

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное автономное учреждение
высшего образования
«Национальный исследовательский ядерный университет
«МИФИ» (НИЯУ МИФИ)

РЕФЕРАТ
ПО КУРСУ "ОСНОВЫ КОСМОМИКРОФИЗИКИ":

Зеркальное вещество при отсутствии электрослабого
взаимодействия

Преподаватель
к.ф.-м.н.

_____ М. Ю. Хлопов

Выполнила

_____ Н. С. Бойко

Москва 2023

Оглавление

1	Введение	2
2	Эволюция ранней Вселенной в условиях "бесслабого" зеркального мира	4
2.1	Стадия инфляции	4
2.2	Бариогенезис	5
2.3	Электрослабый фазовый переход	6
2.4	Конфаймент кварков	6
2.5	Закалка нейтрино	7
2.6	Первичный нуклеосинтез	8
3	Образование звездных структур и темная материя	9
4	Заключение	12
	Список использованных источников	13

1 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, [1], [2]. Зеркальная материя рассматривается как возможная составляющая невидимой темной материи. Впервые о фундаментальных причинах существования зеркальных партнеров упоминалось в статье Ли и Янга, что связывалось с несохранением четности слабых взаимодействий. Например, нейтрино, рождающиеся в результате бета-распада, имеет только одну поляризацию, а электроны в основном вылетают в направлении ядерного спина. При зеркальном отражении этого процесса предполагается, что электроны будут вылетать в предпочтительном направлении, что не наблюдается в природе. Также в статье была рассмотрена теоретическая проблема неэквивалентности лево- и право-ориентированных систем координат. В связи с чем, для решения возникшей проблемы, было выдвинуто предположение, что зеркальные партнеры должны существовать для всех частиц, которые при P-инверсии должны заменять обычные частицы.

Для включения зеркальной материи в модель элементарных частиц к набору калибровочных симметрий стандартной модели добавляется такая же модель, только для зеркального вещества. Однако в данной работе будет рассмотрена модель, где в модели зеркального мира отсутствует слабое взаимодействие, то есть $SU(3) \times U(1)$.

Данное преобразование повлияет на развитие Вселенной, стоит начать с того, что в зеркальном мире, где слабого взаимодействия нет, первые отличия возникнут при электрослабом фазовом переходе, так как именно на данном этапе происходит образование W^\pm - и Z^0 -бозонов — очень массивных элементарных частиц с массами порядка десятков масс протона (на данном этапе они являются безмассовыми). Также, добавим, что нейтрино на последующих стадиях будут стабильными, как и нейтроны, и другие тяжелые частицы. Поэтому начальные условия положим следующие: во-первых, на момент эпохи Великого объединения плотность материи во вселенной в обоих мирах одинакова. Однако, для простоты в состав кварков в зеркальном мире входят только верхний и нижний кварки, а также

весь привычный набор лептонов. Также начальная температура на момент начала инфляции Вселенной одинакова для обычного и зеркального миров.

2 Эволюция ранней Вселенной в условиях "бесслабого" зеркального мира

В данном случае нет особого смысла подробно останавливаться на эпохах Планковской и Великого объединения, поскольку в это время происходит отделение гравитационной силы, а остальные фундаментальные силы - электромагнитная, сильная и слабая - объединены как электрорядерную, что не вносит какого-либо вклада в протекание процессов расширения и остывания Вселенной. Такое разделение сопровождалось фазовым переходом первичной материи, сопровождающийся нарушением однородности ее плотности. Стоит отметить, что по оценкам температура в конце эпохи Великого объединения предполагается равной 10^{16} ГэВ.

2.1 Стадия инфляции

Интерес представляет эпоха инфляции, во время которой Вселенная заполнена преимущественно излучением, где начинают образовываться кварки, электроны, нейтрино, а также гипероны, которые в результате захвата энергий фотонов распадаются. Нейтрино играют роль в процессе образования структур во Вселенной и в формировании спектра анизотропии релятивистского излучения на малых угловых масштабах. Однако, в данном случае зеркального мира нейтрино представляют собой стабильные частицы. Более подробно влияние нейтрино на протекание процессов будет описано ниже.

Согласно источнику [3], одновременно с процессами в обычной Вселенной, в эпоху инфляции, происходит разделение обычной и зеркальной материи, другими словами, в зависимости от различимости амплитуд инфлантонов, то есть гипотетических квантов инфляционного поля, которые ответственны за быстрое расширение Вселенной, приводящих к образованию доменной структуры в распределении обычного и зеркального вещества.

