

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

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ И ТЕХНОЛОГИЙ  
КАФЕДРА №40 «ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ»

УДК 531.3, 539.1.05

**ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА  
К БАКАЛАВРСКОЙ ДИПЛОМНОЙ РАБОТЕ  
СКОПЛЕНИЯ АНТИЗВЕЗД КАК ИСТОЧНИК АНТИГЕЛИЯ  
В ПОТОКЕ ГАЛАКТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ**

Студент	_____ А. О. Кириченко
Научный руководитель, проф., д.ф.-м.н.	_____ М. Ю. Хлопов
Научный консультант, к.ф.-м.н., доцент	_____ А. Г. Майоров

Москва 2020

## ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА

### СКОПЛЕНИЯ АНТИЗВЕЗД КАК ИСТОЧНИК АНТИГЕЛИЯ В ПОТОКЕ ГАЛАКТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

Студент

\_\_\_\_\_ А. О. Кириченко

Научный руководитель,

д.ф.-м.н.

\_\_\_\_\_ М. Ю. Хлопов

Научный консультант,

к.ф.-м.н., доцент

\_\_\_\_\_ А. Г. Майоров

Рецензент,

д.ф.-м.н., проф.

\_\_\_\_\_ Д. Н. Воскресенский

Секретарь ГЭК,

к.ф.-м.н.

\_\_\_\_\_ А. А. Кириллов

Зав. каф. №40,

д.ф.-м.н., проф.

\_\_\_\_\_ М. Д. Скорохватов

# РЕФЕРАТ

Отчет 28 с., 10 рис., 1 табл., 37 источн.

## КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Антивещество, космические лучи, шаровые скопления антизвезд, поиск антигелия, Барионная асимметрия Вселенной

## ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Проверка гипотезы существования шарового скопления антизвезд в гало Галактики посредством оценки потока антиядер гелия в галактических космических лучах

## ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ МЕТОДЫ И ИНСТРУМЕНТАРИЙ

- 1) Методы анализа данных, основанных на симметрии свойств вещества и антивещества
- 2) Программный пакет MATLAB

## ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Получено значение плотности энергии античастиц в космических лучах, так же произведена проверка работы программы моделирования магнитного поля Галактики

# ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>1</b>	<b>Введение</b>	<b>4</b>
1.1	Первичное антивещество . . . . .	4
1.2	Вторичное антивещество . . . . .	5
1.3	Экзотические источники антивещества . . . . .	6
1.3.1	Скрытая масса . . . . .	7
1.3.2	Первичные чёрные дыры . . . . .	7
<b>2</b>	<b>Экспериментальные результаты об открытии античастиц</b>	<b>9</b>
2.1	PAMELA . . . . .	9
2.2	BESS . . . . .	10
2.3	AMS-02 . . . . .	11
<b>3</b>	<b>Шаровые скопления в гало Галактики</b>	<b>14</b>
<b>4</b>	<b>Постановка задачи</b>	<b>16</b>
<b>5</b>	<b>Результаты</b>	<b>18</b>
5.1	Расчет инъекции антизвездного ветра скопления . . . . .	18
5.2	Вспышки сверхновых . . . . .	19
5.2.1	Расчет плотности энергии античастиц в космических лучах . . . . .	20
5.2.2	Модуляция магнитного поля . . . . .	21
<b>6</b>	<b>Заключение</b>	<b>25</b>
	<b>Список литературы</b>	<b>26</b>

# 1. ВВЕДЕНИЕ

В конце 20х годов прошлого века Поль Дирак предсказал существование античастиц – новых частиц, противоположных уже известным по знаку электрического, барионного, лептонного зарядам и другим характеристикам[1].

Антиматерия стали подробно изучать, и, согласно современным представлениям, оно имеет три возможных природы происхождения:

1. Первичное антиматерия, сохранившееся с момента зарождения Вселенной, и сейчас, по предположению, может существовать в виде шаровых скоплений антиматерии.
2. Вторичное антиматерия, как результат столкновения ядерной компоненты космических лучей с межзвездным газом или с остатком оболочки сверхновой.
3. Антиматерия от экзотических источников (испарение первичных черных дыр или распад/аннигиляция гипотетических частиц скрытой массы).

Особый интерес для данной работы представляют объекты, состоящие из первичного антиматерии, так как именно такой объект по предположению в работе [2] сохранился в нашей галактике в виде шарового скопления антиматерии.

## 1.1. ПЕРВИЧНОЕ АНТИМАТЕРИЯ

Барионная асимметрия Вселенной - наблюдаемое преобладание в видимой части Вселенной вещества над антиматерией. Объяснение происхождения барионной асимметрии Вселенной является одной из ключевых проблем современной космологии и физики элементарных частиц.

А.Д.Сахаров(1967)[3] и В.А.Кузьмин(1970)[4] сформулировали необходимые условия для бариосинтеза – механизма генерации барионной асимметрии во Вселенной:

1. Асимметрия между частицами и античастицами как нарушение за-

рядовой C- и комбинированной CP-симметрии.

2.Нарушение закона сохранения барионного заряда на ранних этапах формирования Вселенной.

3.Нарушение на ранних этапах формирования Вселенной локального термодинамического равновесия.

С другой стороны в работах [5-8] показано, что почти все существующие механизмы бариосинтеза допускают существование доменов с избытком антивещества, и это отражает, возможно, сильную неоднородность бариосинтеза. Размер доменов не фиксирован, он зависит от деталей рассматриваемых механизмов и может быть как малым, так и достигающим размера метagalактики.

