

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»  
(НИЯУ МИФИ)

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ И ТЕХНОЛОГИЙ  
КАФЕДРА №40 «ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ»

Реферат по дисциплине  
«Введение в космомикрфизику»

Зеркальный мир с  $m_n = m_p$

Выполнил

Студент М22-115

\_\_\_\_\_ А. М. Захаров

Проверил

\_\_\_\_\_ М. Ю. Хлопов

Москва 2023

# СОДЕРЖАНИЕ

Введение	2
Описание модели	4
Закалка нейтронов	7
Первичный нуклеосинтез	9
Следствия. Стабильный нейтрон, образование динейтрона.	14
Заключение	16
Список используемых источников	17

# ВВЕДЕНИЕ

Необходимость в введении дополнительных миров была вызвана наблюдением нарушения СР-симметрии в ряде опытов, приоритет на сохранение которой высказывался многими учеными, в том числе и Ландау. Распад нейтрального каона на два, а также и на три пиона трактовался некоторыми учеными как распад через теневые вселенные.

О существовании зеркальных частиц впервые был поставлен вопрос великими физиками-теоретиками Чжэндао Ли и Чжэньнин Янгом. В своей работе они предположили, что в слабых распадах четность не сохраняется, что приводит к неэквивалентности левой и правой ориентированных систем координат. Уже позже, в проведенном Ч.Ш. Ву эксперименте, они обнаружили большую лево-правую асимметрию в  $\beta$ -распаде  $^{60}\text{Co}$  и в  $\pi \rightarrow \mu \rightarrow e$  распадах. Чтобы восстановить эквивалентность, они предположили существование симметричного набора частиц, в котором несохранение четности происходит в противоположную сторону, и таким образом, при отражении в зеркале получается процесс, происходящий в природе, но с зеркальными двойниками. Ли, Ландау и коллеги предполагали, что СР-инвариантность может решить эту проблему, экспериментальная проверка которой являлась одним из высших приоритетов. Однако работа Кристенсона по открытию распада  $K_2^0 \rightarrow 2\pi$  "закрыла" идею Ландау о строгом сохранении СР-четности, согласно которой античастицы выглядят в точности, как зеркальные отражения частиц.

Позже, о существовании «зеркальных» миров в своих обзорах говорят и другие великие физики прошлого века - Кобзарев И. Ю., Окунь Л. Б., а также Померанчук И. Я. - в своей работе «О возможности экспериментального обнаружения зеркальных частиц» [1]. Окунь Л. Б. с коллегами предложил модель зеркального мира с новым набором частиц - они не должны были участвовать в обычных сильных и электромагнитных взаимодействиях (в том числе и в слабых взаимодействиях, что стало ясно позже, после

открытия Z бозона), а должны были иметь свои собственные взаимодействия, а значит и зеркальные частицы образовывали зеркальные атомы, молекулы, а следовательно - и сам зеркальный мир. Различные опыты по поиску зеркальных частиц, проведенные коллаборацией АРГУС, группами экспериментаторов ИТЭФ и многими другими учеными лишь оценивали верхние границы для долей распадов. Так, коллаборация АРГУС искала распад  $\Upsilon(2S) \rightarrow \pi^+ \pi^- \Upsilon(1S)$ , в которых  $\Upsilon(1S)$  распадался в "ничто" благодаря переходам в своего зеркального партнера, однако были лишь оценены доли этих каналов - 2.3% с 90% достоверностью [2]. Раждались новые теории: так, например, Зельдович и Хлопов предположили, что если существует правое нейтрино с дираковской массой, то оно является частью зеркального мира и возникает из-за переходов между нашим левым и зеркальным правым нейтрино, что являлось некоторым «мостиком» между мирами. В настоящее время, теория зеркальных миров продолжает развиваться [3], [4], а вместе с ней и методы ее подтверждения - помимо уже широко используемых космологических методов гравитационного линзирования, корреляции вспышек гамма-лучей с распределением темной материи в галактиках, а также космических зеркальных струн, широко используются и ускорительные методы. Так, в Дубне в 2004 был осуществлен пуск ЛЕРТА [5], одной из задач которого является поиск зеркального ортопозитрония. Достаточно большое количество статей с обсуждением невидимых зеркальных каналов распада бозона Хиггса, рожденных на ЛНС также было опубликовано годами ранее.

