

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

ОТЧЕТ  
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ  
ИССЛЕДОВАНИЕ КОСМОЛОГИЧЕСКОГО  
НУКЛЕОСИНТЕЗА В ДОМЕНАХ  
АНТИВЕЩЕСТВА

Научный руководитель  
(проф., д.ф-м.н.)

\_\_\_\_\_ М. Ю. Хлопов

Студент

\_\_\_\_\_ А. И. Дембицкая

Москва 2024

# СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
1 Теория Горячей Вселенной	5
2 Программа AlterBBN	6
2.1 Основные подпрограммы . . . . .	7
2.2 Расчеты . . . . .	8
3 Оценка размеров домена антивещества	11
4 Заключение	13
Список литературы	14

# ВВЕДЕНИЕ

Современные представления о Вселенной предполагают ее барионную асимметрию, под которой подразумевается отсутствие макроскопического антивещества в количестве, сравнимым с количеством вещества. Тем не менее, при определенных условиях возможна локальная генерация доменов антивещества, вызванная сильной неоднородностью бариосинтеза в малых масштабах. Стандартный механизм бариосинтеза предсказывает барионную асимметрию, выраженную как отношение разности плотностей барионов и антибарионов к плотности фотонов [1].

$$\eta = \frac{n_b - n_{\bar{b}}}{n_\gamma} \quad (1)$$

Глобально Вселенная заполнена барионным веществом, однако в ней могут существовать локальные области, домены, в которых преобладает антивещество.

Законы сильного и электромагнитного взаимодействия одинаковы для барионов и антибарионов. Из этого можно сделать вывод, что эволюция антиматерии может быть описана аналогично эволюции материи.

Несмотря на это, формирование привычных нам астрономических объектов в домене антибарионов невозможно: в процессе эволюции вещества в область возможно поступление продуктов нуклеосинтеза других звёзд извне. Поскольку продукты нуклеосинтеза внутри антизвезд покидают домен и не могут влиять на его химическую эволюцию, объекты внутри домена должны обладать составом, схожим с первичным химическим составом, образовавшимся при Большом Взрыве. Отсюда следует, что процессы, происходящие внутри регионов антивещества в ходе его эволюции, отличны от тех, которые происходят с веществом. Однако в ранней Вселенной в домене антивещества будут происходить процессы первичного нуклеосинтеза, что ведёт за собой образование антигелия.

Эксперимент AMS-02, проводимый на МКС, позволяет обнаружить ядра антигелия среди ядер гелия космических лучей. Если подобные результаты будут получены, это будет подтверждать возможность существования отдельных доменов антивещества во Вселенной.

Существуют наблюдательные ограничения, которые определяют допустимый размер доменов.

Целью данной работы являются исследование космологического нуклеосинтеза в доменах антивещества и оценка размеров подобных доменов в нулевом приближении.

# 1. ТЕОРИЯ ГОРЯЧЕЙ ВСЕЛЕННОЙ

Преобладающей космологической моделью, описывающей Вселенную с самого раннего периода и до ее последующей крупномасштабной эволюции, является теория Большого взрыва. Она также предсказывает обилие самых легких элементов, произведенных в достаточных количествах после ВВН(Нуклеосинтез Большого Взрыва). К таким элементам относятся, прежде всего, дейтерий ( $^2\text{H}$ ), гелий-4 ( $^4\text{He}$ ), гелий-3 ( $^3\text{He}$ ), литий-7 ( $^7\text{Li}$ ), а также тритий ( $^3\text{H}$ ), литий-6 ( $^6\text{Li}$ ) и бериллий-7 ( $^7\text{Be}$ ) в малых количествах.

Согласно стандартной теории Большого взрыва, на ранних этапах формирования Вселенной водород прошел стадию нуклеосинтеза. Поскольку в следствие расширения Вселенной плотности барионов были малы, основными созданными элементами были гелий и водород. Более тяжелые элементы создавались позднее, когда формировались первые звезды и производили тяжелые элементы в своих ядрах.

## 2. ПРОГРАММА ALTERBBN

AlterBBN-это общедоступная программа на C, вычисляющая содержание элементов, формирующихся в процессе Большого взрыва. В AlterBBN реализованы различные космологические сценарии, которые могут изменить исход BBN. Кроме того, включен пакет SuperIso Relic, чтобы можно было исследовать альтернативные модели с использованием ограничений BBN. Программа состоит из пяти основных подпрограмм, которые, за исключением стандартной программы космологической модели, требуют, чтобы в качестве входных аргументов были заданы различные свободные параметры.

## 2.1 Основные подпрограммы

Пять различных программ:

**stand\_cosmo.x** вычисляет обилие элементов космологической модели  $\Lambda$ CDM с предопределенным значением  $\eta$  по умолчанию.