Макроскопическая область антивещества с избытком антибарионов при той же температуре и плотности эволюционирует так же как и обычное вещество макроскопических размеров. Эксперименты на ускорителях, где синтезируют антивещество, показывают, что свойства частиц и античастиц совпадают, если пренебречь малым эффектом нарушения CP-четности[9].

В окружении вещества в ходе космологической эволюции не может сформироваться астрономический объект меньше, чем шаровое скопление, это показано в работе [10]. При меньших размерах антивещество еще до формирования Галактики проаннигилировало бы с окружающим его барионным веществом.

Таким образом, например, шаровые скопления антизвезд могли бы образоваться в период формирования Галактики и сохраниться в ее гало к настоящему времени. Эффектом присутствия шарового скопления антизвезд или установление предела на их количество может быть регистрация ядер антигелия[11-12], в экспериментах PAMELA, AMS-02 и BESS.

## 1.2. ВТОРИЧНОЕ АНТИВЕЩЕСТВО

В настоящий момент известно, что антивещество в Галактике образуется в результате столкновения высокоэнергичной ядерной компоненты космических лучей с межзвездным газом. Изучение процессов рождения антипротонов на ускорителях дало возможность определить сечение этих

процессов, а на основе полученных данных были предсказаны сечения для более тяжелых ядер.

На рисунке представлены предсказанные верхние пределы на потоки  $\overline{He}^3$  и  $\overline{He}^4$ ,  $\bar{d}$  и  $\bar{p}$  вторичного происхождения [13].

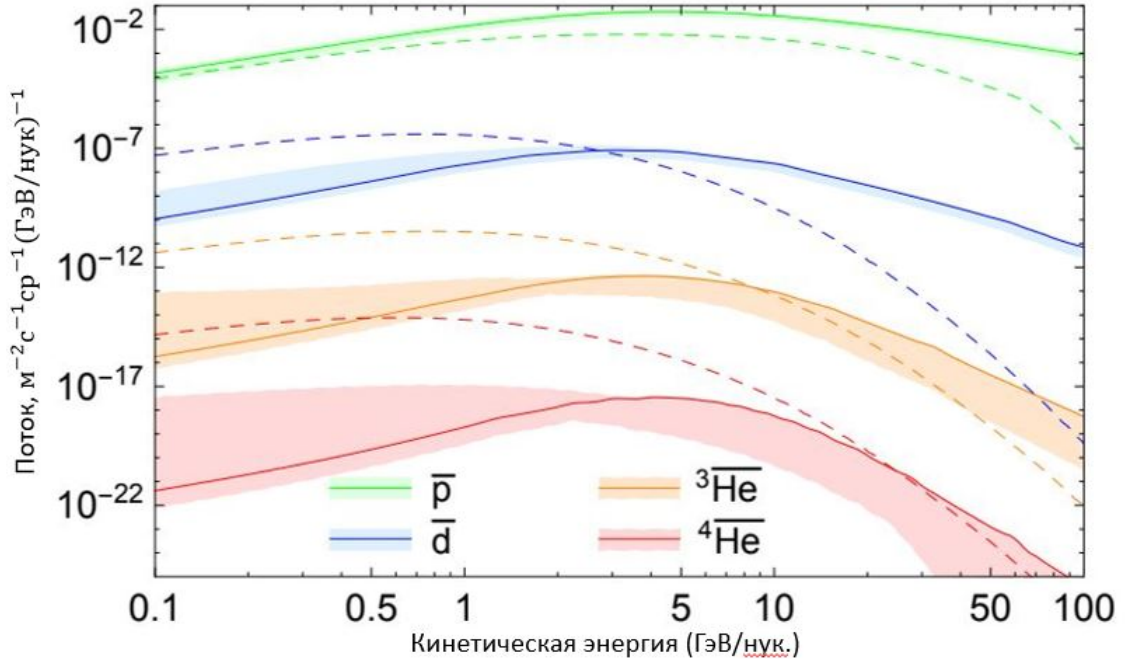


Рис.1 Верхние пределы для  $\overline{He}^3$  и  $\overline{He}^4$ ,  $\bar{d}$  и  $\bar{p}$  вторичного происхождения совместно с предыдущими результатами

Сценарий рождения позитронов в результате столкновения космических лучей с оболочкой сверхновых показан в работе [14]. Избыток позитронов может быть следствием ускорения космических лучей в плотных остатках взрывов сверхновых, но также в статье [15] показано, что вклад таких событий мал, но при энергиях выше 100 ГэВ они могут быть зарегистрированы.

### 1.3. ЭКЗОТИЧЕСКИЕ ИСТОЧНИКИ АНТИВЕЩЕСТВА

К экзотическим источникам антивещества современная космология относит аннигиляцию или распад гипотетических частиц скрытой массы и испарение первичных черных дыр.

### 1.3.1. СКРЫТАЯ МАССА

Скрытая масса составляет  $\sim 85\%$  всего вещества во Вселенной. Ее присутствие подразумевается во многих астрофизических наблюдениях, включая гравитационные эффекты, которые не могут быть объяснены воздействием барионного вещества. Поскольку скрытая масса еще не наблюдалась непосредственно, если она существует, то она должна взаимодействовать через гравитацию с обычной барионной материей и излучением. Считается, что большая часть скрытой массы не барионна по своей природе, она может состоять из некоторых пока еще не обнаруженных элементарных частиц [16].

