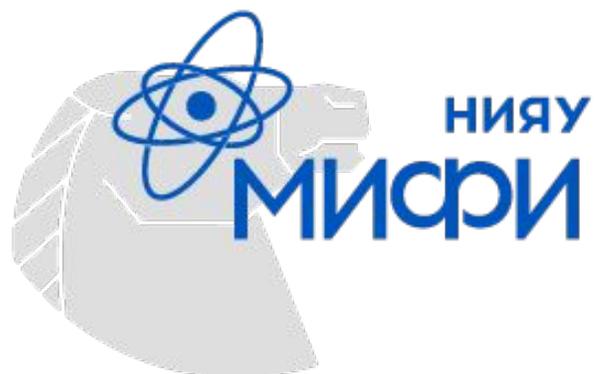


МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ФЕДЕРАЛЬНОЕ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»

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

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.
- Законы сильного и электромагнитного взаимодействия неразличимы для барионов и антибарионов. Соответственно, можно ожидать, что эволюция материи и антиматерии будет аналогична. Однако, следует учитывать неэквивалентность условий эволюции за счет асимметрии Вселенной, в основной части которой доминирует вещество.
- В рамках инфляционной Вселенной возможно образование крупномасштабных доменов, размер которых обеспечивает их сохранение до настоящего времени.

- Образование объектов, наблюдаемых в Галактике, связано в значительной мере с перемешиванием продуктов звездного нуклеосинтеза, приходящих из других частей Галактики. Однако для локальной области антивещества этот механизм не работает, поэтому рассматриваем лишь то, что осталось в данной области и не распространилось по Галактике с последующей аннигиляцией. В таком случае, остается лишь возможность притока антиматерии из других галактик.
- 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 учитывается, что электромагнитные и ядерные свойства вещества и антивещества строго симметричны.

- В работе рассматривается ситуация, когда химический состав первичного вещества, которое в своей эволюции сформировало шаровое скопление, аналогичен первичному химическому составу барионного вещества, то есть элементов тяжелее гелия там практически нет. В таком случае, необходимая для формирования молекул металличность образуется в результате ядерных процессов в антизвездах, выбрасывающих при взрыве относительно тяжелые элементы в пространство.
- Потеря антивещества происходит также за счет звездного антиветра. Если антивещество покидает пределы шарового скопления за счет звездного антиветра, то оно покидает скопление и при взрывах сверхновых, поскольку скорости во втором случае значительно больше.