**alter\_eta.x** вычисляет обилие элементов космологической модели с требуемым входным аргументом:

- $\eta$ : отношение концентрации барионов к концентрации фотонов;

**alter\_neutrino.x** вычисляет обилие элементов в стандартной космологической модели с требуемыми входными аргументами:

- $N_\nu$ : число видов нейтрино в стандартной модели;

- $\epsilon_{\nu_e}$ : параметр вырождения электронных нейтрино;

- $\epsilon_{\mu_e}$ : параметр вырождения мюонных нейтрино;

- $\epsilon_{\mu_\tau}$ : параметр вырождения тау-нейтрино;

**alter\_standmod.x** вычисляет обилие элементов в космологических сценариях с модифицированными скоростями расширения и содержанием энтропии с требуемыми входными аргументами:

- $k_\rho$ : отношение плотности темной энергии к плотности энергии излучения во время BBN;

- $n_\rho$ : показатель уменьшения плотности темной энергии;

- $k_s$ : отношение плотности энтропии скрытой массы к плотности энтропии излучения во время BBN;

- $n_s$ : показатель уменьшения плотности энтропии скрытой массы ;

- $T_\rho$ : температура в ГэВ, ниже которой плотность темной энергии устанавливается равной 0;

- $T_s$ : температура в ГэВ, ниже которой плотность энтропии скрытой массы устанавливается равной 0;

**alter\_reheating.x** вычисляет обилие элементов в космологических сценариях с модифицированными скоростями расширения и содержанием энтропии, с добавлением производства энтропии с требуемыми входными аргументами:

- $k_\rho$ : отношение плотности темной энергии к плотности энергии излучения во время BBN;

- $n_\rho$ : показатель уменьшения плотности темной энергии;

- $k_\Sigma$ : отношение производства энтропии скрытой массы к производству энтропии излучения во время BBN;

- $n_\Sigma$ : показатель производства энтропии скрытой массы;

- $T_r$ : температура в ГэВ, ниже которой плотность темной энергии и производство энтропии равны 0;

## 2.2 Расчеты

В работе была использована подпрограмма **alter\_eta.x** для исследования образования химических элементов при разных значениях параметра  $\eta$  в следующем диапазоне:  $1 \times 10^{-17} \div 1 \times 10^{-5}$ .

Были определены диапазоны плотностей, при которых образуются следующие элементы:  ${}^2\text{H}$ ,  ${}^4\text{He}$ ,  ${}^7\text{Li}$ . Отметим, что домен должен обладать неметаллическостью, т.е. не должен содержать тяжелых элементов при максимальной возможной плотности антибарионов. Данные ограничения определяют диапазон плотностей антибарионного вещества, при которых может быть рассмотрен домен.

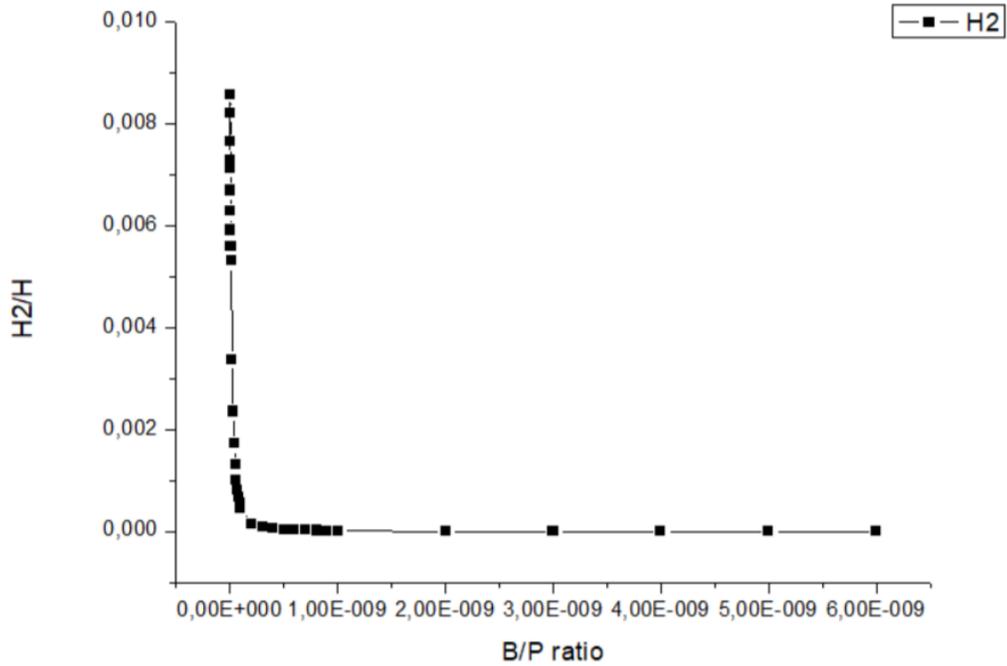


Рисунок 1 — График зависимости массовой доли  ${}^2\text{H}$  от барион-фотонного отношения.