В данной работе предполагается исследование зеркального мира, в котором масса нейтрона совпадает с массой протона. В работе исследуются космологически значимые последствия модели, как модель такого мира влияет на физику инфляции в нем, бариогенез мира и эволюцию зеркальной вселенной.

# ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

В данной работе рассматривается модель, основанная на стандартной модели физики элементарных частиц с добавлением одного поколения зеркальных частиц. Массы фермионов, переносчиков слабого, сильного и электромагнитного взаимодействия, а также бозона Хиггса полностью совпадают с стандартной моделью в обычном и зеркальном мирах. Взаимодействие между частицами в зеркальном мире аналогичны соответствующим взаимодействиям между частицами и в нашем мире. Единственным отличием зеркального мира от обычного, помимо рассматриваемого лишь первого поколения частиц, является эквивалентность масс протона и нейтрона. В обычном мире

$$m_p = 938.272 MeV, \quad m_n = 939.565 MeV \quad [c = 1], \quad (1)$$

однако в зеркальном мире мы предполагаем  $m_p = m_n$ . В таком случае,  $\beta$ -распад свободного нейтрона  $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$  в зеркальном мире запрещен: ненулевая масса электрона и нейтрино запрещает распад по закону сохранения энергии. Если обосновывать эквивалентность масс на кварковом уровне ( $q_u = \frac{2}{3}, q_d = -\frac{1}{3}$ ,  $p = uud$ ,  $n = udd$  в обычном мире), то электрический заряд нейтрона становится равным заряду протона, что также ведет и к несохранению электрического заряда в распаде. Несохраниение базовых законов распада частиц приводит нас к постулированию нейтрона как стабильной частицы в зеркальном мире, согласно данной модели, как в свободном состоянии, так и внутри ядра. Чтобы описывать равенство масс на кварковом уровне, необходимо либо допустить одинаковый кварковый состав (что, наверное, в общем случае не имеет смысла - в чем тогда разница между протоном и нейтроном? Полная киральная симметрия, одинаковый заряд, масса, свойства, стабильность и т.д.), либо вводить дополнительное поколение кварков, не существующее в обычном мире, которое могло бы

объяснить равенство с массовой стороны, но оставить нейтрон нейтральной частицей, а протон - заряженной. Однако есть и иной способ: предположим, что в зеркальном мире масса зеркального u-кварка совпадает с массой зеркального d-кварка, и таким образом мы сохраним равенство масс, но не изменим остальных, привычных с точки зрения обычного мира, условий. Для описания эволюции Вселенной не будем затрагивать вопросы возникновения таких условий, а просто предположим равенство масс "на веру". Касаемо стабильности атомов, рассмотрим стандартную формулу энергии связи ядра атома:

$$W = Zm_p + (A - Z)m_n - M_{nucleus}$$

$$W = Zm_p + Am_n - Zm_n - M_{nucleus}$$

$$W[{}^4_2He] = Am_n - M_{nucleus} = 4 * 938.272 - 4.002603 * 931.5 - 2 * 0.511 \approx 23.6 > 0$$

$$W[{}^4_2He] = Am_n - M_{nucleus} = 4 * 939.565 - 4.002603 * 931.5 - 2 * 0.511 \approx 28.8 > 0$$

$$W[{}^2_1H] = Am_n - M_{nucleus} = 2 * 938.272 - 2.014102 * 931.5 - 0.511 \approx -0.1 < 0$$

$$W[{}^2_1H] = Am_n - M_{nucleus} = 2 * 939.565 - 2.014102 * 931.5 - 0.511 \approx 2.5 > 0$$