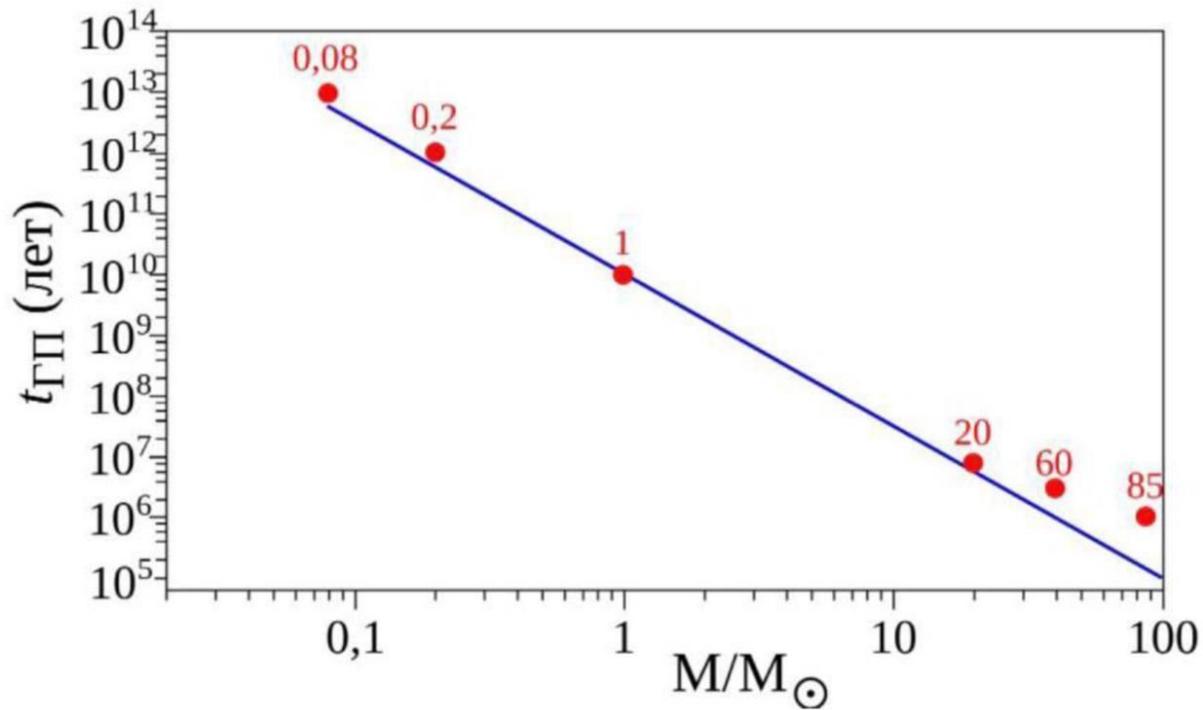


Рис1. Приближенная зависимость времени пребывания звезды на главной последовательности от ее массы.

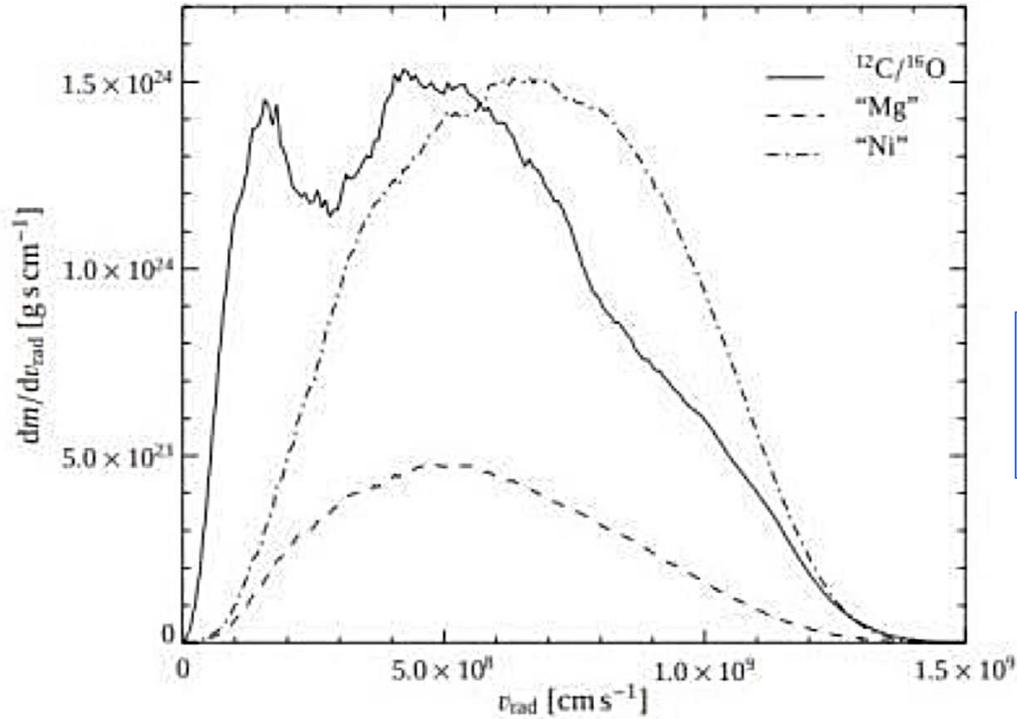
- Рассмотрим скорости ускользания антиматерии вследствие звездного антиветра и сравним со второй космической скоростью для скопления М4, использующегося в данной работе как прототип кластера антивещества
- Положим также, что звезды, время нахождения на главной последовательности которых больше времени эволюции Вселенной (14 млрд. лет), дают основной вклад в шаровое скопление антизвезд.

