

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Факультет Экспериментальной и Теоретической физики
Кафедра №40 «Физика элементарных частиц»

Реферат по космомикрoфизике на тему:
«Теневой мир
с двумя поколениями фермионов»

Выполнил:
студент группы Т09-40
Вознюк Никита

Москва, 2013 г.

В работе Ли и Янга «Вопрос сохранения симметрии в электрослабом взаимодействии» (1956 г.) 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 нарушения Р-симметрии в бета-распаде ^{60}Co (опыт Ву) на роль зеркальных партнёров обычных частиц Львом Ландау были предложены их античастицы, и таким образом была введена комбинированная чётность (СР-чётность), которая считалась сохраняющейся до экспериментального обнаружения СР-нарушения (Кристенсоном, Крониным, Фитчем и Тёрлеем) в 1966 г.

Для компенсации СР-асимметрии вновь потребовалось рассмотрение необнаруженных пока зеркальных частиц. В работе «О возможности экспериментального обнаружения зеркальных частиц» (1966 г.) Кобзарев, Померанчук и Окунь показали, что зеркальная материя не может участвовать в обычных, присущих наблюдаемому миру, взаимодействиях (кроме гравитационного), 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. Сейчас предполагается, что строение и состав этого мира всё же может отличаться от обычного, т. е. быть "незеркальной", в этом случае такой мир обычно называется теневым.

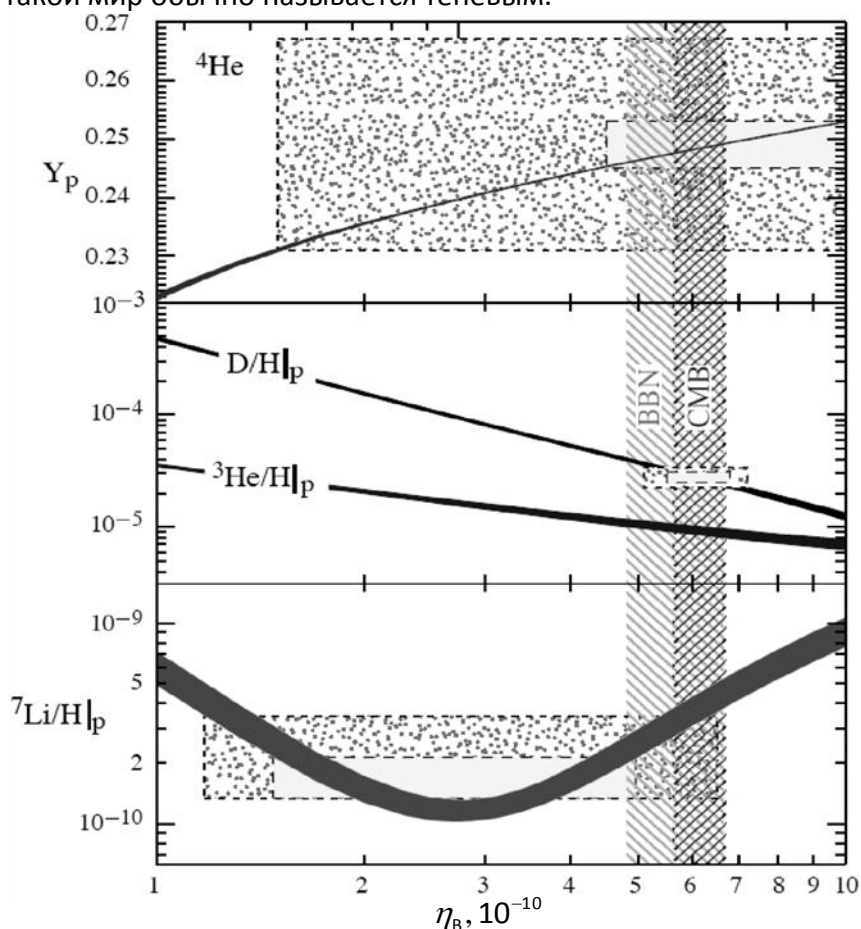


Рис. 1. Относительные содержания первичных химических элементов в зависимости от относительной плотности барионов η_B . Толщины линий отражают точность предсказаний. Прямоугольниками показаны области значений в пределах статистических (внутренний) и систематических (внешний) ошибок, полученные из наблюдений.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

Важное ограничение на зеркальный или теневой мир дают данные о первичном содержании гелия Y_{prim} , т. е. об отношении количества ${}^4\text{He}$ 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-закалки ($t \sim 1 \text{ с}$, $T \sim 1 \text{ МэВ}$).

Так, например, современные оценки, основанные на космологическом нуклеосинтезе и реликтовом излучении, составляют, с учётом систематических ошибок (см. рис. 1):

$$23,1\% < Y_{\text{prim}} < 26,7\%,$$

и дают ограничение на число лёгких нейтрино:

$$2,0 < N_\nu < 4,5.$$

В данной работе рассматривается теневой мир с двумя поколениями частиц (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, т.е. почти все параметры (массы, заряды, сечения взаимодействий, вероятности распада и др.) у соответствующих частиц равны, лишь их спиральности имеют противоположный знак.

