

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

КАФЕДРА №40

Реферат по космомикрoфизике на тему:

Теневой мир

с двумя поколениями фермионов.

Выполнил студент группы Т01-40Б

Пономаренко Д. Е.

Москва 2013

Целью данной работы является оценка возможности существования теневого мира с двумя поколениями фермионов.

1 Введение

В работе Ли и Янга «Вопрос сохранения симметрии в электрослабом взаимодействии» [1] была впервые рассмотрена возможность существования зеркальной материи. Зеркальный мир, состоящий из этой материи, компенсировал предполагаемое нарушение Р-чётности в нашем мире так, что во Вселенной, состоящей из наблюдаемого и зеркального мира, Р-чётность сохранялась.

После экспериментального обнаружения в опыте Ву [2] на ^{60}Co нарушения Р-симметрии в бета-распаде на роль зеркальных партнёров обычных частиц были предложены их античастицы, и таким образом была введена комбинированная чётность (СР-чётность) [3], которая считалась сохраняющейся до экспериментального обнаружения СР-нарушения (Кристенсоном, Крониным, Фитчем и Тёрлеем) в 1966 г [4].

Для компенсации СР-асимметрии вновь потребовалось рассмотрение необнаруженных пока зеркальных частиц. В работе «О возможности экспериментального обнаружения зеркальных частиц» (1966 г.) [5] Кобзарев, Померанчук и Окунь показали, что зеркальная материя не может участвовать в обычных, присущих наблюдаемому миру, электромагнитных и сильных взаимодействиях. После открытия Z-бозона стало ясно, что зеркальная материя не может участвовать также и в слабых взаимодействиях, а должна иметь собственные, действующие только между зеркальными частицами.

Изначально предполагалось, что эта материя – копия обычной, т. е. с тем же набором частиц – зеркальных аналогов наблюдаемых, и взаимодействиями, аналогичными обычным, но имеющими обратный знак СР-чётности. В этой работе предполагается, что строение и состав этого мира всё же может отличаться от обычного, т. е. быть «незеркальной», в этом случае такой мир обычно называется тeneвым.

Важное ограничение на зеркальный или теневой мир дают данные о первичном содержании гелия Y_{prim} , т. е. об отношении количества ^4He к количеству всех ядер, образовавшихся к концу первичного (дозвёздного) нуклеосинтеза. Эти данные ограничивают количество любой релятивистской материи (в т. ч. теневой) на момент п/р-заковки ($t \sim 1$ с, $T \sim 1$ МэВ). Так, например, современные оценки [6], основанные на космологическом нуклеосинтезе и реликтовом излучении, составляют, с учётом систематических ошибок (см. Рис. 1):

$23,1\% < Y_{prim} < 26,7\%$, и дают ограничение на число лёгких нейтрино $2,0 < N < 4,5$.