- Из графика (рис 1) это соответствует всем звездам с массой меньше чем 3 массы Солнца. Исходя из таблицы (рис 2) получаем (первый и третий столбцы), что скорость всех таких звезд примерно равна второй космической скорости Солнца (617 км/с), что значительно больше, чем скорость ускользания из скопления М4 (15 км/с). Значит, все выброшенное звездным антиветром антивещество уходит из скопления с последующей аннигиляцией.

Рис2. Параметры звезд главной последовательности с массами, большими трех масс Солнца.

Масса, M_{\odot}	Светимость, L_{\odot}	Радиус, R_{\odot}	Температура, К	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 А
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 В
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

Найдем, какая часть антивещества сохранится после взрыва сверхновой



$$S = \frac{1}{2} \cdot 7 \cdot 10^{19} \cdot 1.5 \cdot 10^6 \approx 5 \cdot 10^{25}$$

$$I = \int_0^{1.5 \cdot 10^8} (x + 1.5 \cdot 10^{24})^2 = (1.5 \cdot 10^{24})^2 \cdot 1.5 \cdot 10^8 \approx 3 \cdot 10^{56}$$

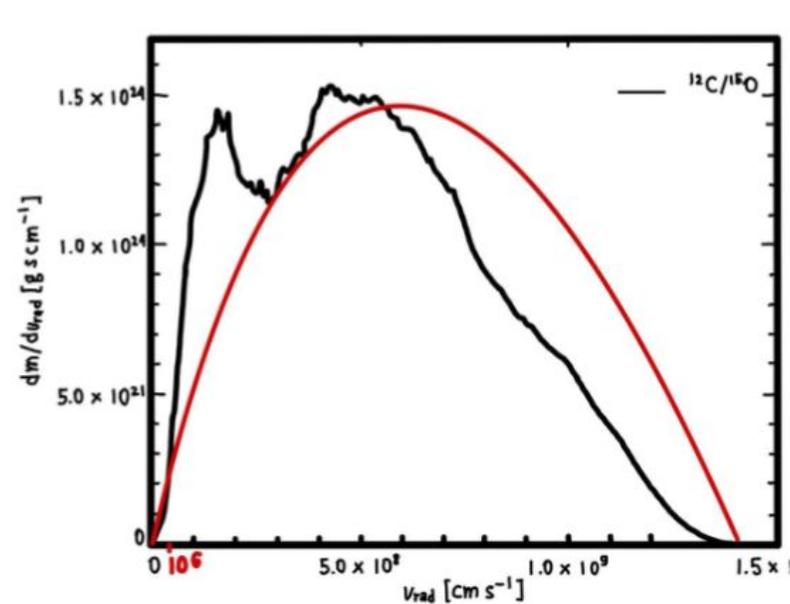
$$\frac{S}{I} = \frac{3.5 \cdot 10^{25}}{3 \cdot 10^{56}} = 12 \cdot 10^{-31}$$

$$10^{-8} \cdot 10^{-31} = 10^{-39}$$

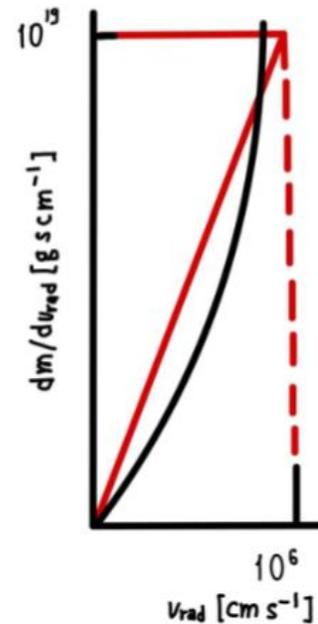
а) Аппроксимация параболой б) Площадь треугольника

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

- В рамках барионно-асимметричной Вселенной шаровые скопления антизвезд составляют 10^{-8} от вещества.
- 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.



