

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ**  
**Федеральное государственное автономное образовательное учреждение**  
**высшего профессионального образования**  
**Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»**

**Институт ядерной физики и технологий (ИЯФит)**  
**КАФЕДРА № 40**  
**«Физика элементарных частиц»**

Реферат  
«Зеркальный мир без слабого взаимодействия:  $U(1) \times SU(3)$ »

Выполнил студент группы М18-115  
Касаткин Денис Дмитриевич

Проверил преподаватель  
Хлопов Максим Юрьевич

Москва - 2018

## Введение

В настоящее время термины «зеркальные частицы», «зеркальная материя» и «зеркальный мир» используют, когда речь заходит о гипотетически скрытом секторе частиц и взаимодействии – скрытой массы. Изначально возможность существования зеркальных частиц была рассмотрена в работе Ли и Янга [1], в которой авторы предположили нарушение пространственной четности. Сохранение пространственной четности, другими словами инверсия координатных осей, приводит к преобразованию поля данной частицы в другое поле, описывающее частицы. Нарушение четности приводит к тому, что лево- и право-ориентированные системы координат становятся неэквивалентными, это было подчеркнуто в статье Ли и Янга. Для восстановления эквивалентности систем координат была выдвинута идея о существовании зеркальных партнеров для всех известных частиц. При этом  $P$ -четность у зеркальных партнеров имеет противоположный знак. Далее на основе идеи о сохранении комбинированной  $CP$ -четности Ландау, Ли и др. предположили, что в качестве зеркальных частиц могут выступать уже известные античастицы. Античастицы соответствовали критерию зеркальных частиц: они полностью симметричны обычным частицам. Таким образом, инверсия системы координат и замена частиц на античастицы приводит к сохранению баланса между правыми и левыми системами. Но с открытием нарушения  $CP$ -четности в распадах каонов, стало ясно, что античастицы не могут выступать в роли зеркальных частиц. Для восстановления симметрии Кобзарев, Померанчук и Окунь постулировали помимо пары «частица – античастица» существование пары «зеркальная частица – зеркальная античастица», тем самым удвоили число частиц [2]. Для различия обычных и зеркальных частиц была введена условная характеристика – число Алисы, а для зеркального отражение —  $A$  – преобразование [3].

В данной модели рассматривается стабильное второе поколение фермионов ( $s$ - и  $c$ - кварки, мюон и антинейтрино мюонное, их античастицы), а также некоторые мезоны и барионы, составленные из этих частиц. Из-за отсутствия слабого взаимодействия не будет наблюдаться нарушение  $C$ - и  $CP$ -

четности, а нейтрино будет принимать участие только в гравитационном взаимодействии. В зарядово-симметричном мире концентрация адронов очень низкая, чтобы образовать отдельные газовые облака.

Как известно, массу адронов составляют кварковый конденсат, кинетическая энергия кварков, напряженность глюонного поля и аномальный вклад [4]. Причем кварковый конденсат вносит наименьший вклад и зависит от механизма Хиггса [5]. Но в зеркальном мире этот механизм отсутствует. А значит, массы кварков будут меньше, и, соответственно, массы адронов тоже будут меньше, чем в мире со слабым взаимодействием. Рассмотрим массы кварков: для s- и c- кварков массы 95 МэВ и 1200 МэВ соответственно — масса, получаемая только от механизма Хиггса; ~500 МэВ и ~1500 МэВ — масса конституентная. Поэтому в дальнейшем будет использоваться масса s-кварка, равная  $m_s=400\text{ МэВ}$  и c-кварка  $m_c=500\text{ МэВ}$  .

Таблица 1 — Стабильные адроны зеркального мира [6]

Частица	Кварковый состав	Масса с механизмом Хиггса, МэВ	Масса без механизма Хиггса, МэВ
$\Omega^-$	sss	1672,5	1200
$\bar{\Omega}^+$	$\bar{s}\bar{s}\bar{s}$		
$\Omega_c^0$	ssc	2695,2	1300
$\bar{\Omega}_c^0$	$\bar{s}\bar{s}\bar{c}$		
$\Omega_{cc}^+$	scc	~3500	1400
$\bar{\Omega}_{cc}^-$	$\bar{s}\bar{c}\bar{c}$		
$\Omega_{ccc}^{++}$	ccc	~4500	1500

$\Omega_{ccc}^{--}$	$\bar{c} \bar{c} \bar{c}$		
$D_s^+$	$c \bar{s}$	1968,3	900
$D_s^-$	$s \bar{c}$		


Мюоны так же, как и кварки, приобретают массу с помощью механизма Хиггса. Но в зеркальном мире мюоны будут безмассовые заряженные частицы, которые будут обладать только кинетической энергией. 

Таблица 2 — стабильные лептоны зеркального мира [6]

Частица	Масса с механизмом Хиггса, МэВ	Масса без механизма Хиггса, МэВ
$\mu^-$	105,7	0
$\mu^+$		
$\nu_\mu$	<1	0
$\bar{\nu}_\mu$		

## Бариосинтез

Во Вселенной наблюдается полное преобладание барионной материи над антибарионной. Точнее антивещество отсутствует в сопоставимых масштабах. Однако, если отсутствует слабое взаимодействие, то есть не происходит распад кварков второго поколения, то не будет нарушение CP-четности.

