac{3}{2}} exp(- \frac{m\_{n} - m\_{p}}{T\_{n}})$ (10)

 Из (3) следует, что $m\_{p}- m\_{n}<m\_{e}$. Если считать, что массы частиц и их зеркальных партнеров примерно равны, то

$(\frac{m\_{n}}{m\_{p}})^{\frac{3}{2}} ≈1$ (11)

$0<m\_{p}- m\_{n}<0.5 МэВ$ (12)

 Таким образом, отношение числа нейтронов к числу протонов лежит в следующих пределах:

$1< \frac{n\_{n}}{n\_{p}}<1.44$ (13)

 Поскольку и нейтроны, и протоны в данной модели являются стабильными, это отношение в дальнейшем изменяться не будет. Как видно из отношения (13), имеется избыток зеркальных нейтронов.

 Цепочки термоядерных реакций в ранней Вселенной начинаются с образования дейтерия:

$p+n \rightarrow D+ γ$, (14)

после чего практически все протоны переходят в наиболее сильно связанное ядро 4He. Массовую долю 4He можно оценить по следующей формуле:

$X\_{He}= \frac{m\_{He}∙n\_{He}}{m\_{p}∙(n\_{p}+ n\_{n})}$ (15)

${m\_{He}}/{m\_{p} ≈4}$. (16)

 Поскольку протоны и нейтроны являются стабильными в данной модели, их концентрации не изменяются со временем. Считая, что практически все протоны перешли в 4He, получаем, что

$n\_{He}=0.5 n\_{p}$ (17)

$X\_{He}= \frac{2}{\frac{n\_{n}}{n\_{p}}+ 1} \in (0.82, 1)$. (18)

 Массовая доля свободных нейтронов в таком случае составляет

$X\_{n}= \frac{n\_{n}- n\_{p}}{n\_{n}+ n\_{p}} \in (0, 0.18)$. (19)

 Таким образом, в данной модели зеркального мира будут образовываться звезды, состоящие из 4He и нейтронов. В этих звездах в реакциях горения гелия и последующем подхвате α-частиц будут образовываться так называемые Nα-элементы (8Be, 12C, 16O, 20Ne, 24Mg, 28Si). В дальнейших реакциях горения Nα-элементов и в реакциях захвата нейтронов могут образовываться ядра, отличающиеся по своему нуклонному составу от ядер обычного мира.

Используя капельную модель ядра, оценим возможность протекания β-распадов некоторых ядер. Полуэмпирическая формула Вайцзеккера для энергии связи ядра имеет вид:

$E\_{св}= a\_{1}A- a\_{2}A^{2/3}- a\_{3}Z^{2}A^{-1/3}- a\_{4}(A-2Z)^{2}A^{-1}+ a\_{5}A^{-1/2}$ (20)

Коэффициенты имеют следующие значения в МэВ:

$$a\_{1}=15.67$$

$$a\_{2}=17.23$$

$$a\_{3}=0.75$$

$a\_{4}=93.2$ (21)

для четно-четных ядер: $a\_{5}=12$

для нечетно-нечетных: $a\_{5}=-12$

для ядер с нечетным A: $a\_{5}=0$

β+-распад $\left(A,Z\right)\rightarrow \left(A, Z-1\right)+ e^{+}+ ν\_{e}$ является энергетически выгодным при выполнении следующего условия:

$M\_{(A, Z)}- M\_{(A, Z-1)}>2m\_{e}$ (22)

$m\_{p}- m\_{n}- E\_{св (A, Z)}+ E\_{св (A, Z-1)}>2m\_{e}$ (23)

Полагая в рассматриваемой модели зеркального мира $m\_{p}- m\_{n} ≈ m\_{e}$, получаем условие возможности протекания β+-распада:

$a\_{3}\left(2Z-1\right)A^{-\frac{1}{3}}+ 4a\_{4}\left(2Z-A-1\right)A^{-1}-2a\_{5 (A,Z)}A^{-1/2}> m\_{e}$ (24)

Аналогично, для β--распада получаем условие:

$-a\_{3}\left(2Z+1\right)A^{-\frac{1}{3}}+ 4a\_{4}\left(A-2Z- 1\right)A^{-1}-2a\_{5 (A,Z)}A^{-1/2}>3m\_{e}$ (25)

Используя полученные выражения, можно получить, что ядра со значительным избытком нейтронов или протонов могут испытывать β- или β+-распад соответственно. Для ядер углерода, например, расчет предсказывает β-радиоактивность всех изотопов, кроме 12С и 13С, для азота – кроме 14N и 15N, для кальция – кроме 40Ca, 41Ca и 42Ca.

Помимо β-распадов, ядра в данной модели могут испытывать α-распады, спонтанное деление. Следует также отметить, что энергетические уровни ядер в данной модели отличаются от обычного мира ввиду различия в массах нуклонов, что приводит к изменению скоростей протекания реакций.