а)



б)



**Исследование дошедшего до
нашей
Галактики антивещества**



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:

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

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.

*Согласно рассматриваемой модели ветра скорость ветра 310 км/с

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:

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

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

$$v \sim 2 \cdot 10^{-26} \cdot \text{с}^2 \cdot n \cdot 3 \cdot 10^{15} \sim 2 \cdot 10^{-26} \cdot 9 \cdot 10^{16} \cdot 10 \cdot 3 \cdot 10^{15} \sim 0.1 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Проведя вычисления, аналогичные ранее проделанным, получаем, что доля вышедших в межгалактическое пространство антиядер, рожденных в антизвездах других галактик: $10^{-8} \cdot 10^{-26} = 10^{-34}$

Аннигиляция антиветра в межгалактической среде

Рассчитаем скорость аннигиляции нерелятивистского вещества. Учитывая, что средняя плотность во Вселенной $n = 3 \cdot 10^{-7}$ шт/м³, 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 величина обратная данной, таким образом получаем величину $5 \cdot 10^{18}$ с. То есть характерное время аннигиляции больше возраста Вселенной ($\sim 5 \cdot 10^{17}$ с). Делаем из этого вывод, что поток 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 $\sigma n R \sim 10^4$. Это означает непрозрачность гало нашей Галактики относительно дошедшего до нас антиветра для нерелятивистского 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 галактического антиветра. То есть захват также невозможен.

Проблема образования молекул, твердых тел антивещества продуктами звездного нуклеосинтеза

Для возможности образования твердых тел из антивещества необходимо существование соответствующих молекул пыли с последующим их слиянием в какие-то более плотные объекты. Однако мы получили, что даже при условии притекания антивещества из других галактик до нашей Галактики, оно не в состоянии задержаться в гало в силу значительной скорости передвижения. Так же была опровергнута возможность захвата шаровым скоплением антивещества пролетающих с определенной скоростью антиядер, образовавшихся в других галактиках.