Взаимодействия между этими зеркальными частицами осуществляются посредством зеркальных калибровочных бозонов.

Таким образом, в рассматриваемой Вселенной, кроме обычных частиц, имеем зеркальные кварки $\begin{pmatrix} u^{\text{mir}} \\ d^{\text{mir}} \end{pmatrix}$, $\begin{pmatrix} c^{\text{mir}} \\ s^{\text{mir}} \end{pmatrix}$ и лептоны $\begin{pmatrix} \nu_e^{\text{mir}} \\ e^{\text{mir}} \end{pmatrix}$, $\begin{pmatrix} \nu_\mu^{\text{mir}} \\ \mu^{\text{mir}} \end{pmatrix}$, их античастицы, а также 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).

Таким образом в рамках схемы Стандартной Модели в рассматриваемом теневом мире с 2 поколениями фермионов CP-симметрия не нарушается, что делает его неспособным компенсировать наблюдающееся CP-нарушение в обычном веществе. Тем не менее, не исключена возможность существования в теневом мире с двумя поколениями частиц механизма CP-нарушения отличного от Стандартной Модели.

Кроме того, отсутствие CP-нарушения затрудняет (хоть и не исключает) механизм бариосинтеза в теневом мире – генерации избытка теневых барионов над антибарионами. Для описания теневого бариосинтеза без CP-нарушения требуется выход за рамки принципов, используемых для описания наблюдаемого мира.

Проблема инфляции и бариосинтеза (в обычном веществе) в рамках данной модели не рассматриваются.

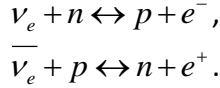
Итак, оценим содержание ${}^4\text{He}$, образовавшегося в результате первичного нуклеосинтеза во Вселенной, включающей обычный и рассматриваемый теневой мир.

К моменту $t = t_* \sim 1 \text{ с}$ (здесь и далее индекс $*$ означает момент закалки) в термодинамическом равновесии находились частицы с массой меньше, чем температура Вселенной ($T = T_* \sim 1 \text{ МэВ}$): все нейтрино, фотоны, а также легчайшие заряженные лептоны.

Пусть на этот момент концентрации n соответствующих частиц равны:

$$n(\nu_e) = n(\nu_e^{\text{mir}}), \quad n(\nu_\mu) = n(\nu_\mu^{\text{mir}}), \quad n(\gamma) = n(\gamma^{\text{mir}}), \quad n(e^\pm) = n(e^{\pm\text{mir}}), \quad n(\nu_{n+p}) = n(\nu_{n+p}^{\text{mir}}).$$

Два состояния нуклона $N = \{n, p\}$ находились в равновесии за счёт реакций:



n/p -отношение при этих условиях: $n(n)/n(p) \equiv n/p = e^{-\Delta m/T}$. $\Delta m = m_n - m_p = 1,29$ МэВ.

Момент выхода из равновесия нуклонов определяется равенством $n_{e,\nu} \langle \sigma_{e,\nu,N} \nu_{e,\nu,N} \rangle = H(t_*)$, где $\langle \rangle$ означает усреднение по тепловому распределению частиц, n – концентрации частиц, σ – сечения равновесных реакций, ν – относительная скорость движения частиц, H – скорость космологического расширения.

$$T_* > m_e > m_\nu, \quad n_{e,\nu,N} \sim T_*^3, \quad \nu_{e,\nu,N} = 1, \quad \langle \sigma_{e,\nu} \nu_{e,\nu} \rangle \sim \langle G_F^2 \Delta E^2 \rangle \sim G_F^2 T_*^2,$$

$H(t_*) = 1/2t_* \sim G^{1/2} \kappa_{e*}^{1/2} T_*^2$, κ_{e*} отвечает за вклад различных частиц в общую плотность энергии ε в момент $t \sim 1$ с.

Отсюда для температуры закалки $T_* \sim \kappa_{e*}^{1/6} G^{1/6} G_F^{-2/3} \propto \kappa_{e*}^{1/6}$.

$$\text{Для наблюдаемой материи } \kappa_{e*}^{\text{obs}} = 1(\nu) + \frac{7}{8} \left(2 \cdot \frac{2}{2} (e^\pm) + 3 \cdot 2 \cdot \frac{1}{2} (\nu\bar{\nu}) \right) = \frac{43}{8}.$$

В случае существования рассматриваемого теневого мира:

$$\kappa_{e*}^{\text{obs+sh}} = 1(\nu) + \frac{7}{8} \left(2 \cdot \frac{2}{2} (e^\pm) + 3 \cdot 2 \cdot \frac{1}{2} (\nu\bar{\nu}) \right) + 1(\nu^{\text{mir}}) + \frac{7}{8} \left(2 \cdot \frac{2}{2} (e_{\text{mir}}^\pm) + 2 \cdot 2 \cdot \frac{1}{2} (\nu^{\text{mir}} \bar{\nu}^{\text{mir}}) \right) = \frac{79}{8}.$$