На примере ядра атома гелия видно, что его стабильность обеспечивается и в случае, если  $m_p = m_n = 939.565$ , и в случае  $m_p = m_n = 938.272$ . Однако, такой расчет для дейтерия  ${}^2_1H$  показывает, что стабильность ядра наблюдается только в первом случае. С момента большого взрыва, когда вселенная остыла до  $10^9$  К, стало возможно образование стабильных ядер дейтерия при столкновении протона и нейтрона  $p + n \rightarrow d + \gamma$ . Далее, дейтерий активно участвовал в цепочке ядерных реакций, приводящих к рождению стабильного ядра гелия. Нестабильность дейтронов привела бы к быстрому распаду, а из-за невысокой плотности вещества столкновение двух ядер дейтерия с образованием более стабильного ядра была бы маловероятно. Формирование основных химических элементов было бы невозможным, химический состав вселенной был бы скуден для формирования звезд. Если допустить, что время жизни дейтрона достаточное, чтобы успели проходить реакции синтеза гелия, то это совсем не обеспечивает жизнь в рамках нашей солнечной системы: главные реакции pp-цикла на солнце ( $p + p \rightarrow {}^2H + e^+ + \nu_e$  (99.6%) и  $p + e^- + p \rightarrow {}^2H + \nu_e$  (0.4%)) требуют рождения стабильного дейтрона с последующим синтезом в изотоп гелия  ${}^3He$ . Когда водород прогорает, начинает гореть гелий, а из гелия в дальнейшем получается углерод, необходимый для запуска CNO-цикла. Ввиду

всех перечисленных сложностей, возникающих при условии неустойчивости дейтерия, далее будем предполагать  $m_p = m_n = 939.565$ .

# ЗАКАЛКА НЕЙТРОНОВ

При достаточно высокой температуре Вселенной и обилии электронов, позитронов и нейтрино в сравнении с нуклонами,  $n$  и  $p$  находятся в термодинамическом равновесии за счет слабых процессов:

$$p + e^- \leftrightarrow n + \nu_e, \quad n + e^+ \leftrightarrow p + \bar{\nu}_e \quad (2)$$

Таким образом, происходит закалка отношения количества нейтронов и протонов. Характерные масштабы энергии  $\Delta m = m_n - m_p = 1.3$  МэВ в обычном мире, или  $\Delta m = 0$  в зеркальном. Учитывая термодинамическое равновесие, наблюдается и равновесие химических потенциалов  $\mu_p = \mu_e = \mu_n + \mu_\nu$ , следовательно  $\mu_n = \mu_p + \mu_e - \mu_\nu$ . В обычном мире температура закалики определяется как

$$T_n = \frac{1}{(C_n M_{Pl}^* G_F^2)^{\frac{1}{3}}}, \quad (3)$$

где  $M_{Pl}^* = \frac{M_{Pl}}{1.66\sqrt{g_*}}$ ,  $g_* = 2 + \frac{7}{8} \cdot 4 + \frac{7}{8} \cdot 2 \cdot N_\nu$ . Используя кинетические уравнения, получим наиболее точное значение  $T_n \approx 0.8$  МэВ. Формула для оценки остаточной концентрации нейтронов после закалики:

$$n_n = g_n \left( \frac{m_n T}{2\pi} \right)^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{\mu_n - m_n}{T}} \quad (4)$$

При  $T \gg \Delta m$  концентрация нейтронов в момент закалики была бы сильно подавлена, а при  $T \ll \Delta m$  - протонов и нейтронов в плазме было бы поровну, практически все нуклоны после эпохи нуклеосинтеза связались бы в ядра  ${}^4\text{He}$ , а водород во Вселенной отсутствовал бы [6]. В обычном мире мы наблюдали  $T_n \sim \Delta m$  ( $0.8$  vs  $1.3$  MeV), однако в зеркальном на-



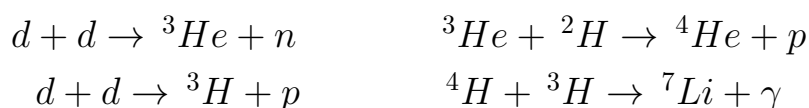
блюдается  $T \gg \Delta m$ . Наблюдается несимметричность начальных условий относительно обычного и зеркального вещества. Полагая для релятивистских электронов и позитронов очень маленький химический потенциал  $\left( \frac{n_{e^-} - n_{e^+}}{T^3} \sim \frac{n_p}{T^3} \sim \frac{n_p}{n_\gamma} \sim \frac{\mu_e}{T^3} \sim 10^{-9} \right)$ , а также отсутствие сильной лептонной асимметрии во Вселенной (т.е.  $n_\nu - n_{\bar{\nu}} \ll n_\nu + n_{\bar{\nu}} \sim T^3 \Rightarrow \frac{\mu_\nu}{T}$  также мал), мы с хорошей точностью определяем равенство  $\mu_n = \mu_p$ . Следовательно,

$$\frac{n_p}{n_n} = \frac{g_p \left( \frac{m_p T}{2\pi} \right)^{\frac{3}{2}} e^{\frac{\mu_p - m_p}{T}}}{g_n \left( \frac{m_n T}{2\pi} \right)^{\frac{3}{2}} e^{\frac{\mu_n - m_n}{T}}} = e^{\frac{\mu_p - m_p - \mu_n + m_n}{T}} = 1 \quad (5)$$

