Министерство науки и высшего образования Российской Федерации Федеральное
государственное автомное образовательное учреждение высшего образрвания
«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

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

Введение

- Современные представления о Вселенной предполагают ее барионную асимметрию, а именно отсутствие макроскопического антивещества в количестве сравнимым с количеством вещества. Тем не менее, все механизмы генерации избытка вещества в изначально барионно-симметричной Вселенной при определенных условиях оказываются также механизмами локальной генерации антивещества в доменах, отражая сильную неоднородность бариосинтеза в малых масштабах

$$\eta = \frac{n_b - n_{\bar{b}}}{n_\gamma}$$

- Глобально Вселенная заполнена барионным веществом, однако в ней существуют локальные области, домены, в которых преобладает антивещество.
- В рамках инфляционной Вселенной возможно образование крупномасштабных доменов, размер которых обеспечивает их сохранение до настоящего времени.
- Первые оценки характерных масштабов домена, которое может сформировать шаровое скопление антизвезд в нашей Галактике:

$$10^3 M_\odot < M < 10^5 M_\odot$$

- Образование объектов, наблюдаемых в Галактике, связано в значительной мере с перемешиванием продуктов звездного нуклеосинтеза, приходящих из других частей Галактики.
- В работе показано, что приток из других галактик не способен снабдить домен антивещества продуктами звездного нуклеосинтеза. Поэтому, как механизм генерации металличности в домене, обсуждалась возможность повышенной плотности антибарионов, позволяющей в период первичного нуклеосинтеза образовывать элементы тяжелее (анти)гелия в значительном количестве.

Цель исследования

Целью данной работы является исследование возможности образования антиметеоритов в шаровом скоплении антизвезд путем рассмотрения двух ситуаций: возможности формирования твердых тел из антиматерии за счет дошедшего до нашей Галактики антивещества и исследования химического состава ранней Вселенной как возможности формирования и сохранения тяжелых элементов из антиматерии. При этом считаем, что свойства материи и антиматерии аналогичны.