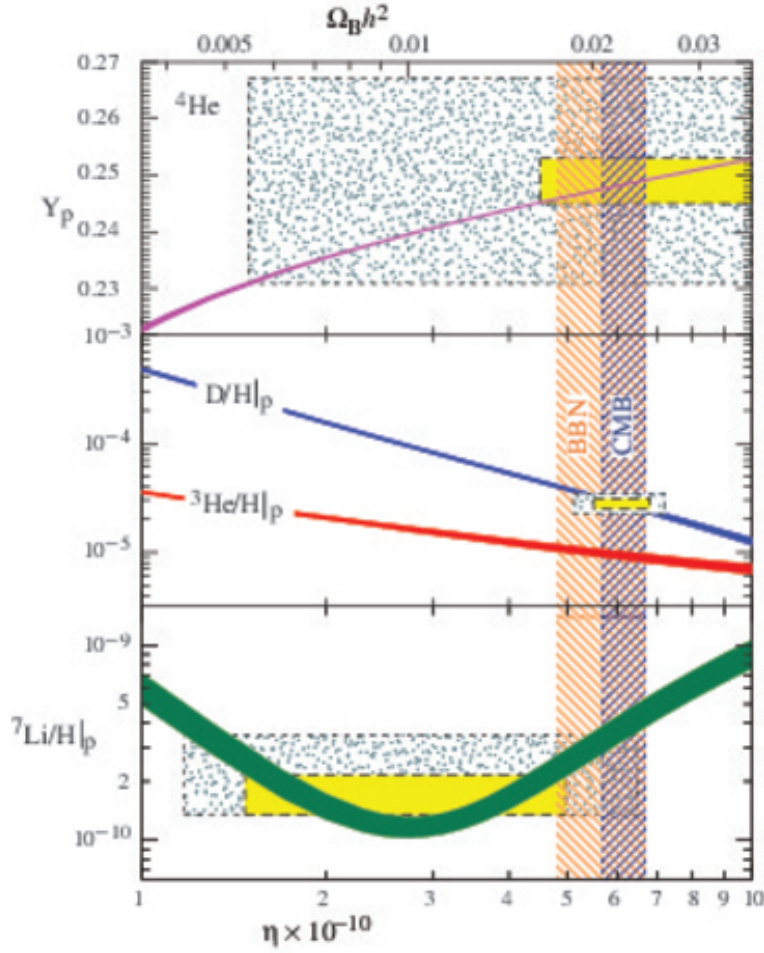


Рис. 1. Относительные содержания первичных химических элементов в зависимости от относительной плотности барионов Ω_B . Толщины линий отражают точность предсказаний. Прямоугольниками показаны области значений в пределах статистических (внутренний) и систематических (внешний) ошибок, полученные из наблюдений. Вертикальные полосы показывают области значений Ω_B , допустимые из анализа первичного нуклеосинтеза (BBN) и реликтового излучения (CMB). Индекс «р» означает первичный (primordial). Изображение взято из [6].

2 Рассматриваемая модель

В данной работе рассматривается теневой мир с двумя поколениями фермионов (в отличие от наблюдаемого, описываемого Стандартной Моделью (SM), с тремя поколениями). Будем полагать, что 2 поколения элементарных частиц этого мира аналогичны (зеркальны) первым двум поколениям частиц SM.

3 Анализ

3.1 Инфляция и бариосинтез

Взаимодействия между зеркальными частицами осуществляются посредством зеркальных калибровочных бозонов. Таким образом, в рассматриваемой Вселенной, кроме обычных

частиц, имеем зеркальные калибровочные бозоны, в частности, зеркальный фотон γ_{mir} . Здесь следует отметить, что нарушения CP-симметрии вводится в Стандартную Модель посредством комплексной фазы в матрице смешивания кварков (СКМ-матрице). Необходимым условием для появления такой фазы и, соответственно, нарушения CP-симметрии является существование по меньшей мере трёх поколений кварков. В случае же двух поколений кварков матрица смешивания не имеет нарушающей CP-симметрию фазы, так как содержит только один параметр – угол смешивания между поколениями кварков (будем считать его в нашем случае равным углу Кабиббо).

Природа инфляции и бариосинтеза может быть описана механизмами, выходящими за рамки данной работы. В то же время, стоит отметить, что в следствии отсутствия CP-нарушения теневого мира, не выполняются все условия Сахарова - Кузьмина и не могло образоваться избытка теневой барионной материи, а так же в теневом мире реализуется зарядовая симметрия. Отсутствие CP-нарушения ставит под сомнение весь смысл введения такого теневого мира, ведь изначально, как отмечалось выше, он должен решать проблему CP-асимметрии в нашем мире.

Возможны следующие варианты для концентрации барионов:

- концентрация барионов в теневом мире такая же, как и в обычном мире.
- концентрация барионов в теневом мире не совпадает с концентрацией в нашем мире.

В последнем случае необходимы следующие дополнительные ограничения:

- 1) После Большого взрыва два сектора были рождены с двумя разными температурами $T_O > T_S$, где T_O и T_S - температура нашего и теневого мира соответственно.
- 2) Два сектора взаимодействуют очень слабо, так что между ними не устанавливается тепловое равновесие после нагрева. Это условие выполняется автоматически, если два мира взаимодействуют только гравитационно. Если существуют другие эффективные связи между обычным и теневым мирами, они должны подавляться.
- 3) Оба сектора расширяются адиабатически, без заметного вклада энтропии.