В областях с большей амплитудой обычных инфлантонов доминирующим будет обычное вещество, в то время, как примесь зеркального вещества будет мала. То же самое применимо и к зеркальному веществу при высоких амплитудах зеркальных инфлантов. Однако, даже в случае отсутствия у инфлантонов определенной зеркальности, доменные структу-

ры могут сформироваться в результате случайной локальной асимметрии амплитуд обычного и зеркального скалярных полей, например, во время фазовых переходов, которые будут идти во Вселенных параллельно.

Перед переходом к стадии бариогенезиса, строительный материал Вселенной представляет кварк-глюонную плазму.

2.2 Бариогенезис

Со значительным падением температуры Вселенной начинается процесс объединения кварков и глюонов в адроны. Также именно в данный промежуток времени появляется барионная асимметрия Вселенной, то есть явление доминирования вещества над антивеществом. Наиболее распространенными являются теории, расширяющие стандартную модель так, что в некоторых реакциях возможно более сильное нарушение CP -инвариантности по сравнению с ее нарушением в Стандартной модели. В этих теориях предполагается, что первоначально количество барионного и антибарионного вещества было одинаковым, но позже, по каким-либо причинам из-за несимметричности реакций относительно того, какие частицы-вещества или антивещества-участвуют в них, произошло постепенное увеличение количества барионного вещества и уменьшение количества антибарионного вещества [4].

Другие возможные сценарии возникновения асимметрии привлекают либо макроскопическое разделение областей локализации вещества и антивещества (что кажется маловероятным), либо поглощение антивещества черными дырами, способными отделить его от вещества при условии нарушения CP -инвариантности. Последний сценарий требует существования гипотетических тяжелых частиц, которые распадаются с сильным нарушением CP -инвариантности.

Теория об эквивалентности античастиц и зеркальных партнеров была отклонена в силу необходимости в специальном наборе зеркальных партнеров, не совпадающих с античастицами в силу сохранения эквивалентности между левой и правой координатными системами, в результате CP -нарушения. То есть, в зеркальном мире эффекты CP -нарушения должны быть равны по величине и иметь противоположный знак.

Поэтому формирование барионного избытка обычных частиц и зеркального антибарионного избытка позволяет установить симметрию между

процессами в зеркальном и обычном мирах. Однако, из-за отсутствия знака барионного числа у зеркальных частиц полагается относить его к “барионному” в обоих мирах, другими словами, образования доменов может быть объяснено либо барионным избытком с разными знаками в обычном и зеркальном мирах, либо некоторыми флуктуациями, “энтропийными” возмущениями плотности в локальных распределениях плотностей зеркальных и обычных барионов.

2.3 Электрослабый фазовый переход

Дальнейшее падение температуры привело к следующему фазовому переходу — образованию физических сил и элементарных частиц в их современной форме. В время эпохи электрослабых взаимодействий наблюдается наличие электрослабой силы, которая представляет собой объединенные электромагнитную и слабую. В обычной Вселенной процессы будут происходить без изменений, однако в зеркальной, при условии отсутствия слабого взаимодействия, останется только электромагнитное. Также в данный период образуется бозон Хиггса, W-бозон и Z-бозон (температура опускается ниже 10^{15} ГэВ), последние два из которых не будет в зеркальном мире, как переносчиков слабого взаимодействия. В "бесслабой" вселенной нет W- и Z-бозов, и поэтому количество релятивистских степеней свободы во время первичного нуклеосинтеза меньше, что приводит к некоторому замедлению расширения.

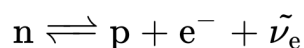
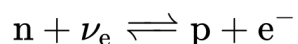
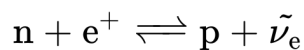
Эпоха кварков не представляет особого интереса для подробного разбора, так как в этот промежуток времени происходит формирование электромагнитной, слабой и гравитационных сил в их современном представлении, а материя по-прежнему представляет собой кварк-глюонную плазму, поэтому есть смысл сразу перейти к эпохе адронов.