Исследование значений плотности, при которых образуется  ${}^4\text{He}$ , проводилось в диапазоне  $1 \times 10^{-12} \div 6 \times 10^{-9}$ . Массовая доля  ${}^4\text{He}$  возрастает при увеличении барион-фотонного отношения и достигает установившегося значения, наблюдаемого в современной Вселенной (25%) при  $B/P = 8 \times 10^(-10)$ . При этом, образование  ${}^4\text{He}$  почти не наблюдается (менее 1%) при значении отношения, равном  $6 \times 10^{-13}$ .

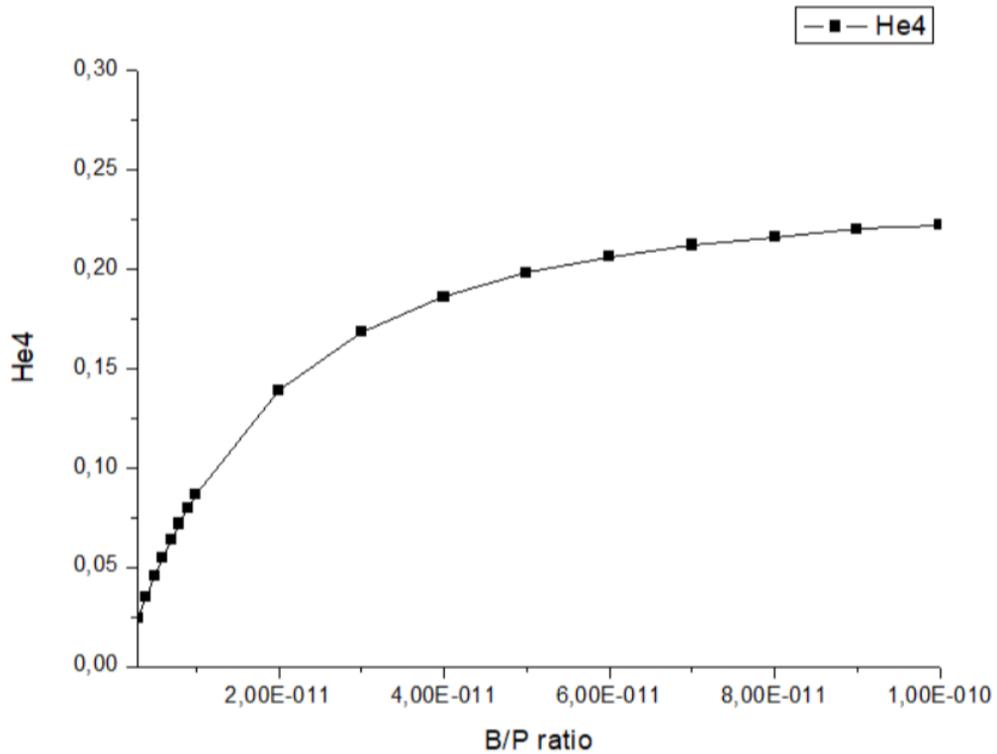


Рисунок 2 — График зависимости массовой доли  ${}^4\text{He}$  от барион-фотонного отношения.

Поскольку стабильных ядер с  $A=5$  и  $A=6$  не существует, реакции нуклеосинтеза завершаются с образованием гелия-4. Учитывая данное условие, можно произвести оценку верхней границы плотности антибарионного вещества. Для этого оценим значения барион-фотонного отношения, при которых наблюдается образование следующего элемента-лития-7.

Исследование значений плотности, при которых образуется  ${}^7\text{Li}$ , проводилось в диапазоне  $1 \times 10^{-12} \div 6 \times 10^{-9}$ . При значении  $8 \times 10^{-10}$  наблюдается рост массовой доли элемента и дальнейшее увеличение количества образующегося вещества. Полученное пороговое значение может быть принято за верхнюю границу возможного диапазона плотностей.

