

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 2021

# Содержание

<b>Введение</b>	<b>2</b>
<b>1 Цель исследования</b>	<b>3</b>
<b>2 Описание исследования</b>	<b>3</b>
<b>3 Исследование дошедшего до нашей галактики антивещества</b>	<b>4</b>
3.1 Модель ветра . . . . .	4
3.2 Возможность выхода антизвездного ветра из галактики . . . . .	4
3.3 Аннигиляция и распространение антизвездного ветра в межгалактической среде . . . . .	5

# Введение

Звёздный ветер — постоянно происходящий процесс, который приводит к снижению массы звезды. Количественно этот процесс может быть охарактеризован массой вещества, которую теряет звезда в единицу времени (обычно измеряется в единицах массы Солнца в год). Он может играть важную роль в звёздной эволюции: так как в результате этого процесса происходит уменьшение массы звезды, то от его интенсивности зависит срок жизни звезды.

Звёздный ветер является способом переноса вещества на значительные расстояния в космосе. Помимо того, что он сам по себе состоит из вещества, истекающего из звёзд, он может воздействовать на окружающее межзвёздное вещество, передавая ему часть своей кинетической энергии. Так, форма эмиссионной туманности NGC 7635 «Пузырь» образовалась в результате такого воздействия.

В случае истечения вещества от нескольких близко расположенных звёзд, дополнительного воздействием излучения этих звёзд, возможна конденсация межзвёздного вещества с последующим звездообразованием.

При активном звёздном ветре количество выбрасываемого вещества может оказаться достаточным для формирования планетарной туманности.

Ещё один пример воздействия звёздного ветра уже в галактических масштабах — галактика M82 «Сигара»: в ней звёздный ветер большого количества звёзд привёл к образованию хорошо видимых выбросов вещества из галактики

В настоящее время очевидно, что обратная связь от галактик возмущает значительную часть межгалактической среды. Одним из типов обратной связи являются ветры от звездообразующих галактик. Наиболее важным является то, что обратная связь отвечает за обогащение межгалактической среды (МГС) тяжелыми элементами.

Звезды производят металлы внутри галактик, и для их переноса по всей МГС необходимо предусмотреть какой-то тип оттока. Наиболее вероятным механизмом является ветер из звездообразующих галактик. Сверхновые в звездных вспышках могут создавать ветры со скоростями от  $100-1000 \frac{km}{s}$ , которые удаляются на достаточное расстояние от галактик-хозяев. Такие ветры были изучены во многих местных звездных галактиках, а так же в галактиках с разрывом Лаймана при  $z=3$ . [1] Поскольку их скорости превышают пороговую скорость преодоления гравитационного притяжения, ожидается, что часть этих потоков проникнет в МГС. При этом это наиболее вероятно для карликовых галактик, поскольку количество энергии, доступной для ветра, пропорционально массе гало  $M_h$ , а гравитационный потенциал, ограничивающий ветер, увеличивается с ростом  $M^2$

# 1 Цель исследования

Целью данного исследования является изучение возможности образования твердых объектов антивещества в барионно-симметричной Вселенной.

# 2 Описание исследования

В контексте вопроса образования антиметеоритов в шаровом скоплении антизвезд, представляет интерес определить количество антивещества, способного дойти до нас, как оценку вероятности обнаружения шарового скопления антизвезд.

Для этого рассматривалась модель, состоящая из  $n$  галактик, содержащих по сверхновой из антиматерии.Выброс вещества осуществлялся за счет взрыва сверхновой.

Для оценки количества антиматерии в данной работе была исследована возможность выхода антизвездных ветров в межгалактическое пространство, исследован вопрос степени аннигиляции с барионным межгалактическим веществом и последующим движением в МГС

## 3 Исследование дошедшего до нашей галактики антивещества

### 3.1 Модель ветра

В данной модели используем приближение тонкой оболочки, которое хорошо обосновано в космологическом контексте [2]. Распиряющийся 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 [3]:

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

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

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

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

Начальная скорость, с которой происходит расширение:

$$v_w = 310 \left( \frac{f_{esc}}{0.25} \frac{2}{\frac{f_{sw}}{f_*}} \frac{126 M_\odot}{w_{SN}} \right) \frac{km}{s^{-1}}$$

