

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ  
МИФИ)

# Зеркальное вещество при отсутствии слабого взаимодействия



Преподаватель: Хлопов М.Ю.  
Выполнила: Бойко Н.С. (М21-115)

Москва  
2023 г

# Содержание

1. Введение. Начальные условия
2. Эволюция Вселенной в условиях отсутствия слабого взаимодействия в зеркальном мире
3. Звездообразование и скрытый сектор
4. Заключение

# Введение

Терминами "зеркальные частицы", "зеркальная материя" и "зеркальный мир" в настоящее время обозначают гипотетический скрытый сектор частиц и взаимодействий, которые компенсируют зеркальную асимметрию слабых взаимодействий обычных частиц.

Начальные условия:

- Плотность вещества одинаковая для обычного и для зеркального миров
- $T_{\text{обыч}} = T_{\text{зерк}}$  (на момент начала инфляции)
- $f = u, d, e, m_\nu, \tau, \text{neutrino}$  (для зеркального мира)

# Эволюция. Инфляция и бариогенезис

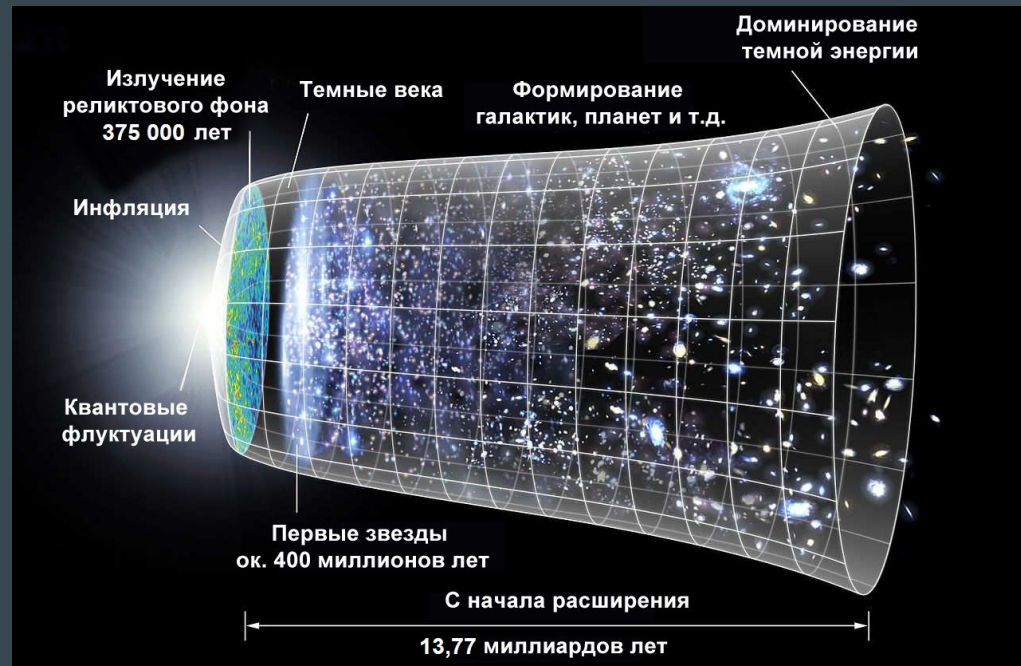
В эпоху инфляции происходит процесс разделения обычного и зеркального миров, где доминирование материи одного из миров зависит от разности амплитуд инфантонов. Предполагаем равномерность плотностей вещества в двух мирах, зеркальный мир не пустой. С частицами обычной материи зеркальные способны взаимодействовать только посредством гравитационных сил.

На момент начала бариогенезиса материя представляет собой кварк-глюонную плазму.

Зеркальное вещество  $\neq$  антиматерия

В обычном мире наблюдается барионная асимметрия, то есть доминирование вещества над антивеществом.

Отделение гравитационной силы.