В областях с высокой плотностью темного вещества две частицы скрытой массы могут аннигилировать с образованием гамма-лучей или пар частица-античастица стандартной модели. Такие процессы могут быть обнаружены косвенно через избыток гамма-лучей, антипротонов или позитронов, исходящих из областей высокой плотности в Галактике. Но даже тогда нельзя точно сказать, что источник таких потоков частиц или гамма-излучения будет именно скрытая масса. Поэтому для окончательного ответа понадобятся другие сигналы. Частицы темного вещества, проходя через Солнце или Землю, теряют энергию и темное вещество может накапливаться в центре этих тел, увеличивая вероятность аннигиляции. Это может дать сигнал в виде высокоэнергетичных нейтрино. Такой процесс был бы косвенным доказательством существования скрытой массы [17].

### 1.3.2. ПЕРВИЧНЫЕ ЧЁРНЫЕ ДЫРЫ

Изначальные черные дыры - это гипотетический тип черной дыры, образовавшейся вскоре после Большого взрыва. В ранней Вселенной высокие плотности и неоднородные условия могли бы привести к гравитационному коллапсу в достаточно плотных областях, образовав черные дыры. Яков Борисович Зельдович и Игорь Дмитриевич Новиков в 1966 году впервые предположили существование таких черных дыр [18]. Теория их происхождения была впервые глубоко изучена Стивеном Хокингом в 1971 году [19].



Хокинг показал, что черные дыры ввиду квантовых эффектов излучают как абсолютно черное тело с температурой, обратно пропорциональной массе черной дыры. Физическое понимание процесса можно получить, представив, что излучение частица – античастица испускается из-за горизонта событий. Черную дыру образует вещество, которое первоначально не находилось в ней, поэтому после коллапса гравитационное поле этого вещества остается вне черной дыры и определяет его массу. В сильно неоднородном поле вблизи горизонта черной дыры происходит рождение пар частица-античастица так что одна из частиц пары покидает область черной дыры, а другая поглощается в ней. Энергия гравитационного поля уменьшается при испускании рожденных частиц и соответственно уменьшается гравитационный эффект сколлапсировавшего вещества - происходит как бы испарение его массы [20].

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБ ОТКРЫТИИ АНТИЧАСТИЦ

Важным этапом проверки теории является сопоставление расчетов с экспериментальными данными. В этом разделе рассматриваются эксперименты BESS, PAMELA и AMS-02, в которых проводится поиск антивещества от потоков галактических космических лучей.

### 2.1. PAMELA

PAMELA - спутниковый эксперимент, предназначенный для исследования с большой точностью космических лучей в широком энергетическом диапазоне: 80 МэВ-700 ГэВ.

Основная цель - поиск антивещества с точностью порядка  $10^{-8}$ . Эксперимент был запущен 15 июня 2006г. Прибор построен на спектрометре с постоянными магнитами и кремниевым микрополосковым трекером.

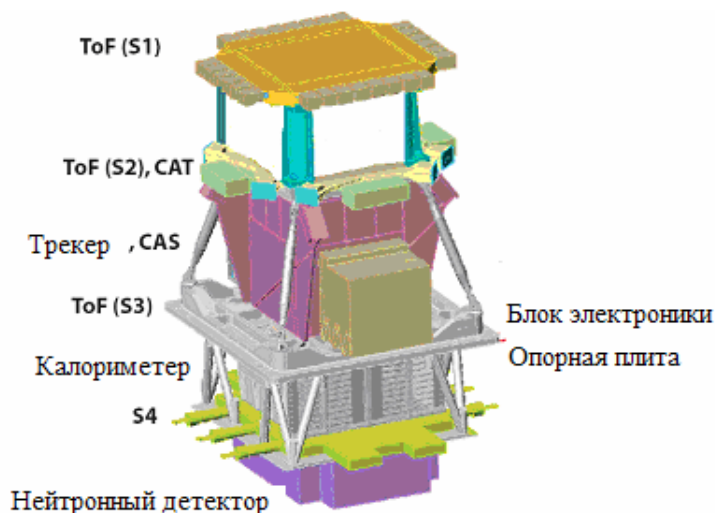


Рис.2 Общая схема установки BESS-98

Времяпролетная система состоит из трех групп сцинтилляторов (S1, S2,

S3). Каждая группа составлена из двух слоев сцинтилляторов. Каждый слой состоит из нескольких сцинтилляционных пластин. Система определяет заряд и скорость частицы по величине потери энергии  $dE/dx$ .

Магнитный спектрометр(трекер) состоит из 5 модулей постоянного магнита, между которыми расположены 6 плоскостей кремниевого двухстороннего микрострипового детектора. Магнитный спектрометр определяет знак заряда и жесткость частицы. Величина максимально измеряемой жесткости: 270 ГэВ/с.

Электромагнитный калориметр состоит из 22 вольфрамовых пластин, расположенных между кремниевыми стриповыми плоскостями. Калориметр измеряет энергию, выделившуюся при взаимодействии электрона и позитрона в свинце и восстанавливает пространственную картину ливня. Картина разделяет электромагнитные и адронные каскады, а также не взаимодействующие частицы.

Система антисовпадений состоит из пластических сцинтилляторов (CAS и CAT) и идентифицирует частицы, не попадающие в спектрометр. Нейтронный детектор улучшает разделение электронов и протонов в калориметре [21-22].

