

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.

Студент

\_\_\_\_\_ М.Ю.Хлопов

\_\_\_\_\_ 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

Антиматерия - 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 Барийонная асимметрия Вселенной

Барийонная 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 барийонного 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.[1, 2]

Предполагаемый механизм возникновения Барийонной 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.[3, 4] 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 Барийонной асимметрии Вселенной может соответствовать действительности.[<https://doi.org/10.48550/a> 5]

## 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. [6, 7] 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 температуре  $T = 10^9$  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 первичных элементов антивещества тяжелее антигелия в барионно-ассимметричной Вселенной, в доменах с локально повышенной плотностью антибарионов.

## 3 Описание исследования

Предыдущая работа показала, что чрезвычайно трудно образовывать не только планеты или метеориты, а даже пылинки продуктами горения антизвезд в шаровом скоплении.

В данном исследовании подходим к задаче с другой стороны, а именно рассматриваем возможность образования тяжелых элементов и первичной металличности в доменах антивещества с повышенной, относительно средней барионной, плотностью антибарионов.

# 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 результатов, отражающих обилие тяжелых элементов, используется код AlterBBN, который позволяет пользователям рассчитывать количество элементов в стандартных и альтернативных космологических сценариях. Подключая библиотеку REACLIB для ядерных реакций, можно достичь значения  $\eta \sim O(1)$  с приемлемой точностью. [8]

Количество элементов рассчитывалось по формуле:

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

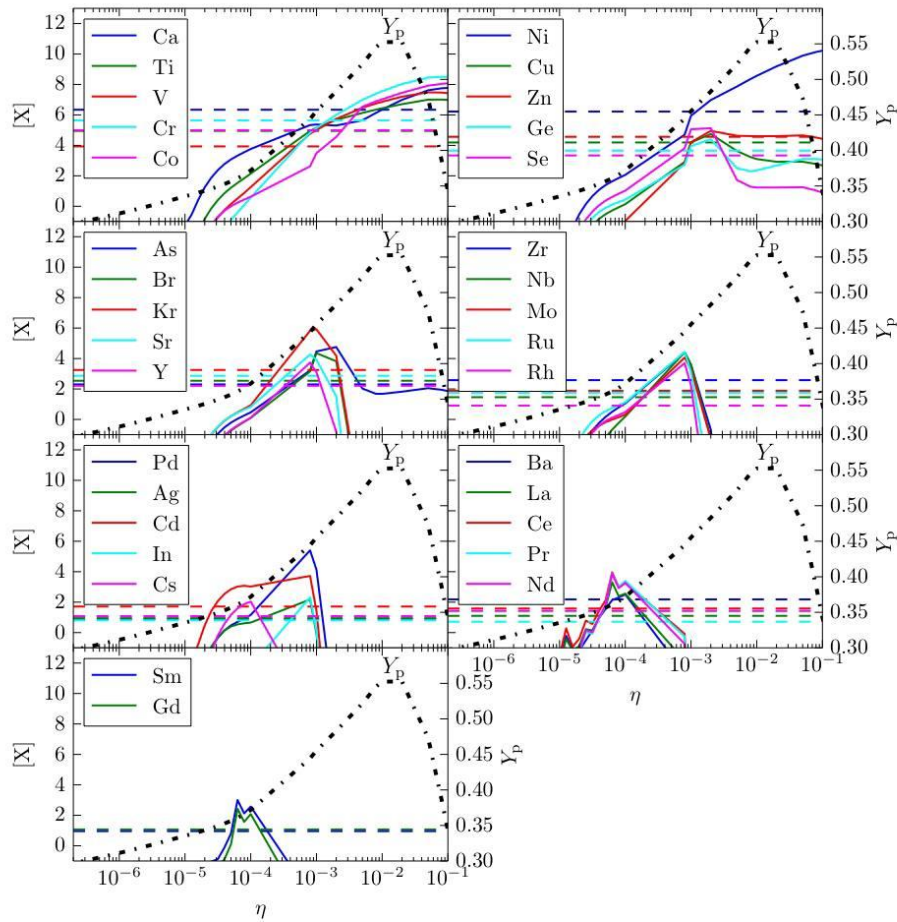


Рис. 1: Пример расчета обилия ядер с AlterBBN

## 4.2 Расчеты

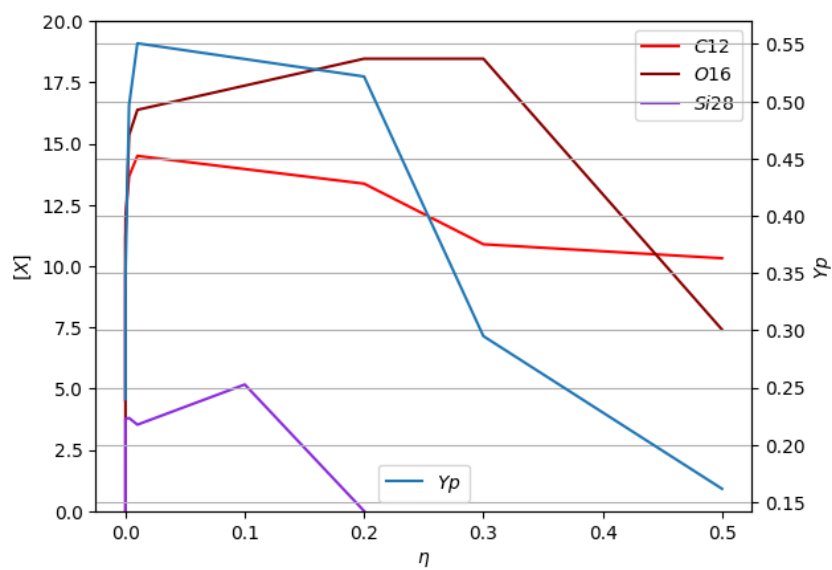


Рис. 2: Расчет элементов с AlterBBN

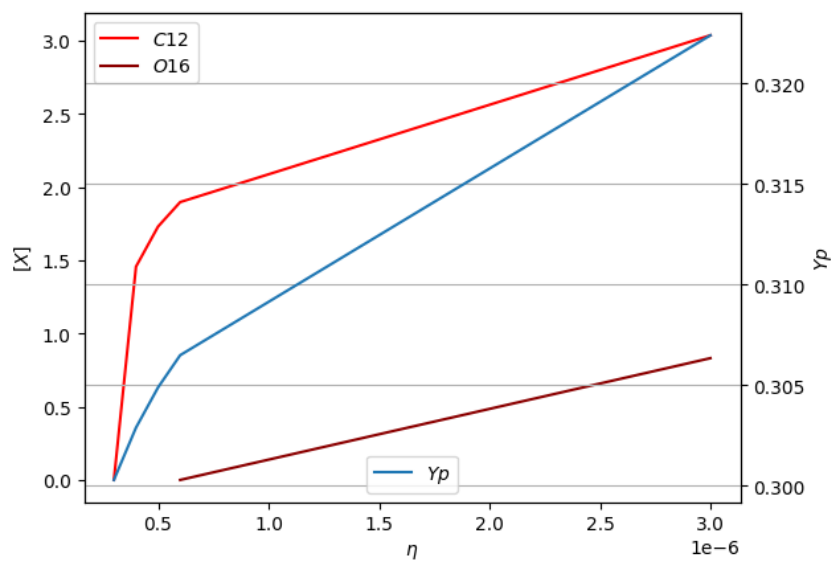


Рис. 3: Расчет элементов с AlterBBN



На графиках изображено обилие тяжелых элементов, которое может участвовать в формировании пылинок антивещества, учитывая полную аналогию между веществом и антивеществом. В расчетах видим, что есть некое пороговое значение  $\eta$ , начиная с которого возникает условие образования первичной металличности.

В стандартном космическом нуклеосинтезе металличность не образуется в силу относительно малой плотности барионного вещества, в данном же случае получается условие образования первичных тяжелых элементов.[9, 10]

Нижний график позволяет определить, начиная с какого значения  $\eta$  появляется заметное обилие тяжелых элементов. Это критическое значение составляет примерно  $5 \cdot 10^{-7}$ .

## 5 Заключение

Освоена программа AlterBBN, которая позволяет проводить расчеты образования тяжелых элементов в первичном нуклеосинтезе. Данная методика будет использована для многочисленных приложений, связанных с гипотезами об аномальной локальной плотности барионов в ранней Вселенной.

## Список литературы

- [1] Andrew J Winter и Cathie J Clarke. «Accretion of substellar companions as the origin of chemical abundance inhomogeneities in globular clusters». В: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 521.2 (март 2023), с. 1646—1673. DOI: 10.1093/mnras/stad312. URL: <https://doi.org/10.1093%2Fmnras%2Fstad312>.
- [2] Cyril Pitrou и др. «Precision big bang nucleosynthesis with improved Helium-4 predictions». В: *Physics Reports* 754 (сент. 2018), с. 1—66. DOI: 10.1016/j.physrep.2018.04.005. URL: <https://doi.org/10.1016%2Fj.physrep.2018.04.005>.
- [3] John Regan. «Massive Star Formation in Overdense Regions of the Early Universe». В: *The Open Journal of Astrophysics* 6 (апр. 2023). DOI: 10.21105/astro.2210.04899. URL: <https://doi.org/10.21105%2Fastro.2210.04899>.
- [4] K.A. Olive. «Review of Particle Physics». В: *Chinese Physics C* 38.9 (авг. 2014), с. 090001. DOI: 10.1088/1674-1137/38/9/090001. URL: <https://doi.org/10.1088%2F1674-1137%2F38%2F9%2F090001>.
- [5] Evan Grohs и George M. Fuller. *Big Bang Nucleosynthesis*. 2023. arXiv: 2301.12299 [astro-ph.CO].
- [6] Shunji Matsuura и др. «Heavy element production in inhomogeneous big bang nucleosynthesis». В: *Physical Review D* 72.12 (дек. 2005). DOI: 10.1103/physrevd.72.123505. URL: <https://doi.org/10.1103%2Fphysrevd.72.123505>.
- [7] S. Matsuura и др. «Affleck-Dine Baryogenesis and Heavy Element Production from Inhomogeneous Big Bang Nucleosynthesis». В: *Progress of Theoretical Physics* 112.6 (дек. 2004), с. 971—981. DOI: 10.1143/ptp.112.971. URL: <https://doi.org/10.1143%2Fptp.112.971>.
- [8] Ujjaini Alam и др. «Is there supernova evidence for dark energy metamorphosis?» В: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 354.1 (окт. 2004), с. 275—291. DOI: 10.1111/j.1365-2966.2004.08189.x. URL: <https://doi.org/10.1111%2Fj.1365-2966.2004.08189.x>.
- [9] A. Arbey и др. *AlterBBN v2: A public code for calculating Big-Bang nucleosynthesis constraints in alternative cosmologies*. 2019. arXiv: 1806.11095 [astro-ph.CO].
- [10] Brian D. Fields и др. «Big-Bang Nucleosynthesis after Planck». В: *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* 2020.03 (март 2020), с. 010—010. DOI: 10.1088/1475-7516/2020/03/010. URL: <https://doi.org/10.1088%2F1475-7516%2F2020%2F03%2F010>.