# Эволюция. Электрослабый фазовый переход

## Обычный мир

Слабое вз. + электромагнитное вз. = электрослабое взаимодействие

Образуется бозон Хиггса, W-бозон и Z-бозон  
(температура опускается ниже  $10^{15}$  ГэВ)

$$M_W \approx 80 \text{ ГэВ}, M_Z \approx 91 \text{ ГэВ} \Rightarrow T_W \approx 100 \text{ ГэВ}$$
$$T > T_W \Rightarrow g_* \sim 100 \Rightarrow t_W = 10^{-11} \div 10^{-10} \text{ сек}$$
$$SU(3)_c \times SU(2)_W \times U(1) \rightarrow SU(3)_c \times U(1)_{em}$$

## Зеркальный мир

Электромагнитное вз.

Образуется только бозон Хиггса  
нет W- и Z-бозов, и поэтому количество релятивистских степеней свободы во время первичного нуклеосинтеза меньше, что приводит к некоторому замедлению расширения  
(температура может несколько отличаться)

$$\rho = g_* \frac{\pi^2}{30} T^4$$
$$g_* = \sum_{\text{бозоны}} g_i + \frac{7}{8} \sum_{\text{фермионы}} g_i$$

# Эволюция. Конфайнмент кварков и образование кваркового конденсата

В этот момент температура равна 300-1000 МэВ, а время от рождения Вселенной составляет  $10^{-6}$  с.

## Обычный мир

1. Конфайнмент кварков - адронизация
2. У кварков появляется масса - кварковый конденсат (нарушения киральной симметрии)



## Зеркальный мир

Некоторые барионы, такие как N, Delta не смогут распасться на более легкие частицы (p, n).

Накопление стабильных нейтронов и тяжелых мезонов.

Лептоны также распадаются только по слабому взаимодействию, следовательно, остаются стабильными и сохраняют концентрацию постоянной.

Разница между массой протона и нейтрона определяется разницей в массах кварков, а также электромагнитным расщеплением. Следовательно, масса вещества в зеркальном мире без слабого взаимодействия такая же, как и в обычном мире.

# Эволюция. Закалка нейтрино и нейтронов

## Обычный мир

Процессы:  $\nu + e \rightleftharpoons \nu + e$     рассеяние  
 $\nu + \nu \rightleftharpoons \nu + \nu$     рассеяние  
 $\nu + \bar{\nu} \rightleftharpoons e^+ + e^-$     аннигиляция

$$\frac{n_n}{n_p} \cong e^{-(m_n - m_p)/T_{n,f}} = e^{-\Delta m/T_{n,f}}$$

Для  $T_{n,f} = 0.75$  МэВ

$$\frac{n_n}{n_p} = e^{-1.3/0.75} \approx 0.18$$

## Зеркальный мир

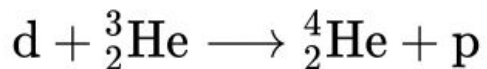
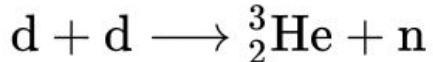
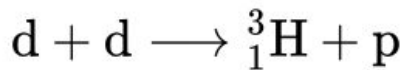
Без слабого взаимодействия, нейтрино не может родиться в аннигиляционных реакциях или рассеяться на  $e$ . Отсюда получаем, что зеркальные нейтрино изначально не присутствует в равновесном состоянии, поэтому оцепления зеркальных нейтрино не происходит. Происходит рождение реликтовых нейтрино и дальнейшее их "остывание" по мере расширения Вселенной.

Для дальнейшего нуклеосинтеза необходимо требование, чтобы доля протонов в зеркальном веществе была больше нейтронов, которые накапливаются не распадаясь.

