

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

УДК 539.12.01

ОТЧЕТ  
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

**Возможность образования антиметеоритов в  
шаровом скоплении антизвезд**

Научный руководитель

д.ф-м.н., проф.

\_\_\_\_\_ М.Ю.Хлопов

Студент

\_\_\_\_\_ В.А.Вакуленко

Москва 2023

# Содержание

<b>1</b>	<b>Введение</b>	<b>2</b>
1.1	Барионная асимметрия Вселенной . . . . .	3
1.2	Нуклеосинтез . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Цель исследования</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>Описание исследования</b>	<b>5</b>
<b>4</b>	<b>Результат</b>	<b>6</b>
4.1	Численный метод . . . . .	6
4.2	Расчеты . . . . .	7
<b>5</b>	<b>Заключение</b>	<b>9</b>

# 1 Введение

Антивещество - материя, состоящая из античастиц. Ядра атомов антиматерии "построены" из антинуклонов, а внешняя оболочка - из позитронов.

Возможность существования антиматерии следует из инвариантности законов природы относительно преобразования СРТ. Вследствие инвариантности сильного взаимодействия относительно зарядового сопряжения (С-инвариантности) ядерное взаимодействие между антинуклонами в точности совпадает с соответствующим взаимодействием между нуклонами, что обеспечивает существование ядер из антинуклонов. Антиядра обладают массой и энергетич. спектром такими же, как у ядер, состоящих из соответствующих нуклонов.

На Земле, в Солнечной системе и в непосредственно окружающем Солнечную систему космическом пространстве отсутствует сколько-нибудь заметное количество антиматерии. Наблюдаемые в космических лучах позитроны и антипротоны можно объяснить их рождением при столкновениях частиц высоких энергий без привлечения гипотез о существовании макроскопических областей антиматерии. В пользу этого указывает и отсутствие антиядер в космических Лучах.

Необходимость объяснить отсутствие сильного смешивания вещества и антивещества в космических масштабах, меньших скоплений галактик, является существенной трудностью космологических моделей, предполагающих равное количество вещества и антиматерии во Вселенной. С другой стороны, анализ космологических следствий калибровочных теорий великого объединения взаимодействий, предсказывающих процессы с несохранением барионного числа, показывает, что неравновесные эффекты нарушения СР-инвариантности в таких процессах на очень ранних стадиях эволюции Вселенной (до первой секунды расширения) могли привести к барионной асимметрии Вселенной - к преобладанию во Вселенной вещества. Однако возможность существования макроскопических областей антиматерии не является пока окончательно исключённой наблюдениями.

## 1.1 Барионная асимметрия Вселенной

Барионная асимметрия Вселенной - экстраполяция на Вселенную в целом наблюдаемого преобладания вещества над антивеществом в нашем локальном скоплении галактик. Заключение об отсутствии сопоставимого с веществом количества антивещества (в скоплении галактик доля антивещества составляет  $\leq 10^{-4}$ ) основано на эксперим. поисках аннигиляц. квантов. Количественной мерой асимметрии Вселенной служит величина

$$\delta = \frac{n - \bar{n}}{n_\gamma}$$

,где  $n, \bar{n}, n_\gamma$ -концентрации барионов, антибарионов и реликтовых фотонов. Концентрация реликтовых фотонов известна достаточно хорошо - они имеют спектр с температурой  $T \sim 3K$ , что соответствует  $n_\gamma = 500 \text{ см}^{-3}$ . Плотность барионного заряда известна гораздо хуже: ограничения на параметр замедления расширения Вселенной из космологической плотности вещества дают  $n \leq 3 * 10^{-6} \text{ см}^{-3}$ . Снизу ограничено массой видимого вещества галактик:  $n \geq 3 * 10^{-8} \text{ см}^{-3}$ . Таким образом,  $\delta = 10^{-8} - 10^{-10}$ . При адиабатическом расширении Вселенной величина слабо зависит от времени.