Исследование дошедшего до нашей Галактики антивещества

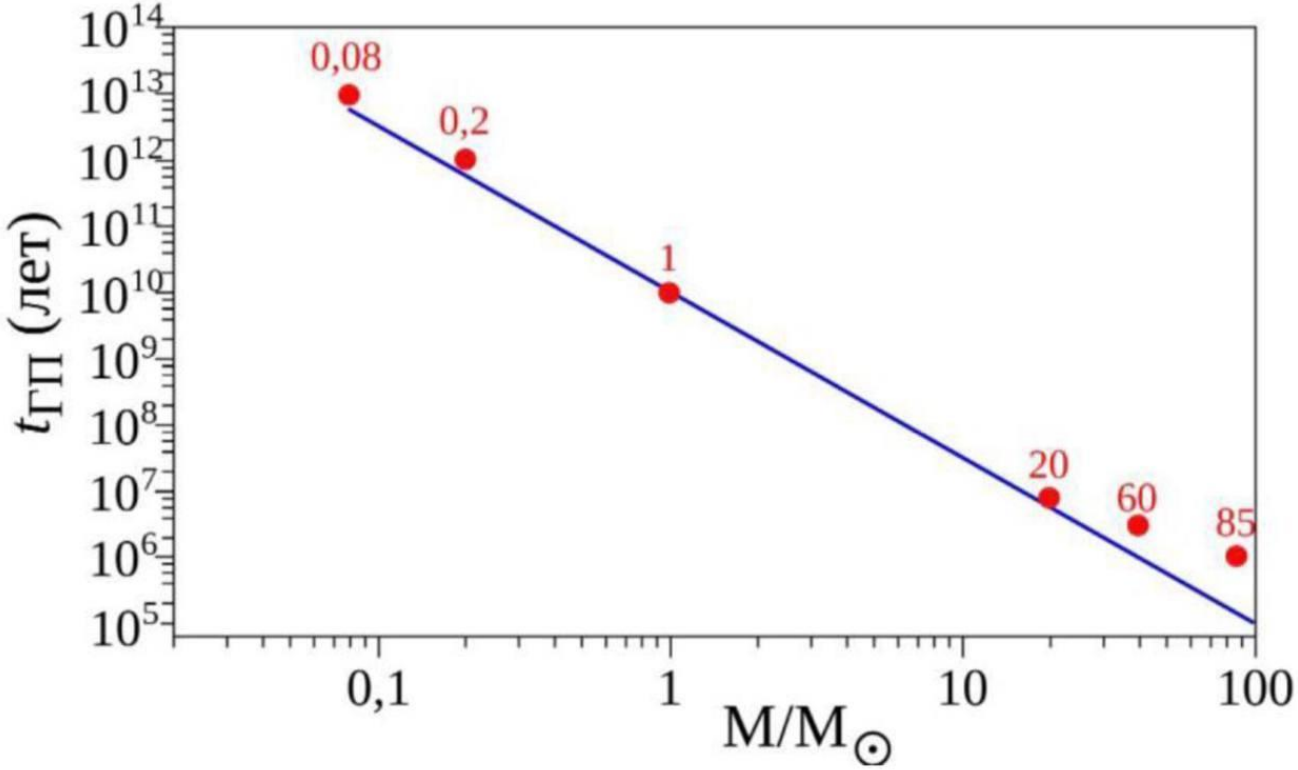


Рис1. Параметры звезд главной последовательности с массами, большими трех масс Солнца.

- Положим также, что звезды, время нахождения на главной последовательности которых больше времени эволюции Вселенной (14 млрд. лет), с большей вероятностью дают вклад в первичный объем антиматерии.

- Отношение количества антивещества, оставшегося после взрыва сверхновой 1 типа к количеству вышедшего вещества ничтожно мало. Вследствие этого, локальное образование тяжелых антиядер в антизвездном нуклеосинтезе не может обеспечить их локализацию в области антивещества и потому не может обеспечить образование молекул из антиматерии, поэтому рассмотрим возможность обогащения антиядрами из других галактик.

Рис2. Приближенная зависимость времени пребывания звезды на главной последовательности от ее массы.

Масса, $M_{\odot}$	Светимость, $L_{\odot}$	Радиус, $R_{\odot}$	Температура, K	Спектральный класс	Примеры
3	81	2,0	12200	B7	Регул
2,5	39	1,84	10700	B9	Сириус
2	16	1,64	9080	A2	Фомальгаут
1,7	8,0	1,52	7960	A7	Альтаир
1,35	4,0	1,2	6400	F5	Процион
1,08	1,45	1,05	5900	G0	Альфа Центавра A
1	1	1	5800	G2	Солнце
0,95	0,7	0,91	5600	G5	Мю Кассиопеи
0,85	0,44	0,87	5300	G8	Тау Кита
0,83	0,36	0,83	5100	K0	
0,78	0,28	0,79	4830	K2	Эпсилон Эридана
0,68	0,18	0,74	4370	K5	Альфа Центавра B
0,33	0,03	0,36	3400	M2	Лаланд 21185
0,20	0,0005	0,21	3200	M4	Росс 128
0,10	0,0002	0,12	3000	M6	Вольф 359

Возможность выхода антизвездного ветра из галактики

Рассчитаем скорость, преодоление которой ветром означает его выход в межгалактическое пространство. Приравняем силу гравитационного притяжения галактики и кинетическую энергию антизвездного ветра:

$$F_G = \frac{GMm}{r} = \frac{mv^2}{2} \quad \Rightarrow \quad v = \sqrt{\frac{2GM}{r}}$$

где $M \sim 10^{42}$, $r \sim 10^{20}$, $G \sim 10^{-11}$, тогда имеем скорость ≈ 100 м/с Таким образом, получаем, что скорость антизвездного ветра значительно превышает граничную скорость, следовательно антизвездный ветер выйдет в МГС.

Аннигиляция в галактике, породившей звездный антиветер

В расчетах будем использовать параметры галактики Малое Магелланово облако.