В результате эксперимента PAMELA был получен верхний предел на отношение  $\frac{\overline{He}}{He} = 4.7 * 10^{-7}$  для диапазона жесткости 0.6 - 600 ГВ [23]. В области высоких энергий предел, полученный в эксперименте PAMELA является наиболее низким в сравнении с предыдущими экспериментами.

Область высоких энергий является важной областью для поиска антигелия, т.к. поток антиядер низких энергий ослабляется при движении по Галактике из-за небольшой длины пробега и высокой степени аннигиляции.

## 2.2. BESS

BESS(эксперимент на воздушном шаре со сверхпроводящим спектрометром) - это совместный проект ученых Японии и США по поиску антиматерии в космическом излучении. Эксперименты проводились с 1993 по 2008 годы.

Детекторная система BESS состоит из многослойных дрейфовых ка-

мер (СМДК), которые размещены внутри сверхпроводящего магнита. Магнит обеспечивает однородное магнитное поле величиной 1Тл. СМДК восстанавливает траекторию проходящей через нее частицы. Черенковский детектор с аэрогельным радиатором регистрирует высокоэнергичные частицы. Детекторы времяпролетной системы(ВПС) использовались для определения скорости прошедшей частицы[24].

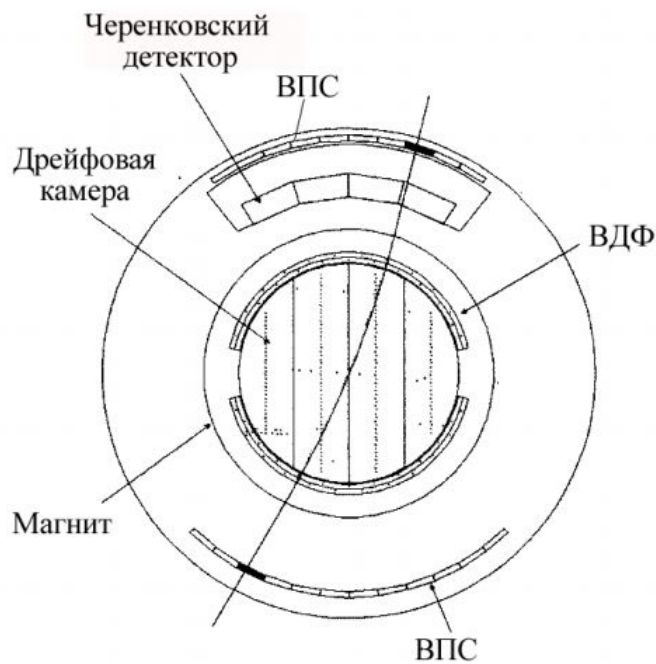


Рис.3 Общая схема установки BESS-98

С 1993 года составляющие эксперимента и его технические характеристики менялись: добавляли новые детекторы или улучшались существующие. Но модель, описанная выше, является базовой для всех экспериментов.

В предположении, что антигелий имеет ту же спектральную форму, что и гелий, установлен результирующий верхний предел отношения антигелия к гелию:  $\frac{\overline{He}}{He} = 6.9 \cdot 10^{-8}$  путем объединения всех данных BESS. Это самый строгий верхний предел, полученный на состояние 2012 года. Этот верхний предел остается актуальным[25].

## 2.3. AMS-02

AMS является первым большим спектрометром проводящим эксперименты на околоземной орбите. Эксперимент начался в 2011 году и продолжается в настоящее время. На AMS-02 регистрируется как вещество так

и антивещество в широком диапазоне масс и энергий. Для регистрации частиц высоких энергий в AMS-02 используют сверхбыстрые микросхемы устойчивые к радиации.

Детекторный модуль состоит из слоев детекторов, которые используются для определения различных характеристик излучения. Характеристики определяются только для тех частиц, которые летят сверху вниз. Детектор переходного излучения измеряет скорости частиц высоких энергий. Счетчики верхнего и нижнего времени пролетов измеряют скорости частиц низких энергий.



Рис.5 Покомпонентный вид AMS-02

Кремниевый трекер измеряет положение заряженных частиц в магнитном поле. Постоянный магнит изменяет путь заряженных частиц, чтобы их можно было идентифицировать.

Счетчик анτισовпадений отбирает частицы, которые пролетают под небольшими углами, таким образом исключается 80% всех частиц. Счет-

чик антисовпадений полезен для поиска антигелия. Черенковский детектор определяет массу и скорость ультрарелятивистских частиц. Электромагнитный калориметр измеряет полную энергию частиц [26].

В предположении, что падающий спектр  $\overline{He}$  имеет ту же форму, что и спектр He в диапазоне жесткости от 1 до 140 ГВ в AMS-01 установлен верхний предел на отношение  $\frac{\overline{He}}{He} = 1.1 * 10^{-6}$ . В действующем в настоящее время эксперименте AMS-02 предполагается чувствительность  $\sim 10^{-9}$  [27].

### 3. ШАРОВЫЕ СКОПЛЕНИЯ В ГАЛО ГАЛАКТИКИ

Шаровое звёздное скопление – совокупность звезд, которая образует кластер сферической формы вращающийся вокруг ядра Галактики. Шаровые скопления очень тесно связаны под действием гравитации, что придает им сферическую форму и относительно высокую плотность звезд по направлению к их центрам. Название этой категории звездных скоплений происходит от латинского *globulus* - небольшой сферы. Шаровые скопления находятся в гало галактики и содержат значительно больше звезд и намного старше, чем менее плотные открытые скопления, которые находятся в диске галактики. Шаровые скопления довольно распространены, во Млечном Пути в настоящее время известно около 150 шаровых скоплений.