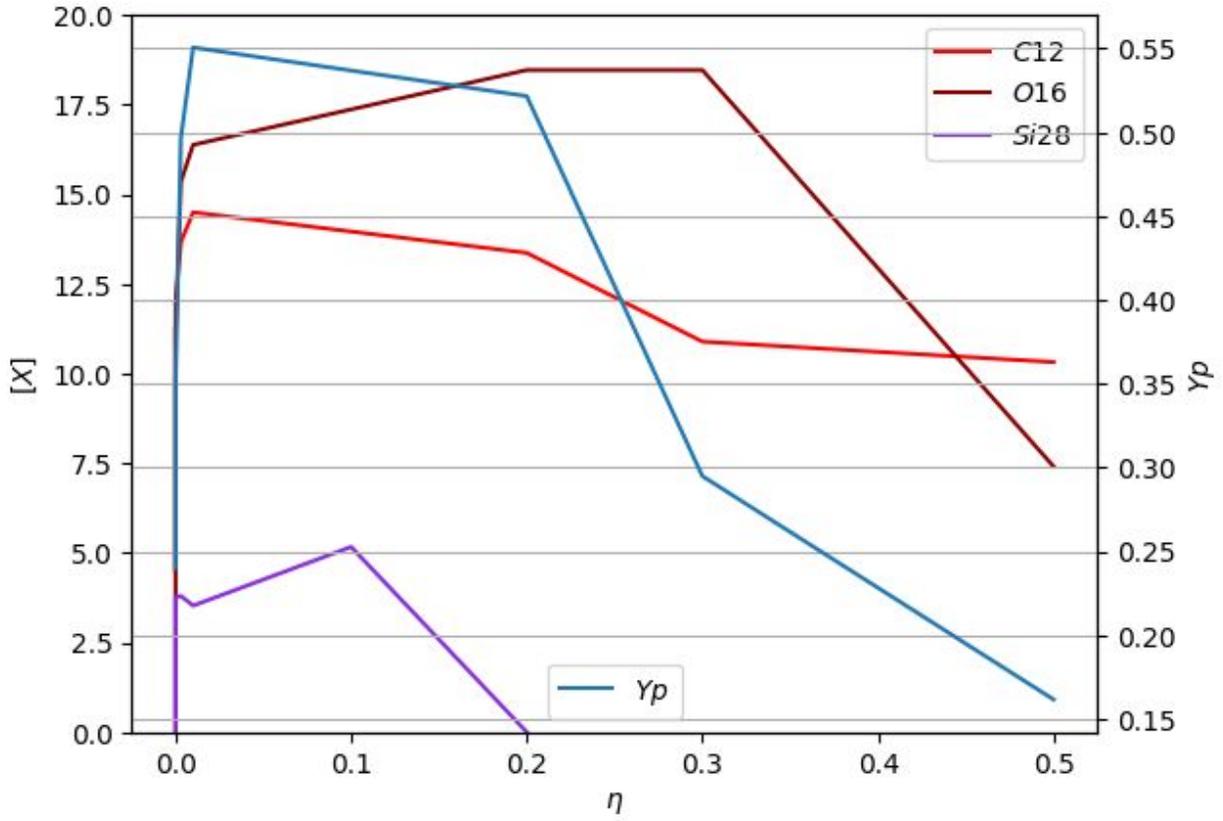


Химический состав ранней Вселенной



РАСЧЕТЫ

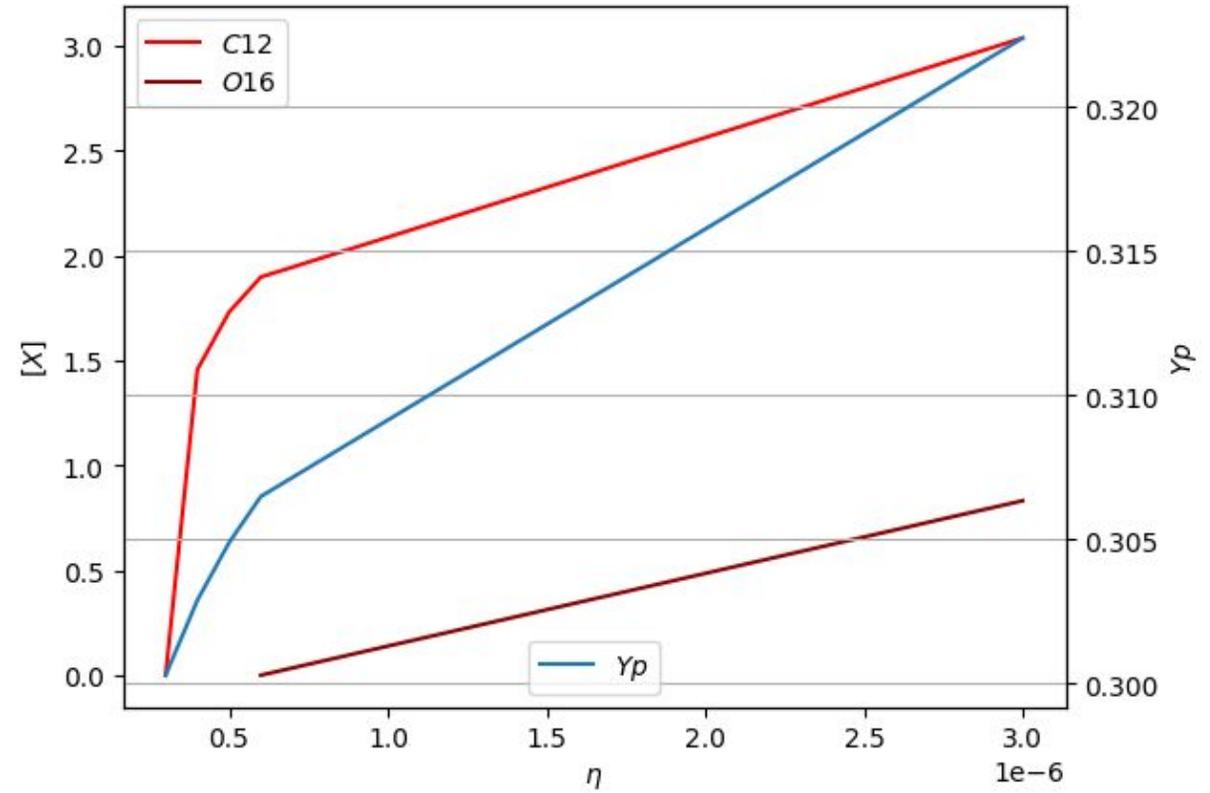
- На графике изображена зависимость обилия тяжелых элементов, которые могут участвовать в формировании пылинок антивещества, от значения η .
- В стандартном космическом нуклеосинтезе металличность не образуется в силу относительно малой плотности барионного вещества, в данном же случае получается условие образования первичных тяжелых элементов.
- Графики позволяют определить, начиная с какого значения появляется заметное обилие тяжелых элементов. Это критическое значение составляет примерно $- 5 \cdot 10^{-7}$.