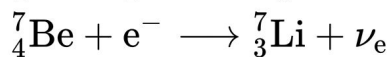
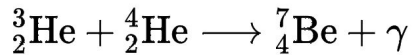
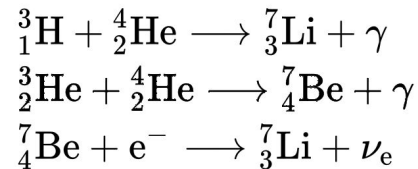
# Эволюция. Нуклеосинтез

## Обычный мир

Когда прошло около 3 минут после Большого взрыва, температура Вселенной стала ниже  $10^9$  К, после этого стало возможно образование стабильных ядер



Некоторая часть ядер гелия-4 сформировала литий. Также в это время в обычной Вселенной формируются ядра бериллия и более тяжёлые ядра в малых количествах. Эти реакции могут протекать как в обычном, так и в зеркальном мире.



## Зеркальный мир

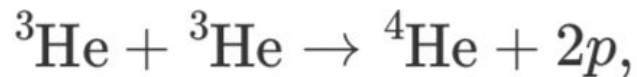
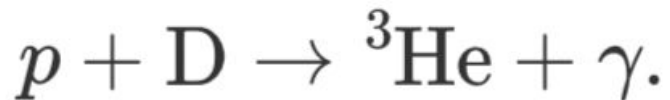
Формируются ядра лития-7 в меньшем количестве, так как реакция с участием нейтрино не будет протекать. Также, можно предположить, что протекание реакций в обеих вселенных будет происходить в разное время, так как в отсутствии нейтринной компоненты скорость остывания зеркального мира увеличивается.

Поскольку множество тяжелых частиц остаются стабильными, то при изначальном равенстве барионной плотности обычного и зеркального вещества, масса зеркального мира будет больше.



# Процесс звездообразования в зеркальном мире

Реакция  $p + n \rightarrow d + \gamma$  оказывается маловероятной в обычном мире, так как в звездной среде на стадии первичного нуклеосинтеза свободные нейтроны отсутствуют, однако в зеркальном мире без слабого взаимодействия могут наблюдаться, в силу их накопления. Тем не менее, в статье (Harnik R., Kribs G. D., Perez G. A universe without weak interaction, 2006) авторы показали, что для начальных условий, где наблюдается доминирование концентрации протонов над нейтронами, синтезированные элементы первичного нуклеосинтеза включали большую долю дейтронов.



где протоны действуют как катализаторы для слияния дейтерия в He-4. Реакция горения дейтерия очень быстрая и, таким образом, может изменить динамику звездного горения в зеркальном мире.

# Зеркальное вещество как скрытая масса

Поскольку некоторые легкие и тяжелые ядра, мезоны, лептоны и нейтрино после рождения нейтральны, то можно предположить, что скорость остывания и расширения Вселенной со стороны зеркального мира будет выше, что и приведет к более быстрому формированию крупномасштабных гравитационных структур и скоплений материи зеркального вещества. Если оно будет выступать в качестве скрытой массы и может взаимодействовать с обычным миром исключительно гравитационно, то в "гравитационные ямы" скрытой массы начнет проваливаться обычное вещество, поскольку, как ранее выяснилось, масса зеркального вещества будет доминировать.

Также необходимо учесть то, что эволюция со стороны обычного мира предположительно протекает медленнее, в связи с чем, обычное вещество будет скапливаться вдоль структур зеркального. Тем не менее, зеркальное вещество мира без слабого взаимодействия не противоречит основным свойствам скрытой массы

# Заключение

Отсутствие слабого взаимодействия в зеркальном мире влечет за собой следующие изменения в эволюции:

- Неравномерная скорость эволюции в двух мирах за счет разницы в степенях свободы при отсутствии переносчиков слабого взаимодействия
- Накопление стабильных нейтронов, что приведет к его доминированию над долей протонов. Поэтому требуется поставить условия на подавление рождения нейтронов для дальнейшего нуклеосинтеза и звездообразования
- Рождаются только реликтовые нейтрино, так как закалки обычных не происходит
- Концентрация лептонов - константа
- Масса зеркального вещества доминирует за счет стабильных тяжелых ядер, мезонов и частиц
- В качестве скрытой массы, зеркальное вещество будет формировать крупномасштабные структуры, которые станут основой для формирования структур в обычном мире.

**Спасибо за внимание!**