В случае если все условия выполняются, наличие теневого мира не повлияет на первичный нуклеосинтез в обычном мире.

В дальнейших рассуждениях будем иметь в виду, что в рассматриваемой модели отсутствуют механизмы инфляции и бариосинтеза. Поэтому при анализе космологической эволюции начальные условия расширения, существование горячей стадии ранней Вселенной и величина барионной асимметрии Вселенной постулируются.

3.2 Нуклеосинтез

Число поколений фермионов определяет соотношение между количеством нейтронов и протонов, образующихся в момент дозвездного нуклеосинтеза. Соотношение между количеством нейтронов и протонов в свою очередь, оказывает влияние на концентрацию первичного гелия.

Отношение концентраций нейтронов и протонов дается формулой:

$$\frac{n}{p} = \exp\left(-\frac{\Delta m}{T}\right) \quad (1)$$

$$\Delta m = M_n - M_p = 1,29 \text{ MeV}. \quad (2)$$

,где M_n и M_p - массы нейтрона и протона соответственно, T - температура Вселенной,

В момент времени, когда температура опускается до значения определяемого следующим образом:

$$T_* \approx (kG)^{\frac{1}{6}} / G_F^{\frac{2}{3}} \quad (3)$$

,где G_F - константа Ферми, G - гравитационная постоянная, происходит закалка отношения концентраций нейтронов и протонов. Здесь используется k - статистический фактор характеризующий плотность вселенной, определяющийся как

$$k = 1 + \sum \frac{g_{S(b)}}{2} + \frac{7}{8} \sum \frac{g_{S(f)}}{2} \quad (4)$$

В современном мире $k = 5,375$, $\left(\frac{n}{p}\right) \approx \frac{1}{7}$ и $Y_p = 0.25$.

В рассматриваемой модели, имеем:

$$k' = 1 + \frac{7}{8} \cdot \left(4 \cdot \frac{2}{2}(e) + 5 \cdot 2 \cdot \frac{1}{2}(\nu)\right) = 8.875 \quad (5)$$

Таким образом, температура закали в рассматриваемом сценарии выше чем в существующем мире.

$$\left(\frac{n}{p}\right)' = \exp\left(\frac{\Delta m}{T}\right) \left(\frac{k}{k'}\right)^{\frac{1}{6}} = \left(\frac{n}{p}\right)^{(k/k')^{\frac{1}{6}}} = 0.143^{(0.606)^{1/6}} = 0.167 \quad (6)$$

где k и k' - текущая и при двух поколениях фермионов соответственно. Отсюда имеем

$$Y_p' = \frac{\rho_{He}}{\rho_B} \approx 2 \cdot \frac{n/p}{1 + n/p} = 2 \cdot \frac{0.167}{1 + 0.167} = 0.286 \quad (7)$$

Если же учесть распад 10% нейтронов, получим:

$$\left(\frac{n}{p}\right)' = 0.150 \quad (8)$$

$$Y_p' = 0.261 \quad (9)$$

Итак, полагая, что стандартный мир и теневой развиваются параллельно и абсолютно одинаково, воздействуя друг на друга, делаем вывод, что количество поколений фермионов в теневом мире оказывают влияние на концентрацию ${}^4\text{He}$ и, зная приближённую зависимость первичного гелия от числа сортов нейтрино, видим что результат не согласуется с этими данными. В случае, если теневой мир имеет температуру ниже температуры нашего мира, остаётся возможность для выполнения ограничения концентрации первичного гелия.

3.3 Тёмная материя

Наличие теневого мира не способно объяснить существование всей темной материи во Вселенной. При предположении, что плотность вещества в двух мирах одинакова:

$$\Omega_{DM} \approx 22\% > \Omega_{OM} \approx \Omega_S \approx 4\% \quad (10)$$

,где Ω_{DM} – вклад темной материи в плотность энергии Вселенной, Ω_{OM} – обычной барионной материи, Ω_S – теневого барионного вещества.