Нормируя на коэффициент κ_{e*} для обычной материи, получим выражение для за-
калённого n/p -отношения в случае сосуществования наблюдаемого и теневого миров:

$$(n/p)_*^{\text{obs+sh}} = e^{-\frac{\Delta m}{T_*} \left(\frac{\kappa_{e*}^{\text{obs}}}{\kappa_{e*}^{\text{obs+sh}}} \right)^{1/6}} = \left[(n/p)_*^{\text{obs}} \left(\frac{\kappa_{e*}^{\text{obs}}}{\kappa_{e*}^{\text{obs+sh}}} \right)^{1/6} \right]^K = \left[(n/p)_*^{\text{obs}} \right]^K, \text{ где } K = \left(\frac{\kappa_{e*}^{\text{obs}}}{\kappa_{e*}^{\text{obs+sh}}} \right)^{1/6} \approx 0,904.$$

Времени первичного нуклеосинтеза соответствует момент $t = t_D \sim 100$ с, когда температура падает до $T \sim 0,1$ МэВ. При такой температуре для эффективного фоторасщепления образующегося дейтерия энергии фотонов теплового фона недостаточно. При увеличении концентрации D начинается интенсивное образование ^4He в количестве, зависящем от n/p -отношения в этот момент $(n/p)_D$ следующим образом:

$$Y_{\text{prim}} = \frac{2(n/p)_D}{1 + (n/p)_D}.$$

За время $t_D - t_* \sim t_D$ от количества n , существующего на момент t_* , останется $x \approx e^{-t_D/\tau_n} \approx 89\%$ ($\tau_n \approx 880$ с – среднее время жизни n), остальные распадутся с образованием p , поэтому $(n/p)_D = \frac{x}{(n/p)_*^{-1} + 1 - x}$. Т. о. $Y_{\text{prim}} = \frac{2x}{(n/p)_*^{-1} + 1}$, $(n/p)_* = \frac{1}{2x/Y_{\text{prim}} - 1}$, откуда получим окончательное выражение для первичного содержания ^4He в данной модели:

$$Y_{\text{prim}}^{\text{obs+sh}} = \frac{2x}{(2x/Y_{\text{prim}}^{\text{obs}} - 1)^K + 1}$$

Взяв в качестве значения распространённости первичного гелия в наблюдаемом мире $Y_{\text{prim}}^{\text{obs}} = 25\%$, получим $Y_{\text{prim}}^{\text{obs+sh}} = 29\%$.

Итого при наличии данного теневого мира после первичного нуклеосинтеза будет 71% ^1H , 29% ^4He . Концентрации других элементов (^2H , ^3He , ^7Li , ^6Li) пренебрежимо малы.

Полученное значение $Y_{\text{prim}}^{\text{obs+sh}}$ не укладывается в наблюдательные ограничения. Это говорит о том, что существование во Вселенной данного теневого мира маловероятно.

Однако стоит заметить, что в связи с невозможностью напрямую наблюдать первичный гелий, для оценки Y_{prim} используются экстраполяции прямых наблюдательных данных к их догалактическим значениям. Любые экстраполяции являются модельно зависимыми, поэтому существующие оценки не могут безусловно запрещать существования теневого мира с теми или иными свойствами.

Кроме того, можно придумать механизмы, подавляющие вклад зеркальных частиц в космологическую плотность в первую секунду расширения. Возможная реализация такого механизма была предложена в работе [1]. В таком случае существование теневого мира не будет противоречить наблюдаемым данным о первичном содержании гелия.

Другой способ избежать влияния зеркального (теневого) мира на первичный нуклеосинтез рассмотрен в работах Р. Фута, например [2]. Введение так называемого кинетического смешивания позволяет без противоречий с наблюдаемыми данными рассматривать возникновение теневого мира с произвольной плотностью (за счёт выбора коэффициента θ перед кинетическим членом в лагранжиане вида $\theta \cdot F_{\mu\nu}^{\text{obs}} F_{\mu\nu}^{\text{mir}}$). С помощью такого способа можно даже "создать" теневой мир с плотностью, объясняющей всю современную скрытую массу ($\Omega_{\text{DM}} \approx 0,22$). Но сказать о том, каким будет химический состав в таком теневом мире, практически не представляется возможным.

Литература

- [1] Berezhiani Z., Comellic D., Villante F. L. Physics Letters B 503 (2001) 362–375.
- [2] Foot R. Mirror dark matter explanation of the DAMA, CoGeNT and CRESST-II data.
<http://arxiv.org/pdf/1211.1500.pdf>
- [3] Емельянов В. М. Стандартная модель и её расширения.— М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007.
- [4] Емельянов В. М., Белоцкий К. М. Лекции по основам электрослабой модели в новой физике. — М.: МИФИ, 2007.
- [5] Окунь Л. Б. Лептоны и кварки. Изд. 4-е. — М.: Издательство ЛКИ, 2008.
- [6] Перкинс Д. Введение в физику высоких энергий. — М.: Энергоатомиздат, 1991.
- [7] Хлопов М. Ю. Основы космомикрoфизики. — М.: Едиториал УРСС, 2004.