Таким образом, количество нейтронов и протонов в результате закалки одинаковое, в то время как обычном мире мы оцениваем соотношение  $\frac{n_p}{n_n} = 5/1$ . Сохранение такого соотношения после закалки не гарантируется - пусть нейтрон и ныне стабильная частица, но предстоит еще разобраться, какие связанные состояния и с какими вероятностями могут образовывать пары свободных нейтронов. Возможно, синтез более тяжелых ядер будет более эффективен именно с участием большего числа нейтронов, так как фактически мы избавляемся от кулоновского рассталкивания в процессах.

# ПЕРВИЧНЫЙ НУКЛЕОСИНТЕЗ

Нуклеосинтезом называется процесс преобразования одних химических элементов в другие, который происходит в ходе ядерных реакций. Совокупность процессов, которые привели к образованию первичного химического состава вещества во Вселенной до появления первых звёзд называют первичным нуклеосинтезом. К началу первичного нуклеосинтеза в обычном мире, через 3 минуты после Большого взрыва, соотношение нейтронов и протонов составляло 1 к 7. Через 20 минут после Большого взрыва первичный нуклеосинтез завершился: в барионной массе Вселенной стали доминировать водород (75% массы) и гелий (25% массы). В меньшем количестве образовались дейтерий, гелий-3 и литий-7, другие же элементы сформировались в незначительном количестве. Нейтроны соединялись с протонами с образованием ядер дейтерия  $n + p \rightarrow d + \gamma$ . Накоплению дейтерия за счёт этой реакции на первых порах препятствует интенсивное разрушение дейтерия фотонами в обратном процессе фотодиссоциации. Отношение числа фотонов  $n_\gamma$  к числу барионов  $n_B$  определялось как  $\frac{n_\gamma}{n_B} = 10^9 \div 10^{10}$ . Поэтому начало синтеза дейтерия и всей цепочки первичного нуклеосинтеза задерживается примерно до 100-й секунды после Большого Взрыва, когда средняя кинетическая энергия частиц уменьшается до 0.1 МэВ, а Вселенная к этому времени остывает до  $10^9$  К. После остывания происходит накопление ядер и идут дальнейшие реакции:



Дальше реакции не идут, т.к. в природе нет устойчивых химических элементов с атомным номером 5, а концентрация ядер He еще слишком низка, чтобы могли эффективно идти реакции  ${}^3\text{He} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^7\text{Be}$ ,  $3 {}^4\text{He} \rightarrow {}^{12}\text{C}$ . Эпоха первичного нуклеосинтеза в обычном мире завершается к моменту  $t \sim 200\text{с}$ . Формирование  ${}^7\text{Be}$ ,  ${}^7\text{Li}$  завершилось, когда после Большого

взрыва прошло 20 минут.

Предположим, что в зеркальном мире начало нуклеосинтеза проходит по такому же сценарию - свободные нейтроны и протоны образуют стабильный дейтерий, который формирует первичные изотопы водорода и гелия. Для начала определим температуру, при которой термодинамически выгодно запустить реакцию синтеза дейтерия в зеркальном мире. В равновесии:

$$n_n = 2 \left( \frac{m_p T}{2\pi} \right)^{3/2} e^{(\mu_n - m_n)/T} \quad (6)$$

$$n_p = 2 \left( \frac{m_p T}{2\pi} \right)^{3/2} e^{(\mu_p - m_p)/T} \quad (7)$$

Определим  $\mu_A$  :  $\mu_A = \mu_p Z + \mu_n (A - Z)$  - следствие равновесия, тогда

$$n_A = g_A \left( \frac{A m_p T}{2\pi} \right)^{3/2} e^{(\mu_A - m_A)/T} = |\Delta_A = Z m_p + (A - Z) m_n - m_A| = \quad (8)$$

$$= g_A \left( \frac{A m_p T}{2\pi} \right)^{3/2} e^{[Z(\mu_p - m_p) + (A - Z)(\mu_n - m_n) + \Delta_A]/T} \quad (9)$$