Возможный путь решения – сохранение массовых соотношений и увеличение плотности барионов теневого мира. Так, например, введение так называемого кинетического смешивания [7] позволяет без противоречий с наблюдаемыми данными рассматривать возникновение теневого мира с произвольной плотностью (за счёт выбора коэффициента θ перед кинетическим членом в лагранжиане вида $\theta \cdot F_{\mu\nu}^{OM} \cdot F_{\mu\nu}^S$). С помощью такого способа можно даже “создать” теневой мир с плотностью, объясняющей всю современную скрытую массу. Но сказать о том, каким будет химический состав в таком теневом мире, практически не представляется возможным.

Кроме того в работе Роберта Фута [7], проводится анализ экспериментальных данных DAMA, CoGeNT и CRESST-II в рамках модели, которая предполагает возможность существования галактического гало темной материи, состоящего из частиц зеркального мира. Эти частицы образуют многокомпонентную плазму, состоящую из $e^{\pm'}$, H' , He' , O' , Fe' , т.д.. Рис. 2. Это объяснение согласуется с нулевыми результатами других экспериментов, в том числе экспериментов XENON100 and CDMS, когда учтены систематические неопределенности в энергетической шкале [8].

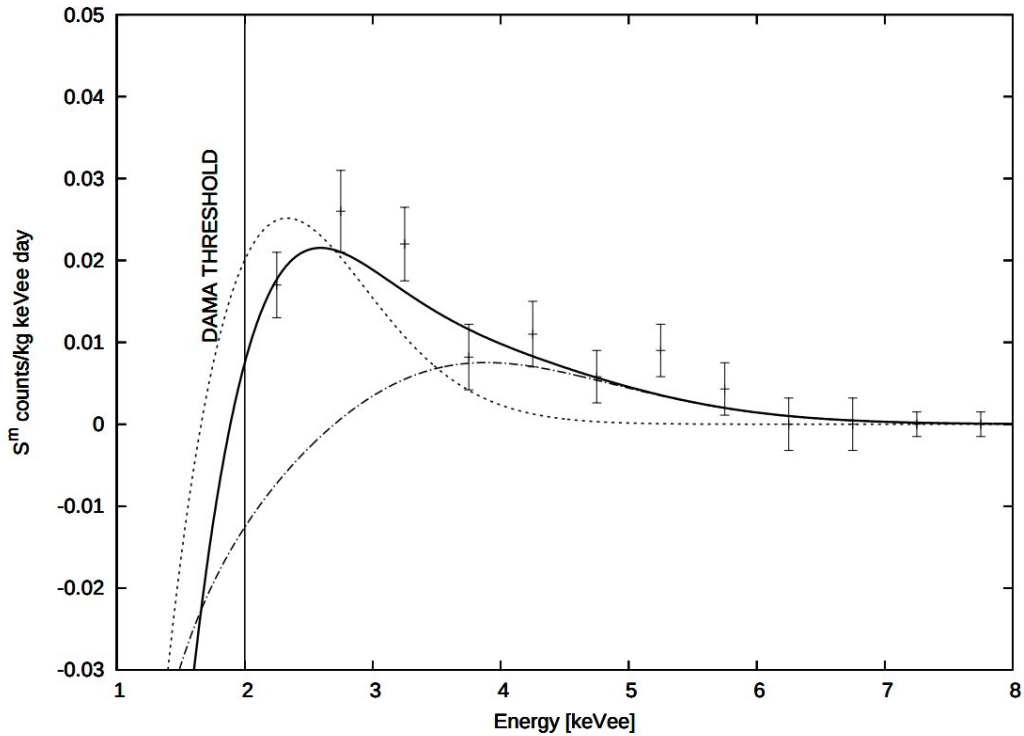


Рис. 2. Годовой спектр DAMA для теневой темной материи.

При полной симметрии нашего и тенеого миров, галактический диск должен содержать равное количество как обычных, так и зеркальных звёзд. Эта локальная скрытая масса в окрестностях солнечной системы должна обладать плотностью не меньше чем видимая, а именно:

$$\rho_{din} \geq 2 \cdot \rho_{vis} \quad (11)$$

, где ρ_{din} и ρ_{vis} - динамическая и видимая плотность вещества.