Рассчитаем плотность с учетом того, что $R \sim 9 \cdot 10^{21}$ см:

$$n = \frac{M}{V \cdot m_N} = \frac{4 \cdot 10^{40} \cdot 4}{9 \cdot 10^{66} \cdot 1.6 \cdot 10^{-24}} \sim 10^{-5} \frac{\text{шт}}{\text{см}^3} = 10 \frac{\text{шт}}{\text{м}^3}$$

Рассчитаем время аннигиляции:

$$t \sim \frac{1}{n\sigma v} \approx 2 \cdot 10^{11} \text{с},$$

$$\sigma v \sim \frac{2 \cdot 10^{-26} \text{с}}{\beta},$$

$$\sigma v n = 6 \cdot 10^{-13} \cdot 10 \sim 6 \cdot 10^{-12}$$

Время, за которое частица покидает галактику:

$$t \sim \frac{R^2}{2D} \sim \frac{(10^{22})^2}{2 \cdot 10^{28}} \sim 10^8 \text{лет} \sim 3 \cdot 10^{15} \text{с}\,.$$

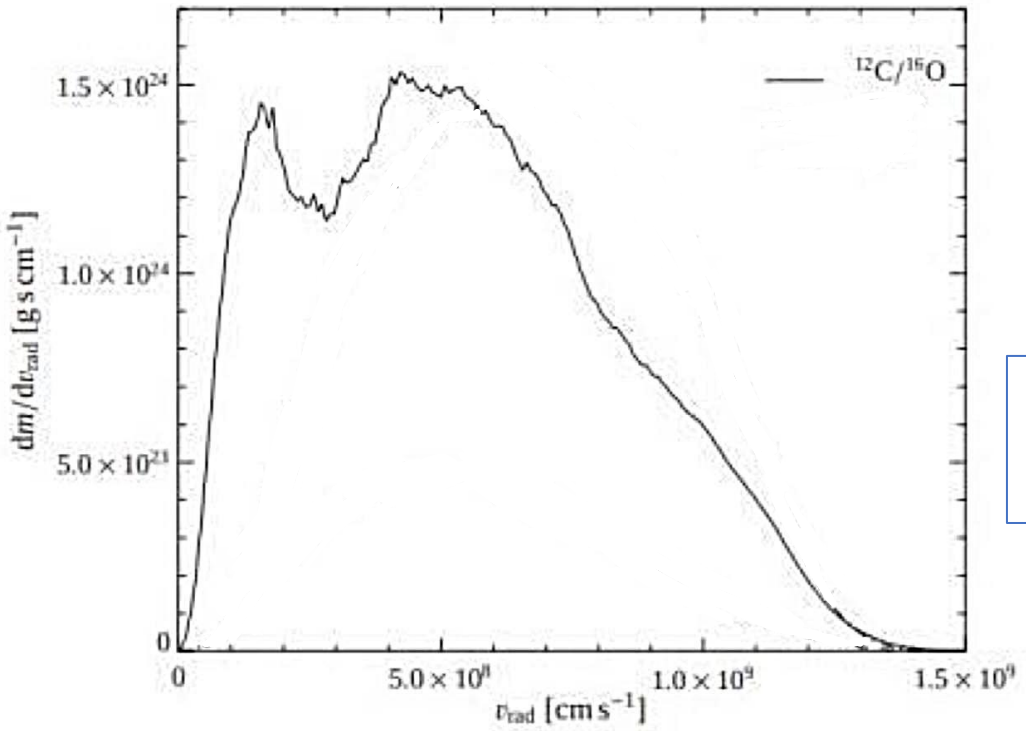
Как видно из вычислений, время аннигиляции значительно меньше времени, за которое частица покидает галактику, что сильно ограничивает количество вышедшего антивещества.