В оригинальном сценарии существует два канала распада частиц [7]. Применим это для зеркальных кварков [8]:

$$X \rightarrow qq \quad (1),$$

$$X \rightarrow \bar{q}l \quad (2),$$

где  $X$  — вышедшие из равновесия частицы зеркального мира,  $q$  — кварк,  $\bar{q}$  — антикварк, а  $l$  — заряженный лептон.

А также два канала распада для античастиц:

$$X \rightarrow \bar{q}\bar{q} \quad (3),$$

$$X \rightarrow q\bar{l} \quad (4),$$

где  $\bar{q}$  — антикварк, а  $\bar{l}$  — заряженный антилептон.

Из-за CPT инвариантности полные ширины частиц и античастиц будут равны. Однако во вселенной существует CP-нарушения, поэтому относительные вероятности для распадов частиц и античастиц не совпадают. В зеркальном же мире нет CP-нарушения. Обозначим полную вероятность распада за 1. Относительные вероятности распада по каналам (1) и (2):

$$Br(X \rightarrow qq) = r \quad ,$$

$$Br(X \rightarrow \bar{q}l) = 1 - r \quad .$$

Относительные вероятности распада по каналам (3) и (4):

$$Br(X \rightarrow \bar{q}\bar{q}) = \bar{r} \quad ,$$

$$Br(X \rightarrow q\bar{l}) = 1 - \bar{r} \quad .$$

Из-за отсутствия слабого взаимодействия в зеркальном мире вероятность распада по каналу (2) и (4) будет равна 0. А все распады будут проходить по каналам (1) и (3).

Избыток барионов считается по формуле:

$$n_b = (r - \bar{r}) n_X \quad .$$


В барион-несимметричной вселенной с равными концентрациями частиц и античастиц будет наблюдаться избыток частиц и недостаток античастиц. Но в зеркальном мире без слабого взаимодействия этого наблюдаться не будет из-за равных вероятностей распадов по каналам (1) и (3)  $r = \bar{r} = 1$  .

Так как не будет наблюдаться избытка частиц, то все частицы и античастицы аннигилируют друг с другом. Поэтому зеркальный мир со стабильными поколениями кварков никак не повлияет на существование нашей вселенной (при условии, что зеркальный мир будет существовать совместно с нашей вселенной), в которой существует слабое взаимодействие.

## Закалка элементарных частиц

При высоких температурах концентрация кварков и антикварков в зарядово-симметричном мире определяется равновесием [9]:

$$n \equiv n_q = n_{\bar{q}} = n_{\text{равн}} = \sqrt{\frac{2}{\pi^3}} \frac{m^{3/2} (kT)^{3/2}}{\hbar^3} e^{\frac{-mc^2}{kT}},$$

где  $m$  — масса кварка. 

Термодинамическое равновесие осуществляется за счет баланса между аннигиляцией при соударении кварков и антикварков и рождением пар. Введем параметр  $\theta = \frac{kT}{mc^2}$ , который связан с концентрациями фотонов (суммой легких частиц  $\mu^+$ ,  $\mu^-$ ,  $\gamma$ ) и кварков.

$n_\gamma = 10^{41} \theta^3 \text{ см}^{-3}$  — концентрация фотонов. Для расчета использовались массы кварков  $m_c = 500 \text{ МэВ}$  и  $m_s = 400 \text{ МэВ}$  и формулы:

$$r_{\text{равн}} = \theta^{\frac{-3}{2}} e^{\frac{-1}{\theta}};$$

$$4 \sigma_0 c r_{\text{равн}} \theta_1 t_1 n_{\gamma 1} = 1;$$

$$\sigma_0 \approx \frac{\alpha_s^2}{m_q^2}.$$

Рассмотрим три случая:  $\theta = 1$  — плотность кварков была того же порядка, что и плотность легких частиц;  $\theta = 1/40$  — плотность кварков снижалась экспоненциально до этого момента;  $\theta = \frac{kT}{mc^2} = \frac{170}{500} = 34/100$  — плотность кварков в момент начала адронизации.

Таблица 3 — Концентрации кварков при различной температуре (данные для параметра  $\theta$  с-кварка)

	n <sub>i</sub>					
	$\theta = 1$ , $T = 500 \text{ МэВ}$		$\theta = 1/40$ , $T = 38 \text{ МэВ}$		$\theta = 34/100$ , $T = 170 \text{ МэВ}$	
	$n_q$ , $\text{см}^{-3}$	$r = \frac{n_q}{n_\gamma}$	$n_q$ , $\text{см}^{-3}$	$r = \frac{n_q}{n_\gamma}$	$n_q$ , $\text{см}^{-3}$	$r = \frac{n_q}{n_\gamma}$
с-кварк	$1,76 \cdot 10^{46}$	$1,76 \cdot 10^5$	$1,35 \cdot 10^{27}$	$3,06 \cdot 10^{-9}$	$4,57 \cdot 10^{42}$	$4,57 \cdot 10^4$
с-кварк	$1,54 \cdot 10^{46}$	$1,54 \cdot 10^5$	$1,64 \cdot 10^{27}$	$2,95 \cdot 10^{-9}$	$4,28 \cdot 10^{42}$	$4,28 \cdot 10^4$