Рассмотрим по отдельности каждое экспоненциальное слагаемое, обозначив  $2 \left( \frac{m_p T}{2\pi} \right)^{3/2}$  как  $\psi$  (для удобства):

$$e^{(\mu_p - m_p)/T} = \frac{n_p}{\psi} \quad (10)$$

$$e^{Z(\mu_p - m_p)/T} = \left( \frac{n_p}{\psi} \right)^Z \quad (11)$$

$$e^{(A - Z)(\mu_n - m_n)/T} = \left( \frac{n_n}{\psi} \right)^{A - Z} \quad (12)$$

Таким образом, получим формулу Саха:

$$n_A = g_A \left( \frac{Am_p T}{2\pi} \right)^{3/2} \left[ \frac{n_p}{2 \left( \frac{m_p T}{2\pi} \right)^{3/2}} \right]^Z \left[ \frac{n_n}{2 \left( \frac{m_p T}{2\pi} \right)^{3/2}} \right]^{A-Z} e^{\Delta_A/T} = \quad (13)$$

$$= g_A n_p^Z n_n^{A-Z} 2^{-A} A^{3/2} \left( \frac{2\pi}{m_p T} \right)^{\frac{3}{2}(A-1)} e^{\Delta_A/T} \quad (14)$$

Введем безразмерное число нуклонов, связанных в ядра и плотность числа барионов:

$$X_A = \frac{An_A}{n_B} \quad (15)$$

$$n_b = 0.24 \eta_B T^3 \quad (16)$$

и получим уравнение Саха для доли перчиных ядер

$$X_A = X_p^Z X_n^{A-Z} 2^{-A} g_A A^{5/2} \eta_B^{A-1} \left( \frac{2.5T}{m_p} \right)^{\frac{3}{2}(A-1)} e^{\Delta_A/T} \quad (17)$$

Малый энтропийный множитель  $\eta_B^{A-1} \left( \frac{2.5T}{m_p} \right)^{\frac{3}{2}(A-1)}$  может быть подавлен экспонентой только при температурах много ниже энергии связи ядра. Только с этого момента концентрация ядер перестает быть мала. Синтез дейтронов начинается, когда концентрация ядер перестает быть малой [7], в случае

$$X_D(T_{NS}) \sim \eta_B \left( \frac{2.5T_{NS}}{m_p} \right)^{\frac{3}{2}} e^{\Delta_D/T_{NS}} \sim 1 \quad (18)$$

Барион-фотонное соотношение  $\eta_B \sim 0.6 \times 10^{-9}$ , энергия связи дейтрона  $\Delta_D \approx 2.483$  МэВ (с учетом стабильности дейтрона, см. ранее в главе Описание модели). Подставим известные выражения в 17, с учетом 18,

и получим

$$T_{NS} \approx 75.3 \text{ MeV} \quad (19)$$

Расчет проводился графическим методом, так как численное вычисление методом Ньютона (и другими), с учетом разложения экспоненты в ряд Маклорена выдает нефизические значения (около 1 ГэВ и больше). В обычном мире температура была несколько ниже:  $T_{NS} \approx 65 \text{ KeV}$ , а соответствующее время Вселенной, при которой реакция синтеза дейтерия стала термодинамически выгодной, составило  $t_{NS} \approx 4.5$  мин.

Возраст Вселенной в этот момент в зеркальном мире:

$$t_{NS} \approx \frac{1}{H(T_{NS})} \approx \frac{M_{Pl}^*}{T_{NS}^2} \quad (20)$$

$$M_{Pl}^* = \frac{M_{Pl}}{1.66\sqrt{g_*}}, \quad g_* = 2 + \frac{7}{8} \cdot 4 + \frac{7}{8} \cdot 2 \cdot N_\nu \cdot \left(\frac{4}{11}\right)^{4/3} \quad (21)$$

$$t_{NS}^{mirr} = \frac{M_{Pl} 1.66\sqrt{g_*^{ord}} T_{NSord}^2 t_{NSord}}{M_{Pl} 1.66\sqrt{g_*^{mirr}} T_{NSmirr}^2}, \quad (22)$$