Найдем минимальную скорость, начиная с которой антивещество способно выйти в межгалактическую среду:

$$\frac{1}{\sigma v n} = 3 \cdot 10^{15}\,,$$

$$\sigma \sim \frac{2 \cdot 10^{-26} \text{c}^2}{v^2}\,,$$

$$v \sim 2 \cdot 10^{-26} \cdot \text{c}^2 \cdot n \cdot 3 \cdot 10^{15} \sim 2 \cdot 10^{-26} \cdot 9 \cdot 10^{16} \cdot 10 \cdot 3 \cdot 10^{15} \sim 0.24\text{c} \sim 0.24\text{c} \sim 0.7 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}\,.$$



Распределение по скоростям вещества при взрыве сверхновой 1-го типа.

$$S = \frac{1}{2} \cdot 7 \cdot 10^{19} \cdot 1.5 \cdot 10^{6} \approx 5.25 \cdot 10^{25}$$

$$I = \int_{0}^{1.5 \cdot 10^{8}} (x + 1.5 \cdot 10^{24})^2 = (1.5 \cdot 10^{24})^2 \cdot 1.5 \cdot 10^{8} \approx 3 \cdot 10^{56}$$

$$\frac{S}{I} = \frac{3.5 \cdot 10^{29}}{3 \cdot 10^{56}} = 12 \cdot 10^{-28}, \quad 10^{-8} \cdot 10^{-28} = 10^{-36}$$

а) Площадь треугольника б) Аппроксимация параболой

Интерполируем график до нужного порядка $\sim 10^6$ (по порядку второй космической скорости М4)
S - площадь, соответствующая количеству вышедшего антивещества.
I - все антивещество, выброшенное сверхновой.

а) б)

Аннигиляция антиветра в межгалактической среде

Рассчитаем скорость аннигиляции нерелятивистского вещества. Учитывая, что средняя плотность во Вселенной $n = 3 \cdot 10^{-7}$ шт/м^3, а $\sigma n \sim 2 \cdot 10^{-26}$ с/β , вычислим скорость аннигиляции:

$$nv\sigma \sim 2 \cdot 10^{-19} \frac{\text{шт}}{\text{с}}.$$

Характерное время аннигиляции есть велечина обратная данной, таким образом получаем велечину $5 \cdot 10^{18}$ с. То есть характерное время аннигиляции больше больше возраста Вселенной $(\sim 5 \cdot 10^{17}$ с$)$. Делаем из этого вывод, что поток не способен дойти до нас.

Аннигиляция в нашей Галактике

Рассматриваем нерелятивистский случай, со скоростью порядка скорости ускользания из галактик, то есть на три порядка меньше, чем скорость света.

$$\sigma \sim \frac{1.6 \cdot 10^{-26} \cdot c^2}{v^2} \sim \frac{2 \cdot 10^{-26} \cdot 9 \cdot 10^{16}}{9 \cdot 10^{10}} \sim 1.6 \cdot 10^{-20}$$

Тогда произведение $\sigma n R \sim 0.1^4$. Это означает непрозрачность гало нашей Галактики относительно дошедшего до нас антиветра для нерялитивистского случая.

Релятивистский случай

Рассмотрим скопление из антивещества. Возьмем параметры M4. Если брать релятивистские скорости, то очевидно, что скорость движения антиядер будет значительно превышать скорость ускользания скопления M4 ~ 15 км/с. Тогда остается возможность захвата скоплением антиядер. Проведя расчеты, аналогичные пройденным, получаем, что произведение $\sigma n R \sim 0.1$. Это говорит о "прозрачности" рассматриваемого скопления относительно нашего антиветра. То есть захват также невозможен.

Итог

Для возможности образования твердых тел из антиматерии необходимо существование молекул, пыли антивещества с последующим слиянием этой пыли, молекул в какие-то более плотные объекты. Однако мы получили, что даже при условии дошедшего до нас антивещества, оно не в состоянии задержаться в гало в силу значительной скорости передвижения. Так же была опровергнута возможность захвата доменом антивещества пролетающего с определенной скоростью антиядра.