При температуре  $1500 \text{ МэВ}$  концентрация с- и s-кварков одного порядка, но при температуре  $38 \text{ МэВ}$  концентрация с-кварка и концентрация s-кварка не будут сильно отличаться, так как масса кварков примерно одинаковы. Закалка кварков произойдет при температуре адронизации. Поэтому необходимо рассмотреть закалку стабильных частиц (не распадающихся по электромагнитному и сильному каналам), образовавшихся из с- и s-кварков. Для расчета будут использоваться те же формулы, что и для кварков. Закалка каждого вида частиц будет происходить при разной температуре.

Таблица 4 — Концентрации стабильных частиц и мюонов при различной температуре (данные для параметра  $\theta$  каждой частицы)

	$n_i, \text{ см}^{-3}$	$r = \frac{n_q}{n_\gamma}$	T, МэВ	$\theta$ закалки
$\Omega^-$ - гиперон	$1,03 \cdot 10^{27}$	$\sim 10^{-9}$	30	1/40
$\Omega_c^0$ - гиперон	$1,84 \cdot 10^{27}$		33	
$\Omega_{cc}^+$ - гиперон	$1,52 \cdot 10^{27}$		35	
$\Omega_{ccc}^{++}$ - гиперон	$3,19 \cdot 10^{27}$		38	
$D_s^+$ - мезон	$4,11 \cdot 10^{26}$		23	

Для всех частиц использовалось равновесное сечение, однако сечение частиц, состоящих из кварков одного аромата ( $\Omega^-$  и  $\Omega_{ccc}^{++}$  гипероны) будет меньше. Это объясняется тем, что три кварка должны соединиться в одну частицу, а это менее вероятно, чем образование других частиц.

Концентрации частиц будут одного порядка. Объяснить это можно тем, что массы кварков в зеркальном мире отличаются всего на  $100 \text{ МэВ}$ .



## Взаимодействия частиц

В зеркальном мире без слабого взаимодействия частицы могут распадаться только по электромагнитному и сильному взаимодействию. При таких распадах не будет перехода в другие поколения кварков.

Рассмотрим  $\eta$ -мезон, состоящий из пары  $s\bar{s}$ . Этот мезон может распадаться только по электромагнитному каналу:

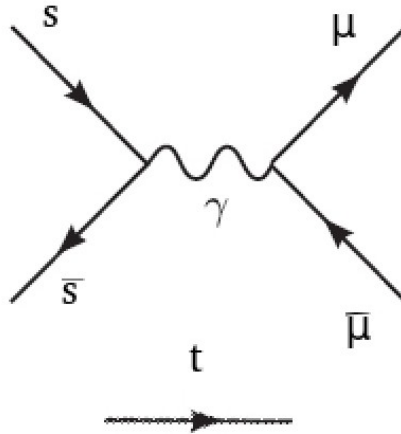



Рисунок 1 — Распад  $\eta$ -мезона

Реакции с  $D_s^\pm(c\bar{s},\bar{c}s)$  мезонами будут проходить, например, по такой схеме:  $D^+ + \Omega_c^0 = \Omega_{cc}^+ + \eta^0$ .

## Заключение

Модель состоящая из стабильных фермионов второго поколения будет включать в себя стабильные мезоны и барионы, приведенные в таблице 1, концентрация которых будет очень низкая. Количества барионов будет недостаточно, чтобы создать скопления, так как гравитационное притяжение, создаваемое между ними, мало. Также частицы такого зеркального мира не могут быть частицами скрытой массы по той же причине гравитационной причине, упомянутой выше. 

### **Список использованных источников**

1. Ли и Янг, «Вопрос о сохранении равенства в слабых взаимодействиях», Phys. Rev., 1956
2. Окунь Л. Б. Зеркальные частицы и зеркальная материя: 50 лет гипотез и поисков //Успехи физических наук. – 2007. – Т. 177. – №. 4. – С. 397-406.
3. Кобзарев И. Ю., Окунь Л. Б., Померанчук И. Я. О возможности экспериментального обнаружения зеркальных частиц //Ядерная физика. – 1966. – Т. 3. – С. 1154-1162.
4. Yi-Bo Yang, Jian Liang, Yu-Jiang Bi, Ying Chen. Proton Mass Decomposition from the QCD Energy Momentum Tensor. Phys. Rev. Lett. 121, 212001 – Published 19 November 2018.
5. Емельянов В. М. Стандартная модель и ее расширения. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007.
6. Particle Data Group Review: <http://pdg.lbl.gov/>
7. Сахаров. А. Д. Нарушение СР-инвариантности, С-асимметрия и барионная асимметрия вселенной. — Академия Наук СССР, 1967.
8. Хлопов М. Ю. Основы космомикрoфизики. – УРСС, 2004.
9. Зельдович Я. В., Новиков И. Д. Строение и эволюция Вселенной. 1975