Наблюдения за шаровыми скоплениями показывают, что эти звездные образования возникают главным образом в областях эффективного звездообразования, где межзвездная среда имеет более высокую плотность, по сравнению с нормальными звездообразующими областями. В настоящее время ни одно из известных шаровых скоплений не показывает активного звездообразования, они свободны от газа и пыли, и предполагается, что весь газ и пыль давно были либо превращены в звезды, либо выдулись из скопления во время первоначального взрыва звездообразования. Это согласуется с мнением о том, что шаровые скопления являются самыми старыми объектами в Галактике и были одними из первых скоплений звезд, которые сформировались[28].

Траектории движения шаровых скоплений эксцентричны и сильно наклонены к плоскости галактики. Находясь на орбите «окраины» галактики, шаровым скоплениям требуется несколько сотен миллионов лет, чтобы пройти одну орбиту. В центре шарового скопления звезды могут достигать плотности от 100 до 1000 звезд на кубический парсек. Это отлично от плотности звезд около нашего Солнца, которая оценивается примерно в

0,14 звезды на кубический парсек.

Шаровые скопления обычно состоят из звезд, которые имеют низкую долю элементов, отличных от водорода и гелия, по сравнению с такими звездами, как Солнце. Называют эти более тяжелые элементы металлами, а пропорции этих элементов - металличностью. Эти элементы производятся в результате звездного нуклеосинтеза, а затем возвращаются в межзвездную среду, где они попадают в звезды следующего поколения. Следовательно, доля металлов может указывать на возраст звезды, причем более старые звезды обычно имеют более низкую металличность[29-30].



## 4. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В работе рассматривается типичное шаровое скопление, предположительно состоящее из антизвезд. В качестве примера берется одно из наиболее близких скоплений – М4 по каталогу Мессье (NGC 6121 по новому общему каталогу(NGC)). Возраст данного скопления около 12 млрд. лет, расстояние от Солнца 1.72 кпк, число звезд  $\sim 8 * 10^4$  [31].

Тогда так же предположим, что шаровое скопление М4 – источник  $\overline{He}^4$  в галактических космических лучах.

Три возможных механизма инъекции антигелия в космические лучи от шарового скопления М4:

### 1. Стационарное истечение вещества с поверхности антизвезд( $\sim$ МэВ)

Если область распространения антивещества шарового скопления будет пересекать галактический диск, тогда звездный ветер попадет в диск, а затем и в Солнечную систему. Для этого рассматривается стационарное истечение вещества звезды в скоплении. Звезды постоянно теряют часть своей массы, поэтому концентрация частиц от всего шарового скопления может быть достаточно высокой. Но это очень низкие энергии, необходим процесс доускорения частиц для эффективного преодоления солнечного магнитного поля.

### 2. Вспышки на антизвездах( $\sim$ ГэВ)

В результате вспышек на антизвездах в шаровом скоплении частицы могут приобретать большую энергию, образуя антиядерную компоненту галактических космических лучей.

### 3. Взрывы антисверхновых в шаровом скоплении антизвезд( $\sim 10^{15}$ эВ)

Взрывы сверхновых – это результат эволюции звезд, который сопровождается выбросом огромной энергии( $\sim 10^{51}$  эрг). Вещество от взорвавшейся антизвезды распространяется с высокой скоростью. Сверхновые могут

являться наиболее вероятным источником антиядер в галактических космических лучах.

Изучение процессов образования домена антивещества, его эволюции и инъекции частиц в космические лучи в данной работе основывается на симметрии свойств вещества и антивещества.

## 5. РЕЗУЛЬТАТЫ

### 5.1. РАСЧЕТ ИНЖЕКЦИИ АНТИЗВЕДНОГО ВЕТРА СКОПЛЕНИЯ

На первом этапе был рассмотрен механизм стационарного истечения вещества из скопления. По данным [32,33] построены гистограммы масс по выборке температур из  $\sim 100$  звезд для понимания того, какие звезды населяют шаровое скопление М4.

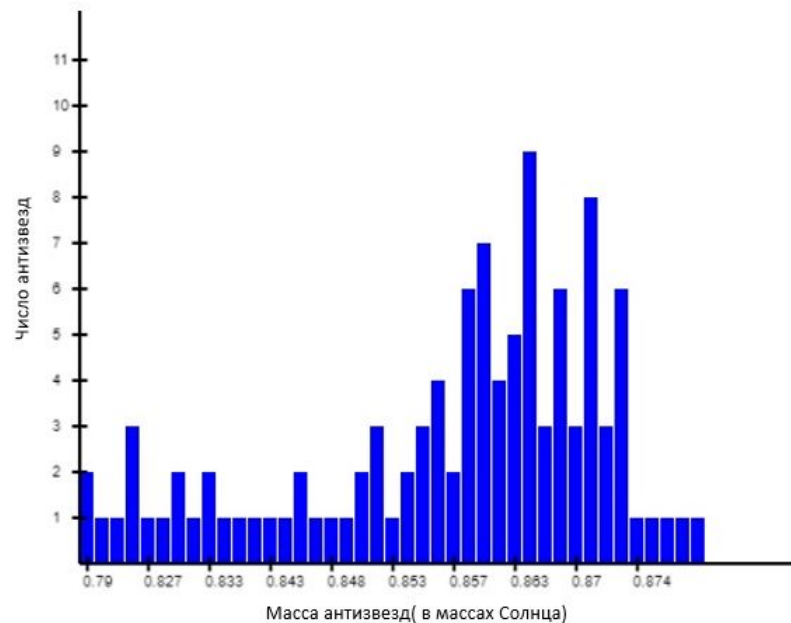


Рис.6 Распределение по массам из 100 звезд в звездном скоплении М4

Исходя из распределения масс и значения температур, можно сделать вывод, что наша выборка — это группа оранжевых карликов с массами от 0.78 до 0.9 масс Солнца. Оранжевые карлики долгоживущие звезды и являются источниками звездного ветра в данном скоплении.