Предполагаемый механизм возникновения Барионной асимметрии Вселенной таков: согласно моделям великого объединения, в природе существуют лептокварки - частицы, переносящие взаимодействия с несохранением В. Их масса зависит от модели: векторные лептокварки обычно имеют массу порядка  $10^{14} - 10^{18}$  ГэВ, а скалярные  $10^{10} - 10^{15}$  ГэВ. Вследствие С- и СР-нарушения, а также несохранения В при распаде лептокварков чаще образуются кварки (q) и лептоны (l), чем антикварки и антилептоны. Зарядово-симметричная часть вещества плазмы в последующей эволюции Вселенной аннигилирует в конце концов в фотоны, нейтрино и антинейтрино, тогда как асимметричная часть остаётся, давая начало наблюдаемому миру галактик, звёзд и т. п.

Большие неопределённости в предсказании в рамках моделей великого объединения связаны с возможностью существования различных механизмов нарушения СР-инвариантности в этих моделях (например, при спонтанном нарушении СР-симметрии могут образовываться макроскопические домены вещества и антивещества) и с недостаточным знанием законов эволюции Вселенной на ранних этапах её расширения (возможная неоднородность и анизотропность, влияние фазовых переходов с изменением группы симметрии великого объединения и т. д.). Трудно оценить также вклад в испарения первичных чёрных дыр из-за незнания их спектра и концентрации на ранних этапах расширения Вселенной. Вместе с тем близость оценки к наблюдательным данным приводит к заключению, что описанный механизм возникновения Барионной асимметрии Вселенной может соответствовать действительности.

## 1.2 Нуклеосинтез

Нуклеосинтез в природе - образование в ядерных реакциях, происходящих на различных стадиях эволюции вещества Вселенной, наблюдаемой распространённости элементов и их изотопов. Проблема нуклеосинтеза - это проблема происхождения химических элементов. Данный процесс можно разделить на три главные стадии: космологический нуклеосинтез, синтез ядер в звёздах и во взрывах звёзд, нуклеосинтез под действием космических лучей. Космологический нуклеосинтез - это синтез ядер на раннем этапе (до образования звёзд) эволюции вещества во Вселенной. Согласно горячей Вселенной теории, атомные ядра, более сложные и тяжёлые, чем протон, стали образовываться через 100 с после начала расширения Вселенной, когда в достаточно горячем веществе, содержавшем протоны и нейтроны, при темп-ре  $T \approx 10^9$  К начали протекать термоядерные реакции синтеза самых лёгких элементов - дейтерия, трития и гелия:

Стандартная горячая модель хорошо объясняет наблюдаемое обилие (относит. содержание) первичного (т. е. возникшего на этом этапе эволюции Вселенной)  $^4\text{He}$  в астрофиз. объектах (22% по массе). Однако образование более тяжёлых ядер на ранней стадии расширяющейся Вселенной становится невозможным, так как уменьшение температуры и плотности вещества ограничивает реакции синтеза и не позволяет преодолеть так называемые щели в спектре масс атомных ядер при массовых числах  $A = 5$  и  $8$ , обусловленные отсутствием в природе стабильных нуклидов  $^5\text{He}$ ,  $^5\text{Li}$ ,  $^8\text{Be}$ . Образование следующих за гелием элементов связано с более поздними этапами эволюции Вселенной. Большинство известных химических элементов возникло через миллиарды лет после начала расширения Вселенной - в эпоху существования звёзд, галактик и космических лучей.

Происхождение подавляющего большинства изотопов тяжёлых химических элементов, начиная с углерода и кончая долгоживущими трансактиниевыми нуклидами (а возможно, и сверхтяжёлыми), обязано синтезу ядер в звёздах и во взрывах звёзд. Ядра элементов от углерода до никеля образуются в недрах звёзд в условиях высокой температуры в реакциях термоядерного синтеза. Ядра более тяжёлых элементов образуются, скорее всего, в массивных звёздах и во взрывах звёзд в результате последовательных реакций захвата нейтронов. Ядерный синтез в звёздах можно разделить на "статический" (синтез ядер на равновесной гидростатич. стадии эволюции звёзд) и взрывной нуклеосинтез (синтез ядер при взрывах звёзд). К механизмам статического нуклесинтеза прежде всего следует отнести водородный цикл и углеродно-азотный цикл в звёздах главной последовательности, которые обеспечивают превращение водорода в гелий, создавая некоторый избыток гелия и азота по отношению к их первичному содержанию. Образование углерода и кислорода происходит на той стадии эволюции звёзд-гигантов, когда в их недрах полностью выгорает водород и начинается горение гелия

## 2 Цель исследования

Целью данного исследования является изучение возможности образования твердых объектов антивещества в барионно-ассимметричной Вселенной, в районах с локально повышенной плотностью барионов.