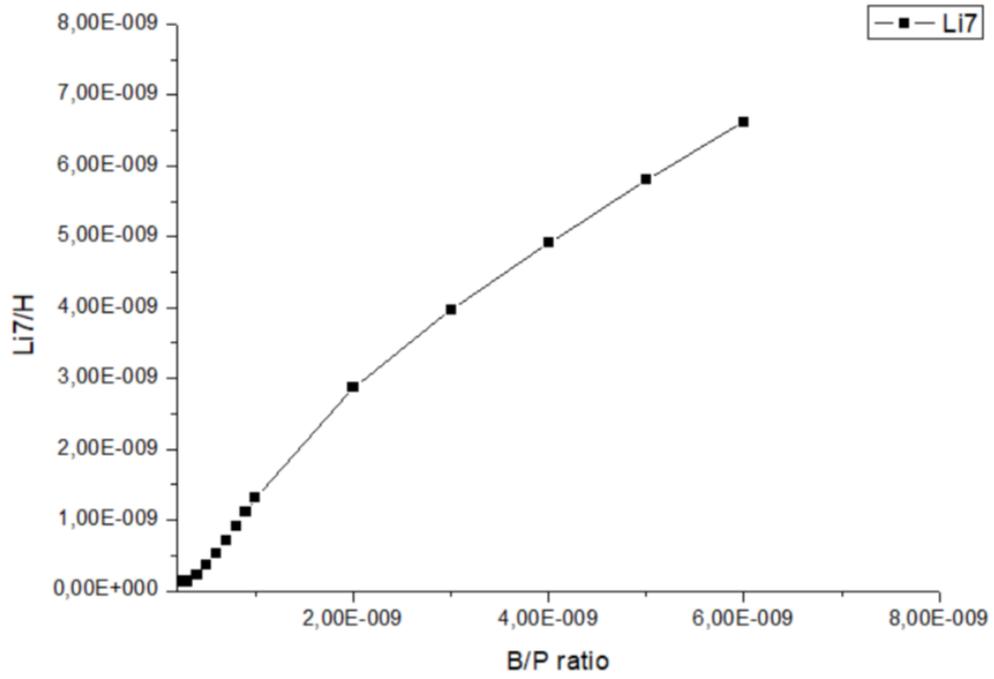


Рисунок 3 — График зависимости массовой доли изотопа  ${}^7\text{Li}$  от барион-фотонного отношения.

Учитывая ограничения, накладываемые условием малой металличности домена, получим рабочий диапазон барион-фотонного отношения:

$$3 \times 10^{-12} \leq \eta \leq 8 \times 10^{-10} \quad (2)$$

### 3. ОЦЕНКА РАЗМЕРОВ ДОМЕНА АНТИВЕЩЕСТВА

Вычислим в первом приближении размер домена антивещества в момент времени  $t=100\text{с}$ . Дальнейшие расчеты будут производиться для домена, обладающего массой  $M$ :

$$10^3 M_{\odot} \leq M \leq 10^5 M_{\odot}.$$

Температура Вселенной в момент времени  $t$  может быть вычислена следующим образом:

$$T(\text{К}) = \frac{10^{10}}{\sqrt{t(\text{с})}} \quad (3)$$

Подставляя заданное время, получим  $T = 10^9 \text{К}$ .

В работе рассматривается ситуация, когда химический состав первичного вещества, которое в своей эволюции сформировало домен, аналогичен первичному химическому составу барионного вещества, то есть элементов тяжелее гелия там практически нет. Размер домена определяется формулой:

$$R = \left( \frac{N}{n} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (4)$$

где

$$N = \frac{M}{m_p};$$

$M$ -масса домена;

$m_p$ -масса протона;

$$n = \eta n_{\gamma};$$

$n_{\gamma}$ -концентрация тепловых фотонов;

На данном этапе развития Вселенной количество тепловых фотонов главным образом определяется температурой и временем:

$$n_{\gamma} \sim T^3 \quad (5)$$

Получим формулу, определяющую размер домена антивещества в нулевом приближении:

$$R \sim \left( \frac{M}{m_p \eta T^3} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (6)$$

Получим минимальный возможный радиус домена, подставив максимальное значение барион-фотонного отношения и минимальное значение массы:

$$R \sim 10^{14} \text{ см.}$$

Сравним полученный размер домена с размером горизонта  $ct = 10^{12}$  см. Из расчетов видно, что размер домена превышает размер горизонта. Таким образом, можно рассматривать однородный сценарий существования домена, игнорируя аннигиляцию на его границах. Однако стоит учитывать возможность существования зон перекрытия границ домена горизонтом. Данные зоны требуют отдельного дальнейшего рассмотрения.

## 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе было проведено исследование нуклеосинтеза в доменах анти-вещества. По полученным данным была проведена оценка размера домена в нулевом приближении. В дальнейшем планируется повышение точности оценки и исследование процессов, происходящих на границе и внутри домена.

# СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] М.Ю.Хлопов. Основы космомикрoфизики.-2011.
- [2] М.Yu.Khlopov, S.G.Rubin. Cosmological Pattern of Microphysics.-2010. in Inflationary Universe.
- [3] *Meador-Woodruf A., Huterer D.* BBN-simple: How to Bake a Universe-Sized Cake.- 2024. - arXiv:2412.07893.
- [4] *Dolgov A.D.* Antistars in the Galaxy.-2022.- DOI:10.3103/S0027134922020308.
- [5] А.Д.Долгов, Я.Б.Зельдович, М.В.Сажин. Космология ранней Вселенной.-1988.