где  $t_{NSord} = 245\text{с}$ , время Вселенной на момент конца нуклеосинтеза в обычном мире;  $\sqrt{g_*^{mirr}}$  учитывает лишь одно рассматриваемое поколение в зеркальном мире, а значит и  $N_\nu = 1$ ; а  $T_{NSord}^2$  - температура на момент конца нуклеосинтеза в обычном мире. В итоге получаем:

$$t_{NS}^{mirr} \approx 196 \text{ с} \approx 3.3 \text{ min} \quad (23)$$

Именно столько времени прошло от момента Большого взрыва в зеркальном мире до появления ядер дейтерия и начала синтеза более тяжелых элементов. Различие в начальных условиях в зеркальном и обычном мирах приводит к более раннему началу нуклеосинтеза на  $\Delta t = 49$  секунд. Дальнейший нуклеосинтез заключается в рождении более тяжелых ядер, таких как литий и бериллий. Последний, вероятнее всего, будет нестабильным. В результате реакции  $d + T \rightarrow {}^4\text{He} + n$  образуется гелий. Оценим массовые доли гелия и водорода среди барионов:

$$X(^4He) = \frac{2\frac{n}{p}}{1 + \frac{n}{p}} = 1 \quad (24)$$

$$X(H) = \frac{1 - \frac{n}{p}}{1 + \frac{n}{p}} = 0 \quad (25)$$

Таким образом, в зеркальном мире первичный гелий составляет 100% зеркального вещества. Однако более точные оценки концентрации протонов составляют 0.05%. Из-за высокой концентрации родившегося гелия, родившийся в результате синтеза бериллий будет также взаимодействовать с гелием и рождать углерод-12 и так далее.

# СЛЕДСТВИЯ. СТАБИЛЬНЫЙ НЕЙТРОН, ОБРАЗОВАНИЕ ДИНЕЙТРОНА.

В статье [8] изучилось влияние связанного динейтрона - стабильного состояния слияния двух нейтронов. Авторы статьи предполагают о существовании (в контексте данной работы - в зеркальном мире) таких реакций, как:

$$n + n \leftrightarrow {}^2n + \gamma, \quad Q = B_{2n} \quad (26)$$

$${}^2n \leftrightarrow d \quad (27)$$

$${}^2n + p \leftrightarrow T + \gamma, \quad Q = 8.48 - B_{2n}, \quad (28)$$

где  $B_{2n}$  является функцией энергии связи и не превышает 2.5 МэВ. Возможные реакции, которые могли бы проходить в том числе во время нуклеосинтеза:

$$p + {}^2n \leftrightarrow d + n, \quad Q = 2.22 \text{ MeV} - B_{2n}, \quad (29)$$

$$d + {}^2n \leftrightarrow T + n, \quad Q = 6.26 \text{ MeV} - B_{2n}, \quad (30)$$

$${}^3\text{He} + {}^2n \leftrightarrow {}^4\text{He} + n, \quad Q = 28.29 \text{ MeV} - B_{2n}, \quad (31)$$

$${}^3\text{He} + {}^2n \leftrightarrow T + d, \quad Q = 2.99 \text{ MeV} - B_{2n} \quad (32)$$

Синтез дейтерия и трития ведет в последствие к синтезу гелия и его изотопа (гелий-3). В статье также исследуются слабые подпроцессы перехода динейтрона в дейтерий, электрон и антинейтрино и обратные процессы с  $Q = 3.52 - B_{2n}$ . Дополнительный синтез гелия мог бы сказаться и на формировании звезд в зеркальных галактиках. Наиболее сильно это скажется на нуклеосинтезе при большом взрыве, когда возникнут стабильные нейтроны и тритий, а He-3 будет неустойчив к обратному бета-распаду на тритий. Таким образом, образуются водород, дейтерий, тритий, гелий, ли-

тий и нейтроны. В начальных условиях в основном нейтроны, и поэтому получается много  $\text{He-4}$  и очень мало  $\text{H-1}$ , а большая часть массы Вселенной будет состоять из стабильных нейтронов и альфа-частиц. Эти нейтроны могут сталкиваться, образуя гравитационно связанные нейтронные кластеры. Нейтроны нейтральны, им трудно рассеивать энергию, но они могут со временем оседать в нейтронно-звездные объекты. Так как для горения гелия возможно только при бóльших температурах, чем водород, кластеры могли бы только образовывать нейтронные карлики, и в достаточно редких случаях поражать звезды с горящим гелием в зеркальном мире, время жизни которых будет меньше из-за высокой скорости реакций. Синтезированный гелий может также быть и кандидатами на холодную скрытую материю, в состав которой будет и зеркальное вещество. Сформированные нейтронные также звезды могут быть источником перехода динейтрона в стерильное антинейтрино, которое является одним из кандидатов в темную материю [9].