Для того, чтобы понять, покидает ли вещество звездного ветра шаровое скопление, была рассчитана скорость звездного ветра и полученное

значение сравнивалось со второй космической скоростью:

$$v_2 = \sqrt{\frac{2GM}{R}} = 15 \text{ км/с} \quad (5.1)$$

где  $R=3.4$  св. лет [31],  $M$  – радиус и масса скопления соответственно.

Для нахождения величины звездного ветра необходимо определить температуру ветра. Сделаем это по формуле из [34]:

$$T_{wind} = \frac{2G\mu m_p}{\gamma k_b} \left( \frac{C_s}{V_{esc}} \right)^2 \left( \frac{M}{R} \right) = 3.5 * 10^5 K \quad (5.2)$$

и радиус звезды по формуле[35]:

$$R = \frac{\sqrt{\frac{L}{L_{sun}}}}{\left( \frac{T}{T_{sun}} \right)^2} \quad (5.3)$$

$$R = 1.28 * R_{sun}$$

Находим по графику из [34] для 1 а.е. Изменение скорости ветра с расстоянием происходит слабо, поэтому для оценки выбираем

$$v_{wind} = 700 \text{ км/с} \quad (5.4)$$

Вещество звездного ветра активно покидает скопление, начиная с самых малых энергий, т.о. все три механизма инъекции теоретически возможны.

## 5.2. ВСПЫШКИ СВЕРХНОВЫХ

Анализ начинается с наиболее вероятного механизма – взрывов антисверхновых, потому как магнитные поля Галактики препятствуют проникновению античастиц низких энергий в Галактический диск.

Но так же немаловажно отметить, что частота взрыва таких сверхновых мала на фоне вспышек антизвезд и на фоне постоянного истечения стационарного вещества антизвезд. Первые два случая будут рассмотрены позже.

### 5.2.1. РАСЧЕТ ПЛОТНОСТИ ЭНЕРГИИ АНТИЧАСТИЦ В КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧАХ

На рисунке 7 представлен график эволюции населения скопления М4[36]. График дает понять какие процессы происходили на ранних этапах жизни скопления и сравнить результаты этих процессов с настоящим временем. Обратим внимание на число нейтронных звезд на графике. Их число не изменилось за 12 млрд. лет. Это значит, что примерно 12 млрд. лет назад они могли образоваться как результат взрыва антисверхновых. Этот факт можно использовать для расчета плотности энергии античастиц в космических лучах.

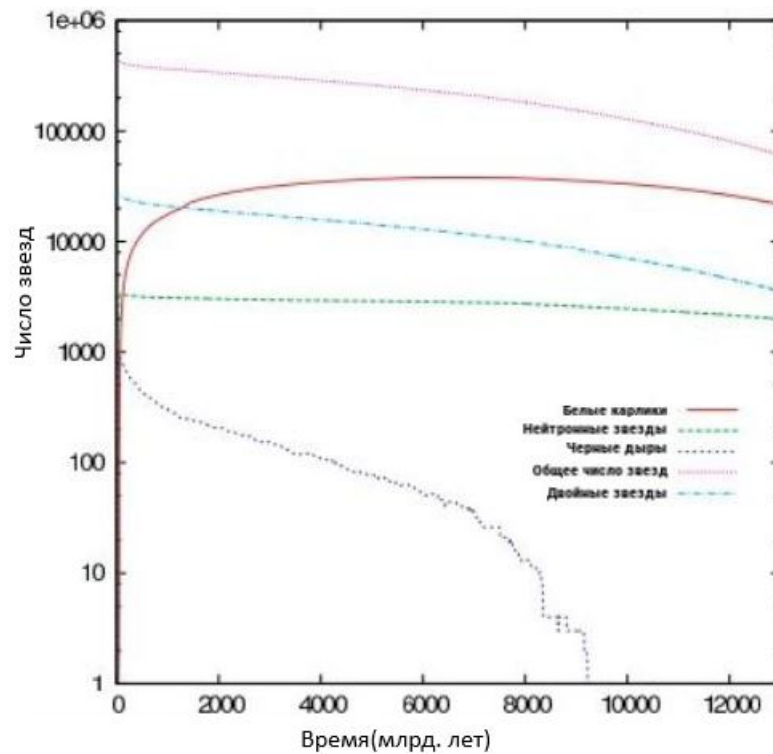


Рис.7 Изменение населения М4 во времени

Используя формулу для плотности энергии космических лучей обычного вещества

$$\rho_{CR} = \frac{E_{sn} \dot{N}_{sn} t_{ret}}{V} \quad (5.5)$$

где  $N_{sn}$  – число нейтронных звезд в М4,  $t$  – возраст скопления,  $\dot{N}_{sn}$  – средняя частота взрыва сверхновых,  $E_{sn}$  – энергия от одной сверхновой,  $t_{ret}$  – время удержания космических лучей,  $V$  – объем области распространения космических лучей (для расчета объема взята модель цилиндра с высотой

и радиусом 30кпк и 10 кпк соответственно, чтобы рассмотреть не только область диска, но и гало Галактики).