2.4 Конфаймент кварков

Данный период характеризуется охлаждением кварк-глюонной плазмы, примечателен момент кварк-адронного перехода или конфайнмента кварков, когда стало возможным слияние кварков в адроны. В этот момент температура равна 300-1000 МэВ, а время от рождения Вселенной составляет 10^{-6} с. Процессы, происходящие в результате первичного нуклеосинтеза представлены ниже. Несмотря на расширение, Вселенная находится в почти идеально равновесном состоянии и включает в заметном

количестве только электроны, позитроны, гамма и нейтрино

В момент времени 0,1 с после Большого взрыва температура Вселенной составляла около $3 \cdot 10^{10}$ К, а её вещество представляло собой электрон-позитрон-нейтринную плазму, в которой в небольшом количестве имелись нуклоны: протоны и нейтроны. В таких условиях происходили постоянные превращения протонов в нейтроны и обратно в следующих реакциях:



Вселенной в 10 секунд, эти реакции практически прекратились, а равновесие перестало сохраняться — в этот момент значение равновесной доли нейтронов от всех нуклонов составило около 0,17. Превращение нейтронов в протоны стало идти посредством бета-распада нейтрона со временем жизни около 880 секунд, и стало убывать экспоненциально: к моменту начала первичного нуклеосинтеза, через 3 минуты после Большого взрыва, снизилось до приблизительно 0,125, то есть на 1 нейтрон приходилось 7 протонов.

В зеркальном мире, в силу отсутствия слабого взаимодействия, некоторые барионы, такие как N, Δ не смогут распасться на более легкие частицы (p, n). Также нейтроны останутся стабильными частицами, как и тяжелые мезоны. Лептоны также распадаются только по слабому взаимодействию, следовательно, также остаются стабильными и сохраняют концентрацию постоянной.

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

2.5 Закалка нейтрино

Нейтрино перестают взаимодействовать с космической плазмой при температуре 2-3 МэВ. До этого момента нейтрино находились в термодинамическом равновесии с остальным веществом, а после него — свободно распространяются во Вселенной.

На первой секунде происходит закалка релятивистских нейтрино в нашем мире. Однако, в зеркальном мире без слабого взаимодействия, нейтрино не может родиться в аннигиляционных реакциях или рассеяться на e , т.к. такие процессы идут по слабому взаимодействию. 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 расширение Вселенной.

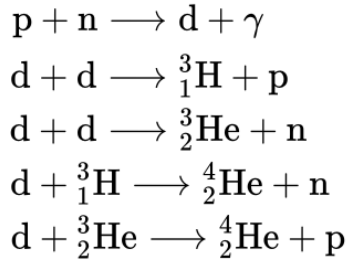
2.6 Первичный нуклеосинтез

Образование элементов происходило в процессе расширения Вселенной, а присутствие нейтринной компоненты влияло на темп расширения и соответственно на скорость остывания космической плазмы. От этой скорости зависели неравновесные процессы в плазме, приводящие к образованию лёгких ядер. Когда прошло около 3 минут после Большого взрыва, температура Вселенной стала ниже 10^9 К. после этого стало возможным образование стабильных ядер дейтерия (дейтронов) при столкновении протонов и нейтронов, практически все из которых в цепи реакций превратились в более стабильные ядра гелия. Таким образом, согласно [5], практически все нейтроны из-за нуклеосинтеза находились в ядрах гелия посредством следующих реакций

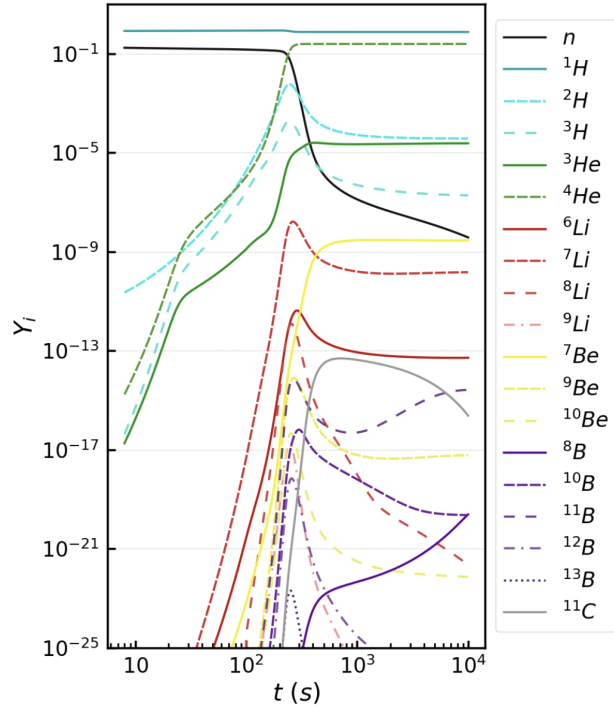
Некоторая часть ядер гелия-4 сформировала литий. Также в это время в обычной Вселенной формируются ядра бериллия и более тяжёлые ядра в малых количествах. Эти реакции могут протекать как в обычном, так и в зеркальном мире.

В зеркальном мире, по сравнению с обычным, 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 увеличится.