## 3 Описание исследования

В данной работе исследуются неоднородные сигнатуры Большого взрыва для экстремальных значений  $\eta = 10^{-10} - 10^{-1}$ , что мотивировано образованием первичных черных дыр, так как флуктуации плотности, в масштабах меньших порядка текущего размера горизонта, способны сформировать редкие антивезды в ранние эпохи.

## 4 Результат

### 4.1 Численный метод

Когда отношение барионов к фотонам достигает высоких значений, ожидается, что тяжелые элементы будут образовываться в заметных количествах. Для моделирования неоднородных сигнатур используется код AlterBBN, который позволяет пользователям рассчитывать количества элементов в стандартных и альтернативных космологических сценариях. Подключая библиотеку REACLIB для ядерных реакций, можно достичь значения  $\eta \sim O(1)$  с приемлемой точностью.

Исследовались элементы, чье содержание может повлиять на формирование мельчайших структур из антиматерии (к примеру пылинок), при условии что все сказанное для вещества верно для антивещества.

Количества элементов рассчитывались по формуле:

$$[X] = \log_{10} \frac{n(X)}{n(H)} + 12$$

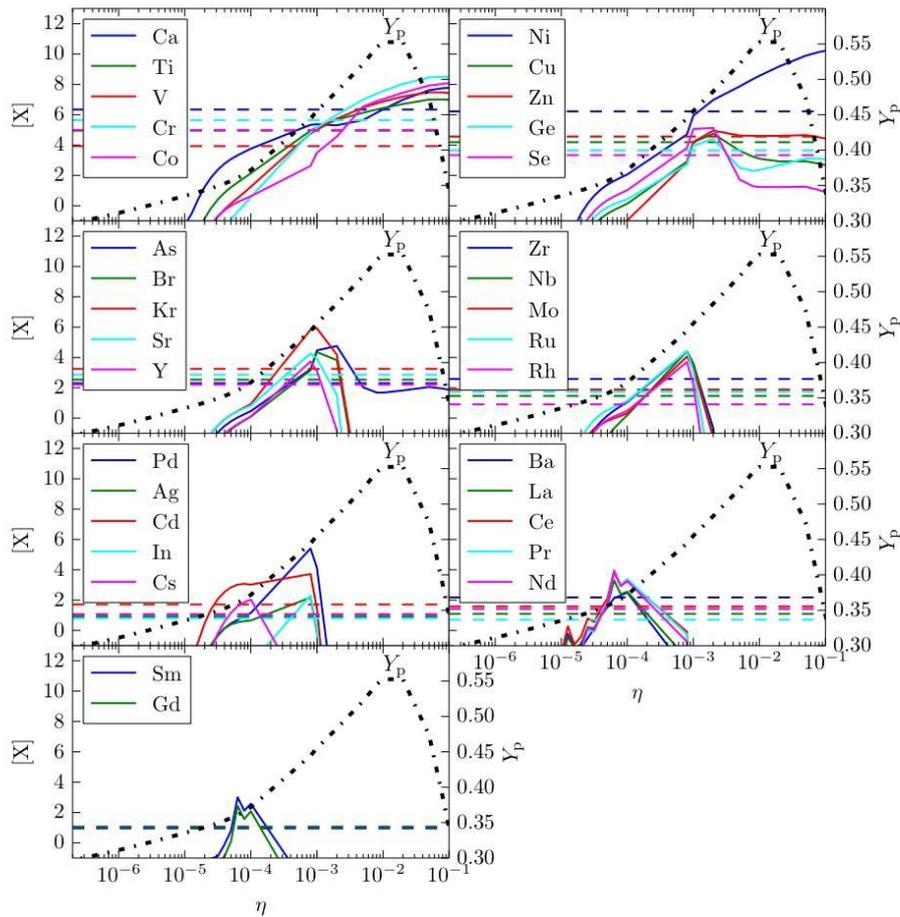


Рис. 1: Пример расчета обилия ядер с AlterBBN

## 4.2 Расчеты

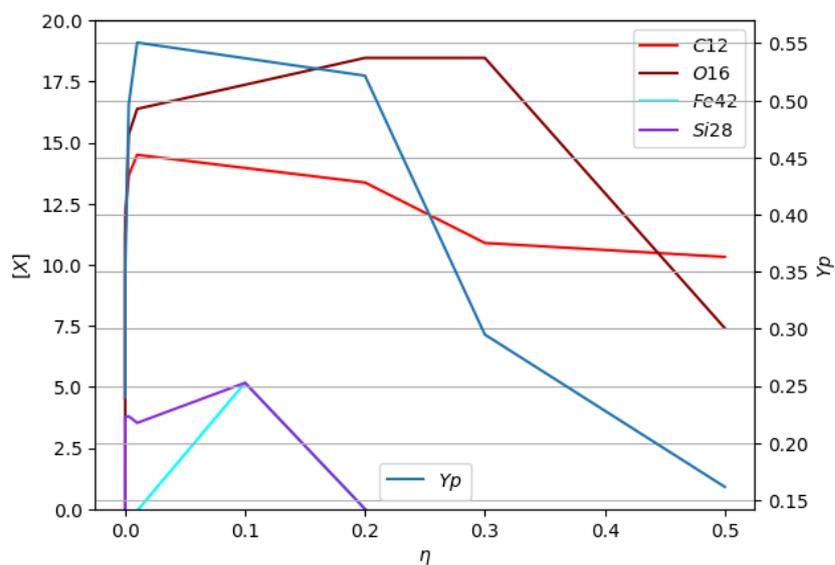


Рис. 2: Расчет необходимых элементов с AlterBBN

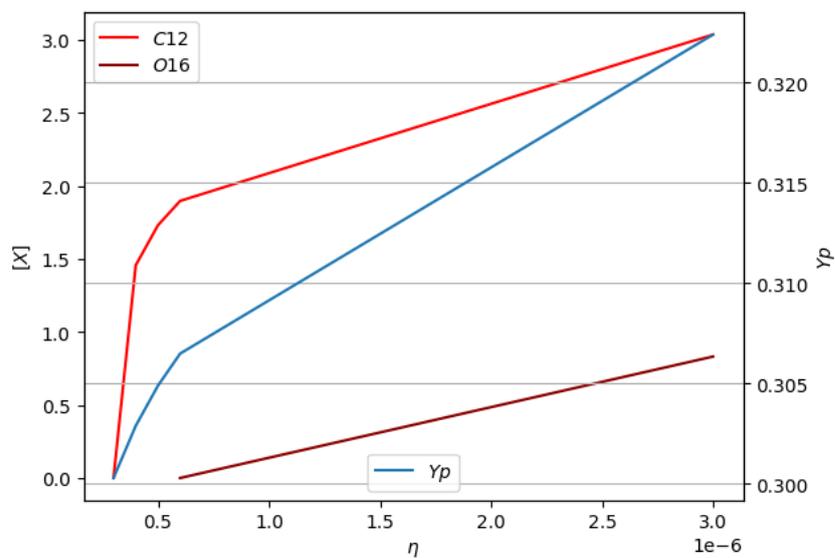


Рис. 3: Расчет необходимых элементов с AlterBBN, экстраполированный до необходимых размеров определения  $\eta$ , при которых наблюдаются значительные количества тяжелых элементов

На графиках изображены изобилия тяжелых элементов, которые могут участвовать в формировании пылинок антивещества, учитывая полную аналогию между материей и антиматерией. Верхний график демонстрирует поведение каждого элемента, в зависимости от определенных значений гелия.

Нижний график позволяет определить, начиная с какого значенния  $\eta$  появляются изобилия тяжелых элементов. Как видно из графиков, это значение составляет примерно  $5 * 10^{-7}$ . При этом наиболее тяжелые элементы из представленных (Fe, Si) не отображаются, так как появляются при больших значениях  $\eta$ , а именно  $\sim 10^{-5}$ .

## 5 Заключение