Химический состав ранней Вселенной

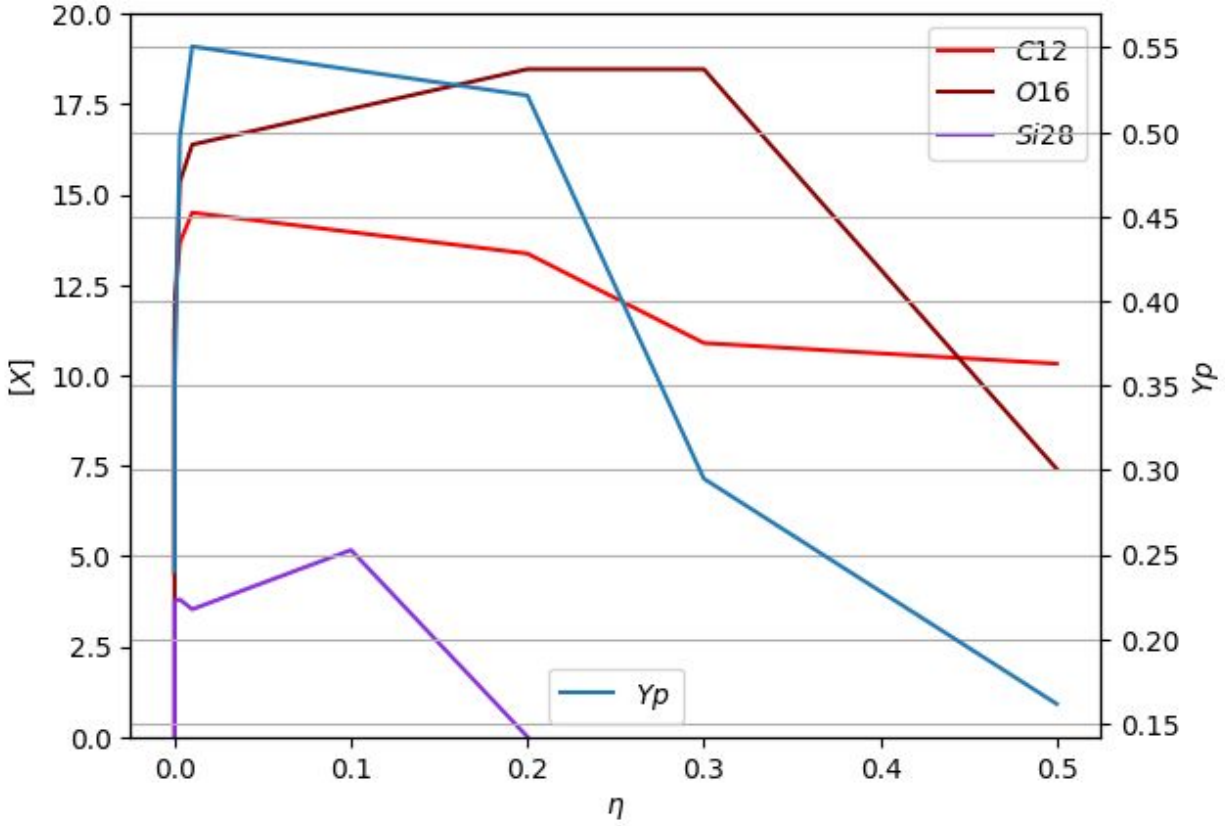
Программа AlterBBN

- 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.