В данной модели  $f_* = 0.1, f_{esc} = 0.25, w_{SN} = 126 M_\odot$ . Таким образом, скорость нашего пузыря равна примерно  $310 \frac{km}{s^{-1}}$

### 3.2 Возможность выхода антивещественного ветра из галактики

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

$$F_G = \frac{GMm}{r} = \frac{mv^2}{2}$$

Тогда имеем:

$$v = \sqrt{\frac{2GM}{r}}$$

,где  $M \sim 10^{42}$ ,  $r \sim 10^{20}$ ,  $G \sim 10^{-11}$ , тогда имеем скорость  $\approx 100 \frac{m}{s}$  Таким образом, получаем, что скорость антизвездного ветра значительно превышает граничную скорость, следовательно антизвездный ветер выйдет в МГС

### 3.3 Аннигиляция и распространение антизвездного ветра в межгалактической среде

Рассмотрим процесс аннигиляции. Барионное межгалактическое вещество имеет плотность не более 1 атома водорода на 1 дм<sup>3</sup> или  $\rho = 0.167 \cdot 10^{-20} \frac{g}{cm^3}$  В таком случае, с учетом модели тонкой оболочки, можно считать, что межгалактическая среда является прозрачной для нашего антизвездного ветра. При этом стоит учитывать факт нагревания окружающего вещества, что увеличит вероятность аннигиляции. Однако, для некоторой части вещества процессом аннигиляции можно пренебречь.

Далее возможно несколько сценариев развития.

1) Некоторая часть антивещества дошла до нашей Галактики. Однако скорость ее распространения значительно превышает скорость, необходимую для преодоления гравитационного притяжения. При этом скорость потока не уменьшается, так как взаимодействие с любым затормаживающим фактором привело бы к аннигиляции. В таком случае поток антиветра либо проходит сквозь нашу Галактику, либо сталкиваясь с любым образованием, аннигилирует. В данном случае не предполагается наличие доменов антивещества внутри Галактики.

2) Предположим наличие гравитационно связанного домена антивещества в нашей Галактике. Тогда необходимо оценить вероятность захвата пролетающего антиядра.

Для возможности захвата необходимо так подобрать параметры этого домена (массу, радиус), чтобы обеспечить данный домен необходимой второй космической скоростью. То есть она должна быть не меньше  $300 \frac{km}{s}$ . Тогда запишем неравенство:

$$\frac{2GM}{r} \geq 300$$

Из этого неравенства получаем условие на минимально необходимую массу и радиус:

$$M_{min} = \frac{r_{min} v^2}{2G} = r_{min} \cdot 9 \cdot 10^{21}$$

За значение минимального радиуса примем радиус молекулы  $\approx 0.1 \cdot 10^{-9} m$  Тогда минимальная масса пропорциональна  $10^{11}$ . Очевидно, что существование столь массивного объекта из антиматерии в пределах нашей Галактики невозможно, как и невозможно иметь такую массу при столь малом объеме.

## Заключение

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.

Таким образом, у нас нет соответствующих условий для создания структурной единицы объекта из антивещества, что опровергает возможность формирования антиметеоритов.

## Список литературы

- [1] Yuichi Harikane и др. *A Comprehensive Study on Galaxies at  $z$  9-16 Found in the Early JWST Data: UV Luminosity Functions and Cosmic Star-Formation History at the Pre-Reionization Epoch*. 2022. DOI: 10.48550/ARXIV.2208.01612. URL: <https://arxiv.org/abs/2208.01612>.
- [2] Steven R. Furlanetto и Abraham Loeb. «Metal Absorption Lines as Probes of the Intergalactic Medium Prior to the Reionization Epoch». В: *The Astrophysical Journal* 588.1 (май 2003), с. 18. DOI: 10.1086/374045. URL: <https://dx.doi.org/10.1086/374045>.
- [3] Natsuko Yamaguchi, Steven R. Furlanetto и A. C. Trapp. *The extent of metal enrichment from galactic winds during the Cosmic Dawn*. 2022. DOI: 10.48550/ARXIV.2209.09345. URL: <https://arxiv.org/abs/2209.09345>.