Расчет элементов с AlterBBN

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

X - рассматриваемый элемент.



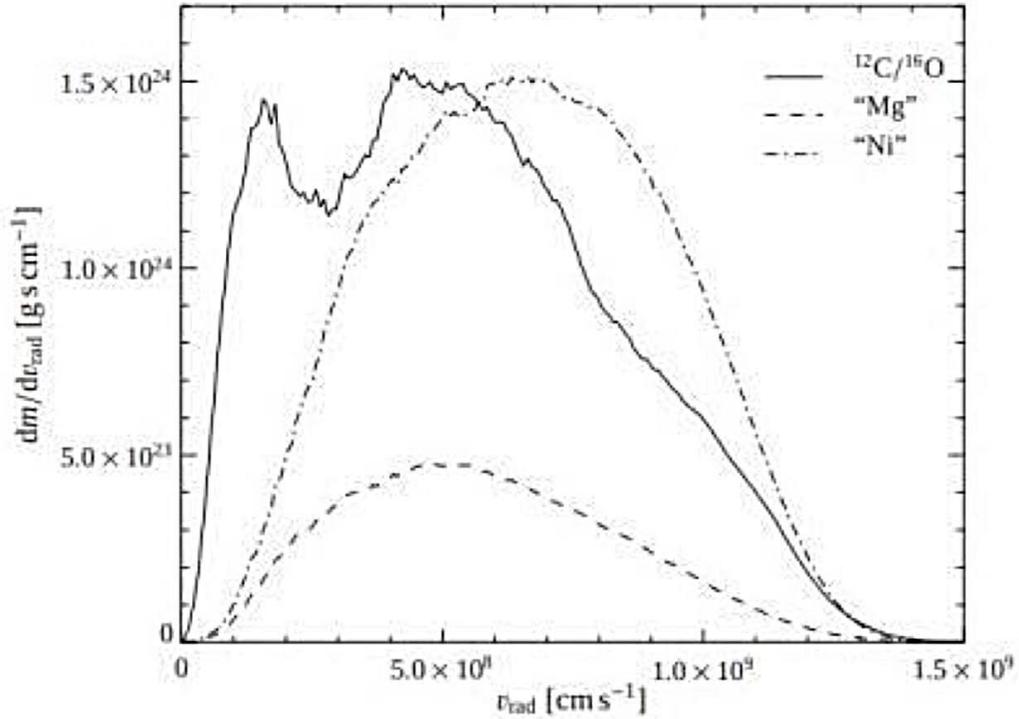
Заключение

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

- В первом случае, предположение об образовании твердых тел антивещества основывалось на возможности формирования хотя бы пылинок антивещества продуктами звездного нуклеосинтеза. 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 из других галактик антивещества до нашей Галактики, оно не в состоянии задержаться в силу значительной скорости передвижения. Также была опровергнута возможность захвата шаровым скоплением антивещества пролетающих с определенной скоростью антиядер галактического ветра.
-
- Во втором случае, исследовалась 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 помощью 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.

Спасибо за внимание!

Расчет доли антивещества, вышедшего в межгалактическое пространство



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

$$v \sim 2 \cdot 10^{-26} \cdot c^2 \cdot n \cdot 3 \cdot 10^{15} \sim$$

$$\sim 2 \cdot 10^{-26} \cdot 9 \cdot 10^{16} \cdot 10 \cdot 3 \cdot 10^{15} \sim 0.1 \cdot 10^8 \frac{\text{M}}{\text{c}}$$

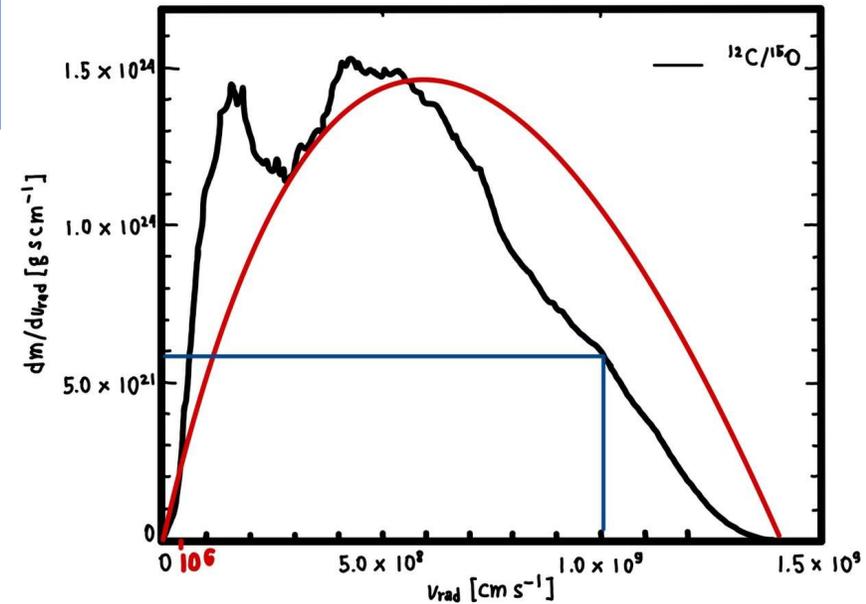
$$\frac{S}{I} = \frac{3 \cdot 10^{30}}{3 \cdot 10^{56}} = 10^{-26}$$

$$S = \frac{1}{2} \cdot 10^9 \cdot 5 \cdot 10^{21} \sim 3 \cdot 10^{30}$$

$$I = \int_0^{1.5 \cdot 10^8} (x + 1.5 \cdot 10^{24})^2 = (1.5 \cdot 10^{24})^2 \cdot 1.5 \cdot 10^8 \approx 3 \cdot 10^{56}$$

$$10^{-8} \cdot 10^{-26} = 10^{-34}$$

В рамках барионно-асимметричной Вселенной шаровые скопления антизвезд составляют 10^{-8} от вещества.