РАСЧЕТЫ

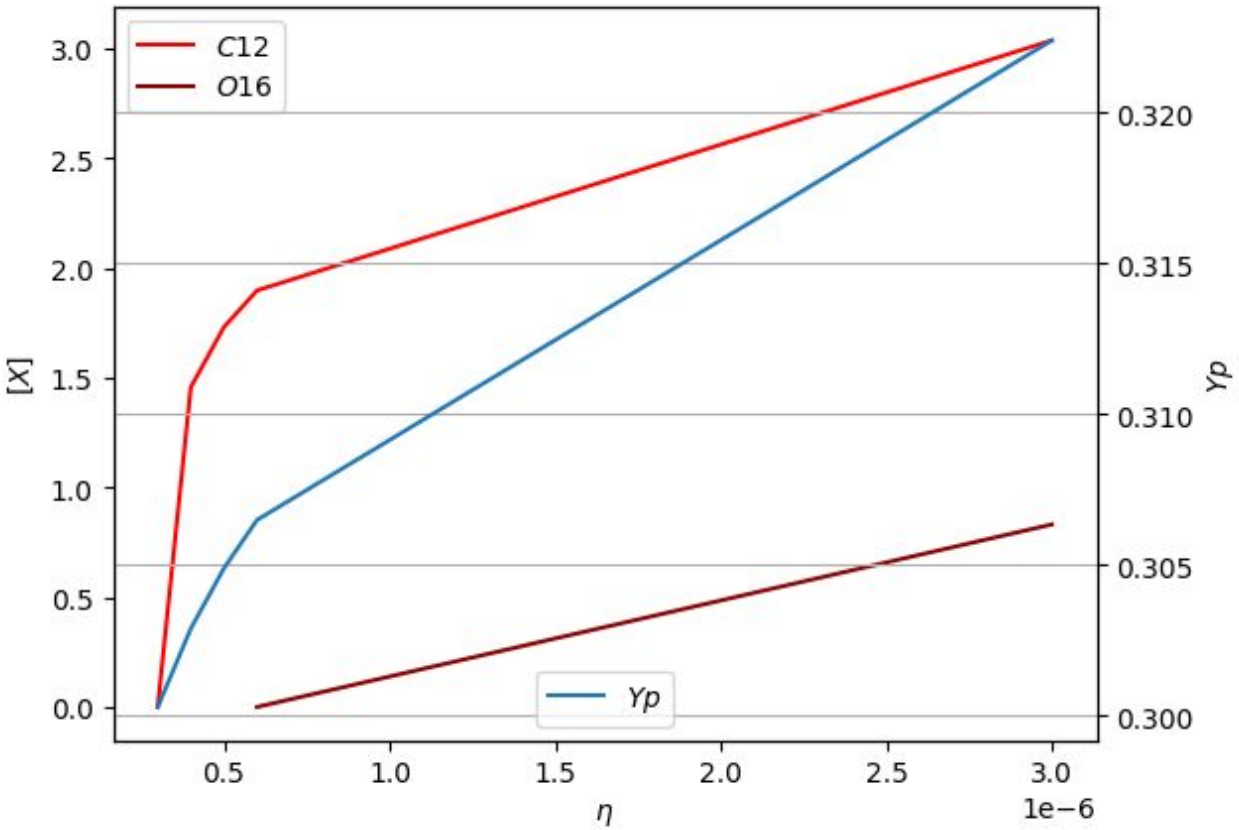
В стандартном космическом нуклеосинтезе металличность не образуется в силу относительно малой плотности барионного вещества, в данном же случае получается условие образования первичных тяжелых элементов.



Расчет элементов с AlterBBN

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

X - рассматриваемый элемент.



Заключение

В рамках данной работы исследовалась возможность формирования антиметеоритов в шаровом скоплении антизвезд. Для этого были рассмотрены два случая.

- В первом, предположение об образовании твердых тел из антиматерии основывалось на возможности формирования хотя бы пылинок из антивещества. Было показано, что образование тяжелых элементов в звездном нуклеосинтезе не позволяет обеспечить условия формирования таких пылинок, поскольку все продукты звездного нуклеосинтеза неизбежно покидают область шарового скопления антизвезд и аннигилирует в Галактике. Поэтому рассматривалась возможность притока антивещества в данную область из других галактик

- Показано, что даже при условии дошедшего до нас антивещества, оно не в состоянии задержаться в силу значительной скорости передвижения. Так же была опровергнута возможность захвата доменом антивещества, пролетающего с определенной скоростью антиядра.

- Во втором, исследуется возможность образования первичных элементов в ранней Вселенной тяжелее антигелия в барионно-асимметричной Вселенной, в доменах с локально повышенной плотностью антибарионов. Для расчетов используется программа AlterBBN. С ее посмощью была исследована зависимость обилия элементов от значения η путем построения соответствующих графиков. По ним было найдено значение η равное $5 \cdot 10^{-7}$, начиная с которого появляется заметное обилие тяжелых элементов.

- В дальнейшем планируется более полно изучить вопрос химического состава ранней Вселенной, рассматривая также домены с локально пониженной плотностью антибарионов, с использованием методик измерения программы AlterBBN.