Важно отметить, что авторы статьи варьировали только один параметр - энергию связи динейтрона, а дальнейшая работа по изучению взаимозависимости сечений и энергий связи в ядерной теории, необходимая для уменьшения представленных в статье ошибок и установления более конкретной связи с лежащими в основе фундаментальными константами будет проделана в будущем.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе рассматривалась модель зеркального мира с  $m_p = m_n$ . В работе приведены гипотезы, в каких условиях такой мир мог бы существовать и какими законами он мог бы описываться. Для корректного описания мира, мы предполагаем равенство масс кварков в зеркальном мире, а также стабильность свободного нейтрона.

В ходе работы была проведен анализ процесса закалки нейтронов в зеркальном мире, согласно результатам которого количество протонов и нейтронов совпадает. Ввиду этого, в зеркальном мире первичный гелий составлял бы почти 100% зеркального вещества, а зеркальный водород был бы подавлен.

Процесс нуклеосинтеза в зеркальном мире завершился бы раньше:

$$T_{NS} \approx 75.3 \text{ MeV}$$
$$t_{NS}^{mirr} \approx 196 \text{ c} \approx 3.3 \text{ min}$$

Различие в начальных условиях в зеркальном и обычном мирах приводит к более раннему началу нуклеосинтеза на  $\Delta t = 49$  секунд.

В ходе работы также был проведен анализ статьи, авторы которой предполагают стабильное состояние двух связанных нейтронов. Учитывая стабильность нейтронов, а также насыщенность нейтронами Вселенной в зеркальном мире, предполагаемый сценарий ее развития заключался бы в синтезе гелия-4. Единственными реакциями в звёздах зеркального мира было бы горение  ${}^4\text{He}$  с дальнейшим образованием некоторых более тяжёлых элементов, время жизни которых было бы меньше из-за высокой скорости реакций. В основном, зеркальная Вселенная была бы наполнена гравитационно связанными нейтронными кластерами, а ее химический состав был бы беден. Предположительно, зеркальный гелий мог бы быть кандидатом в холодную темную материю.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Okun' L. B.* Mirror particles and mirror matter: 50 years of speculation and searching // Physics-Uspekhi. — 2007. — Т. 50, № 4. — С. 380—389. — ISSN 1468-4780.
2. *Albrecht H., Binder U., al P. B. et.* Search for exotic decay modes of the  $\Upsilon(1S)$  // Physics Letters B. — 1986. — Т. 179, № 4. — С. 403—408. — ISSN 0370-2693.
3. Neutron-Mirror Neutron oscillations in Matter / Y. Kamyshkov [и др.]. — 2021. — arXiv: 2111.01791 [hep-ph].
4. *Berezhiani Z.* Anti-dark matter: a hidden face of mirror world. — 2016. — arXiv: 1602.08599 [astro-ph.CO].
5. SOME ASPECTS OF POSITRONIUM PHYSICS / S. N. Gninenko [и др.]. — 2016. — arXiv: 1602.08599 [astro-ph.CO].
6. *Майоров А. Г.* Лекции по происхождению Вселенной. — 2019. — Accessed on 23.12.2023.
7. *Панов А. Д.* Лекции по физике космоса. — 2018. — Accessed on 21.12.2023.
8. *Kneller J. P., McLaughlin G. C.* Effect of bound dineutrons upon big bang nucleosynthesis // Physical Review D. — 2004. — Т. 70, № 4. — ISSN 1550-2368.
9. *Hao Y., Ni D.* Dineutron decay into sterile antineutrinos in neutron stars and its observable consequences // Physical Review D. — 2023. — Т. 107, № 3. — ISSN 2470-0029.