Наблюдательные ограничения

Существуют наблюдательные ограничения, которые определяют допустимый размер доменов, заполненных антивеществом. Так, при эволюции домена происходит аннигиляция на его границах. Значит, для того, чтобы он дожил до современной эпохи, домен должен иметь достаточно большие масштабы. Это определяет нижнюю границу. Также он не должен быть слишком большим, иначе гамма фон от аннигиляции на границах домена не соответствовал бы наблюдаемому. Данное ограничение определяет верхний предел на размеры макроскопической области антивещества. Эволюция таких доменов может приводить к образованию макроскопических объектов антивещества в Галактике. Первые оценки характерных масштабов домена, которое может сформировать шаровое скопление антизвезд в нашей Галактике: $10^3 M_{\odot} < M < 10^5 M_{\odot}$

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.

Основные подпрограммы

- **stand_cosmo.x** вычисляет обилие элементов космологической модели Λ CDM с предопределенным значением η по умолчанию.
- **alter_eta.x** вычисляет обилие элементов космологической модели с требуемым входным аргументом:
 - η : отношение концентрации барионов к концентрации фотонов;
- **alter_neutrino.x** вычисляет обилие элементов в стандартной космологической модели с требуемыми входными аргументами:
 - N_ν : число видов нейтрино в стандартной модели;
 - ξ_{ν_e} : параметр вырождения электронных нейтрино;
 - ξ_{ν_μ} : параметр вырождения мюонных нейтрино;
 - ξ_{ν_τ} : 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_ρ : отношение плотности темной энергии к плотности энергии излучения во время BBN;
 - n_ρ : 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_ρ : 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_ρ : отношение плотности темной энергии к плотности энергии излучения во время BBN;

- n_ρ : показатель уменьшения плотности темной энергии;

- k_Σ : отношение производства энтропии скрытой массы к производству энтропии излучения во время BBN;

- n_Σ : показатель производства энтропии скрытой массы;

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

AlterBBN имеет возможность изменять количество видов нейтрино и учитывать нейтринное вырождение среди нейтрино стандартной модели в дополнение к непосредственному изменению скорости расширения и наличию энтропии. Кроме того, существует возможность применять модели повторного нагрева с результирующим производством энтропии. Эти модифицированные космологические сценарии по-разному влияют на свойства ранней Вселенной.

Модель ветра

В данной модели используем приближение тонкой оболочки, которое хорошо обосновано в космологическом контексте. Расширяющийся газ сметает долю окружающего межгалактического вещества в тонкую оболочку. Оставшийся газ просачивается в горячую, разреженную внутреннюю часть, давление которой стимулирует расширение оболочки. Предполагая сферическую симметрию, мы можем описать отток с помощью следующей системы уравнений:

$$\ddot{R} = \frac{4\pi R^2}{M_s}(p - p_{exp}) - \frac{G}{R^2}(M_d + M_{gal} + \frac{M_s}{2}) + \Omega_\lambda H^2(z)R - \frac{\dot{M}_s}{M_s}(\dot{R} - v_{int}),$$

$$\dot{p} = \frac{L}{2\pi R^3} - 5p\frac{\dot{R}}{R},$$

$$\dot{M}_s = \begin{cases} 0, & v_{inf} \geq \dot{R} \\ 4\pi R^2 \rho_g (\dot{R} - v_{inf}), & v_{inf} \leq \dot{R}. \end{cases}$$

Здесь R - радиус оболочки, M_s - масса оболочки, а p - давление внутри горячего пузыря. Оболочка расширяется через гало галактики-хозяина и попадает в МГС (межгалактическая среда). Плотность барионов окружающей среды, поле скоростей падения и внешнее давление обозначаются ρ_g , v_{inf} , p_{ext} соответственно, M_{gal} - масса гало.

Начальная скорость, с которой происходит расширение:

$$v_{\omega} = 310 \left(\frac{f_{esc}}{0.25} \frac{2}{\frac{f_{sw}}{f_{ast}}} \frac{126 M_{\odot}}{w_{SN}} \right) \frac{\text{км}}{\text{с}}.$$

В данной модели $f_* = 0.1$, $f_{esc} = 0.25$, $w_{SN} = 126 M_{\odot}$. Таким образом, скорость нашего пузыря примерно равна 310 км/с.