Представим все численные значения этих величин в виде таблицы:

$N_{sn}$	t	$\dot{N}_{sn}$	$E_{sn}$	$t_{ret}$	V
$2 \cdot 10^4$	$13 \cdot 10^9$ лет	$2 \cdot 10^{-5}$	$10^{51}$ эрг	$10^7$ лет	$3 \cdot 10^3$ кпк

Рис.8 Таблица численных характеристик величин для расчета плотности энергии античастиц

Рассчитаем плотность используя формулу (1) и значения таблицы:

$$\rho_{\overline{CR}} = 10^{-4} \text{эВ/см}^3 \quad (5.6)$$

Для сравнения приведем значение плотности энергии космических лучей обычного вещества:

$$\rho = 1 \text{эВ/см}^3 \quad (5.7)$$

Так же обратим внимание на тот факт, что плотность энергии для вторичных антипротонов

$$\rho_{\overline{p}} = 10^{-5} \text{эВ/см}^3 \quad (5.8)$$

Это может быть свидетельством наличия доменов антивещества в Галактике.

### 5.2.2. МОДУЛЯЦИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Магнитное поле оказывает определяющее влияние на поведение частиц (всеми остальными взаимодействиями, такими как гравитационное, кулоновское и ядерные рассеяния можно пренебречь). Чтобы оценить реальную долю частиц от первоначального потока, проникающую в диск Галактики, нужно произвести моделирование движения частиц в магнитном поле Галактики.

Задача подразделяется на две подзадачи:

1. Проверка корректности работы программы.
2. Запуск частиц и решение уравнения движения.

## 1. Проверка корректности работы программы

На основе уравнений по данным работы [37] составлена программа функции, входными параметрами которой являются координаты в Галактике, а выходными-компоненты магнитного поля в декартовой системе координат. В рамках первой итерации используется упрощенное представление магнитного поля Галактики, основанное так же на выводах работы [37].

Компоненты магнитного поля в цилиндрической системе координат с началом отсчета в Галактическом центре:

$$B_\phi = -\frac{B_1}{2R/R_0} \frac{z}{(z+z_0)} \left( \sqrt{(R/R_0)^2 + (z/z_0)^2} - z/z_0 \right)$$

$$B_R = \frac{1}{2} B_1 \frac{z_0^2}{(z+z_0)^2} \tanh(R/R_0)$$

$$B_z = \frac{0.1 B_1 z_0}{R_0} + \frac{1}{2} B_1 \frac{z_0^2}{(z+z_0)^2} \left( \frac{\tanh(R/R_0)}{R} + \frac{\text{sech}^2(R/R_0)}{R_0} \right)$$

Где принимается  $R_0=5$  кпк и  $z_0=0.5$ пк в качестве масштабных длин, а параметр  $B_1$  является свободным в данной статье и определяется калибровкой, например, магнитным полем вблизи Солнечной системы по данным работы [38].

Построена топология Магнитного поля для  $z=0$  ( $x$  и  $y$  – координаты в декартовой системе координат, система координат с началом в Галактическом центре.):