На основании данных эксперимента HIPPARCOS в 1999 году была произведена оценка этих плотностей [9]

$$\rho_{din} = 0.102 \pm 0.010 \frac{M_{Sun}}{pc^3} \quad (12)$$

$$\rho_{vis} = 0.095 \frac{M_{Sun}}{pc^3} \quad (13)$$

на основании чего был сделан вывод об отсутствии каких либо убедительных доказательств присутствия тёмной материи в галактическом диске.

Попытаться объяснить этот эффект можно следующим образом. Поскольку эволюция зеркальных звёзд происходит в ~ 30 раз быстрее [10], то частые вспышки тeneвых сверхновых подогревают невидимое вещество в галактиках, в результате чего оно образует сферическое гало, в отличии от обычного вещества, формирующего диск [11]. Так, найденные в гало по микролинзированию невидимые объекты МАСНО (Массивные Астрофизические Компактные Объекты Гало) с массами $0.2 - 0.9 M_{Sun}$ подходят на роль зеркальных звёзд, но их количество явно не достаточно, чтобы объяснить всю тёмную материю.

4 Заключение

В данной работе была рассмотрена возможность существования теневого мира с двумя поколениями фермионов, получена оценка доли первичного гелия и сделана попытка объяснить скрытую массу. В её рамках выяснено, что модель теневого мира возможна, если его температура меньше температуры обычного мира. Кроме того, частицы теневого мира могут быть частицами темной материи, если увеличить плотность барионов теневого мира.

Рассмотрены несколько моделей и их экспериментальных проверок используемых для объяснения скрытой массы с помощью теневого мира.

Сама же теория с использованием различных вариаций теневой материи выглядит перспективной для дальнейших попыток объяснения темной материи.

Список литературы

1. Lee T D, Yang C N, Phys. Rev. 104 254 (1956)
2. Chien-Shiung Wu with E. Ambler, R. W. Hayward, D. D. Hoppes, R. P. Hudson, "Experimental test of parity conservation in beta decay", Phys. Rev. 105: 1413 (1957)
3. Ландау Л.-Nucl. Phys., 1957, v. 3, p. 254.
4. Christenson J., Cronin J. W., Fitch V. I. and Turlay R., Phys. Rev. Letters 13, 138 (1964)
5. И. Ю. Кобзарев, Л. Б. Окунь, И. Я. Померанчук, "О возможности экспериментального обнаружения зеркальных частиц.", ("ЯФ", 3 1154, 1966)
6. B. Fields and S. Sarkar, "Big-Bang nucleosynthesis (2006 Particle Data Group mini-review)," astro-ph/0601514.
7. Foot R., "Mirror dark matter explanation of the DAMA, CoGeNT and CRESST-II data." (<http://arxiv.org/pdf/1211.1500.pdf>)
8. Foot R., Phys. Rev. D 86, 023524 (2012)
9. Johan Holmberg¹ and Chris Flynn, "The local density of matter mapped by Hipparcos", (<http://arxiv.org/pdf/astro-ph/9812404v2.pdf>)
10. Z. Berezhiani, S. Cassisi, P. Ciarcelluti and A. Pietrinferni, "Evolutionary and structural properties of mirror star MACHOs," Astropart. Phys. **24** (2006) 495 [astro-ph/0507153].
11. R. Foot and R. R. Volkas, "Spheroidal galactic halos and mirror dark matter," Phys. Rev. D **70** (2004) 123508 [astro-ph/0407522].
12. Fitch Val. L., "The Discovery of Charge Conjugation Parity Asymmetry: Nobel Lecture. Stockholm, December 11, 1980
13. Хлопов М. Ю., "Основы космомикрoфизики", (М.: УРСС, 2004)
14. Емельянов В. М., Белоцкий К. М., "Лекции по основам электрослабой модели и новой физике", (2013)
15. Емельянов В. М., "Стандартная модель и её расширения", (М.: "Физмалит", 2007)
16. Окунь Л.Б., "Лептоны и кварки", (М.: "Наука", 1990)