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



а



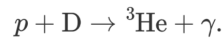
б

3 Образование звездных структур и темная материя

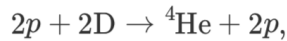
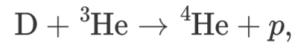
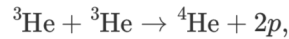
Почти все протоны и нейтроны превращаются в гелий, поскольку их концентрация после нуклеосинтеза предположительно вышла примерно одинаковой. Вселенная, в которой доминирует гелий, качественно отличается от нашей Вселенной, от образования дисков в галактиках до звездообразования и ядерного цикла горения. Например, вместо привычного нуклеосинтеза pp-, pep- и CNO-процессов, возможно существование короткоживущих звезд, топливом для которых будут радиоактивные изотопы [6].

Предположим, что помимо большого количества гелия также образовалось достаточно дейтронов. Реакция $p + n \rightarrow d + \gamma$ оказывается невозможной в обычном мире, так как в звездной среде на стадии первичного нуклеосинтеза нейтроны отсутствуют, однако в зеркальном мире без слабого взаимодействия могут наблюдаться. Тем не менее, в статье [7] авторы показали, что для начальных условий, где наблюдается доминирование концентрации протонов над нейтронами, синтезированные элементы первичного нуклеосинтеза включали большую долю дейтронов. Свою модель

они построили на предположении о изначальном наличии набора фермионов, состоящего из верхнего, нижнего и странного кварков и электронов. Однако, данное условие влияет только на отношение концентраций протонов и нейтронов. Частицы являются стабильными, так как дальнейший процесс распада идет по слабому взаимодействию. Наличие большей доли дейтронов позволяет разрушающимся облакам водорода пропустить процесс взаимодействия с нейтрино и перейти непосредственно к



Последующий процесс горения происходит стандартными цепями



где протоны действуют как катализаторы для слияния дейтерия в ${}^4\text{He}$. Реакция горения дейтерия очень быстрая и, таким образом, может изменить динамику звездного горения в зеркальном мире.

Далее обратимся к влиянию зеркального мира без слабого взаимодействия на обычный мир. Поскольку некоторые легкие и тяжелые ядра, мезоны, лептоны и нейтрино становятся нейтральными после рождения нейтральны, то можно предположить, что скорость остывания и расширения Вселенной со стороны зеркального мира будет выше. Другими словами, изотопы при распаде не будут отдавать энергию, 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.

Однако, есть возможность непредсказуемых флуктуаций, которые могли бы избавиться от асимметричности скорости протекания реакций во Вселенной. Тем не менее, зеркальное вещество мира без слабого взаимодействия не противоречит основным свойствам скрытой массы

4 Заключение

Подводя итог, следует отметить, что существование Вселенной, где в зеркальном мире отсутствует слабое взаимодействие, а обычный не отличается от "нашего" возможно только при достаточно жестких начальных условиях, таких как доминирование концентрации протонов над нейтронами, образование дейтерия на стадии нуклеосинтеза и приближений, связанных с разницей скорости эволюции данных миров относительно друг друга, что может повлечь за собой образования гравитационных структур, которые повлияют на равномерность распределения обычного вещества во Вселенной.

Однако, даже в такой Вселенной возможно формирование звездных структур в зеркальном мире, а вещество может считаться кандидатом на роль скрытой массы, поскольку в результате эволюции доминирует по массе, взаимодействует в обычном мире только гравитационно, способно формировать структуры. Также в такой Вселенной тоже будет наблюдаться анизотропия реликтового излучения и гравитационное линзирование.

Список используемых источников

1. *Окунь Л. Б.* Зеркальные частицы и зеркальная материя: 50 лет гипотез и поисков // Усп. физ. наук. — 2007. — Т. 177, № 4. — С. 397—406.
2. *Блинников С. И.* Зеркальное вещество и другие модели для тёмной материи // Усп. физ. наук. — 2014. — Т. 184, № 2. — С. 194—199.
3. *Хлопов М. Ю.* Основы космомикрoфизики. — 2004.
4. *Рубаков В. А.* Физика частиц и космология: состояние и надежды // Успехи физических наук. — 1999. — Т. 169, № 12. — С. 1299—1309.
5. *Вайнберг С.* Проблема космологической постоянной // Успехи физических наук. — 1989. — Т. 158, № 8. — С. 639—678.
6. Short-lived nuclei in the early Solar System: Possible AGB sources // Nuclear Physics A. — 2006. — Т. 777. — С. 5—69 ; — Special Issue on Nuclear Astrophysics.
7. *Harnik R., Kribs G. D., Perez G.* A universe without weak interactions // Phys. Rev. D. — 2006. — Авг. — Т. 74, вып. 3. — С. 035006.