 Так как Вселенная расширяется, не все протоны могли быть захвачены ядрами дейтерия ($p+n \rightarrow D+ γ$) с последующим образованием гелия. Оценим концентрацию свободных протонов. Для этого найдем сначала температуру, при которой происходит нуклеосинтез. Её можно оценить из следующего соотношения:

$X\_{D}\left(T\_{NS}\right) ≈ η\_{B}(\frac{2.5 T\_{NS}}{m\_{p}})^{3/2}e^{{Δ\_{D}}/{T\_{NS}}} \~ 1$, (26)

где барион-фотонное отношение $η\_{B} \~ 10^{-9}$, $Δ\_{D}$ - энергия связи дейтерия. Считая, что массы нуклонов в данной модели отличаются от масс нуклона в обычном мире незначительно, положим энергию связи дейтерия равной 2 МэВ. Тогда получаем

$T\_{NS}≈60 кэВ.$ (27)

 Концентрация протонов на момент нуклеосинтеза в таком случае дается выражением:

$n\_{p}= η\_{B}\frac{2 ς(3)}{π^{2}} T\_{NS}^{3}≈4∙10^{18} см^{-3}.$ (28)

 Используя оценку сечения реакции (14)

$(συ)\_{p\left(n,γ\right)D} ≈6∙10^{-20} \frac{см^{3}}{с}$, (29)

найдём скорость горения нейтронов, умножая сечение реакции на концентрацию частиц

$Γ\_{p\left(n,γ\right)D}= n\_{p}∙(συ)\_{p\left(n,γ\right)D} ≈0.24 с^{-1}$ (30)

Полученное значение скорости реакции значительно превышает темп расширения Вселенной при температуре нуклеосинтеза:

$H\left(T\_{NS}\right)$ = $\frac{1.66 T\_{NS}^{2}\sqrt{g\_{\*}}}{M\_{Pl}}≈3.5∙10^{-3}c^{-1}$ (31)

Для концентрации свободных протонов поучаем следующее выражение:

$n\_{p}\left(t\right)= n\_{p}\left(0\right)∙ e^{-n\_{n}∙(συ)∙t}$, (32)

где

 $t= t\_{NS}= \frac{1}{2 H(T\_{NS})} ≈142 c$. (33)

 Окончательно находим массовую долю свободных протонов, которые могут образовывать атомы водорода:

$X\_{p}= \frac{n\_{p}(t)}{n\_{p}\left(0\right)+ n\_{n}}= \frac{e^{-n\_{n}∙(συ)∙t}}{1+ {n\_{n}}/{n\_{p}(0)}} ≈ 10^{-22} ÷ 10^{-15}$. (34)

Большой разброс массовой доли свободных протонов вызван сильной зависимостью экспоненциального множителя в выражении (34).

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

 В данной работе была рассмотрена модель зеркального мира с отношением масс нуклонов $m\_{p}-m\_{e}<m\_{n}< m\_{p}$. Были установлены следующие свойства зеркального мира:

* вследствие симметричности начальных условий для обычного мира и зеркального, в зеркальном мире будет наблюдаться барион-антибарионная асимметрия;
* в зависимости от разности масс $m\_{p}- m\_{n}$ массовые доли 4He, свободных нейтронов и свободных протонов лежат в интервалах:

$X\_{He}\in \left(0.82, 1\right)$,

$X\_{n}\in (0, 0.18)$,

$X\_{p}\in (10^{-22}, 10^{-15} )$;

* в данной модели образуются звезды, состоящие из гелия и нейтронов, в которых протекает синтез более тяжелых ядер с отличным от обычного мира нуклонным составом;
* ядра с избыточным количеством нейтронов или протонов могут испытывать β-распады.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. P. A. R. Ade et al. (Planck Collaboration) - «Planck 2013 results. I. Overview of products and scientific results – Table 9». Astronomy and Astrophysics 1303: 5062, 2013
2. М. Ю. Хлопов - «Основы космомикрофизики» М.: УРСС, 2004.
3. T. D. Lee, C. N. Yang «Question of Parity Conservation in Weak Interactions», Physical Review, 104, 254–258, 1956
4. C.S. Wu, E. Ambler, R.W. Hayward, D.D. Hoppes, R.P. Hudson, "Experimental Test of Parity Conservation in Beta Decay", Phys. Rev. 105, 1413 – 1957.
5. Л.Д. Ландау, «О законах сохранения при слабых взаимодействиях», ЖЭТФ, 1957.
6. J.H. Christenson, J.W. Cronin, V.L. Fitch, R. Turlay, “Evidence for the 2π decay of the $K\_{2}^{0}$ meson”, Phys. Ref. Lett. 13, 138 – 1964.
7. И. Ю. Кобзарев, Л. Б. Окунь, И. Я. Померанчук, «О возможности экспериментального обнаружения зеркальных частиц», Советский журнал ядерной физики, 3, 837 ,1966
8. R. Foot, A. Yu. Ignatiev, R. R. Volkas, “Physics of mirror photons”, Phys. Lett., vol. B480, p.171 – 2000.
9. Z.G. Berezhiani, R.N. Mohapatra, “Reconciling present neutrino puzzles: Sterile neutrinos as mirror neutrinos”, Phys. Rev. D, vol. 52, no. 11, pp. 6607-6611, 1995
10. C.И. Блинников, М.Ю. Хлопов, “О возможных астрономических проявлениях "зеркальных" частиц”, Астрон. журн. 1983, Т. 60, С.632
11. J. Beringer et al., Particle Data Group, Phys. Rev. D86, 2012
12. Д.С. Горбунов, В.А. Рубаков, “Введение в теорию ранней вселенной”, 2006
13. Я.Б. Зельдович, И.Д. Новиков, “Строение и эволюция Вселенной”, Наука, 1975.
14. Л.Д. Ландау, Е.М. Лившиц, “Теоретическая физика V: Статистическая физика”, 2001.
15. Л.Д. Ландау, Е.М. Лившиц, “Теоретическая физика IV: Квантовая электродинамика”, 2001.
16. В.А. Рубаков, «Классические калибровочные поля» - М.: Эдиториал УРСС, 1999.
17. Н.Н. Боголюбов, Д.В. Ширков, «Введение в теорию квантованных полей», 4-е изд., испр. – М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1984.
18. Проект кафедры общей ядерной физики физического факультета МГУ «Ядерная физика в Интернете» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https:// http://nuclphys.sinp.msu.ru/, свободный (8.01.2015).