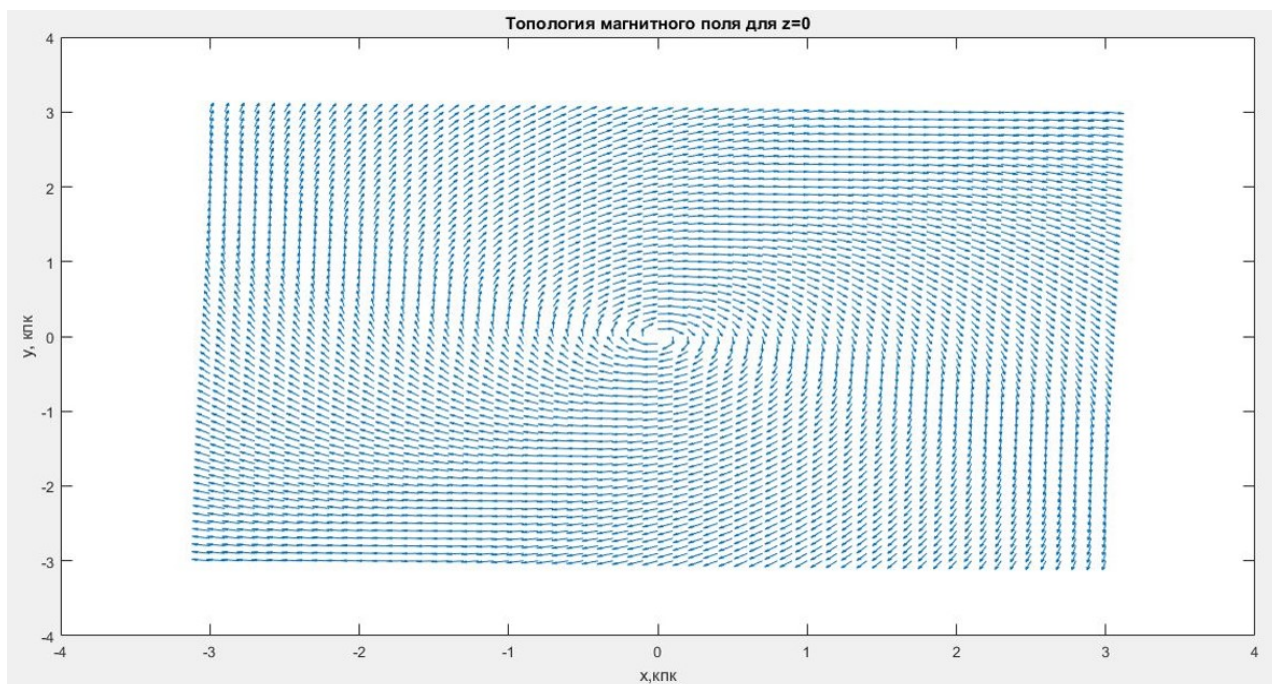


Рис.9 Топология магнитного поля в проекции  $Z=0$

Построена топология Магнитного поля в проекции RZ(R и z- координаты в цилиндрической системе координат, система координат с началом в Галактическом центре.):

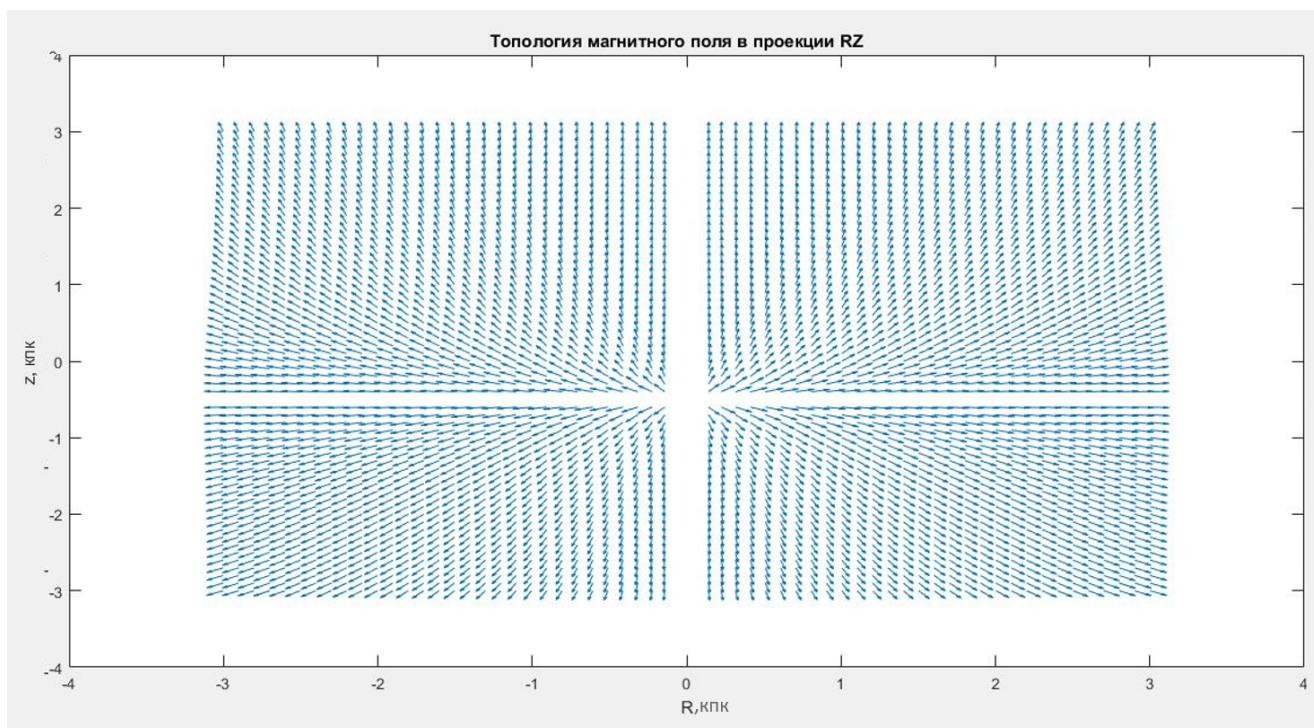


Рис.10 Топология магнитного поля в проекции RZ

На основе полученных топологий можно сказать, что составленная про-



грамма работает верно, т.к. изображения магнитных полей совпадают с данными[36], т.о. программу можно использовать для моделирования крупномасштабного регулярного магнитного поля Галактики.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе в рамках шарового скопления антизвезд в Галактике была изучена возможная роль процессов образования доменов антивещества на основе модели, заключающейся в том, что шаровое скопление антизвезд эволюционирует похожим образом как обычное шаровое звездное скопление, исходя из симметрии свойств вещества и антивещества.

Основная идея возможности обнаружения антизвезд в Галактике состоит в детектировании антиядер гелия в составе космических лучей от предполагаемого шарового скопления антизвезд. В работе производится теоретическая оценка данного потока. В связи с тем, анализ разделяется на несколько этапов: построение функции источника, основываясь на трех способах инъекции вещества скопления и на построение модели движения частиц в условиях гало и диска Галактики.

В работе из трех способов инъекции был рассмотрен один: В высокоскоростном случае была рассчитана плотность энергии античастиц в космических лучах от данного скопления. Так же была произведена проверка работы программы для моделирования магнитных полей Галактики.

Дальнейшая работа будет направлена на моделирование магнитного поля всей Галактики для того, чтобы посмотреть какая доля частиц будет достигать Галактического диска, и в конечном счете получить предсказание для ожидаемого потока антиядер.

# СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] P.A.M. Dirac, Proc. Royal Soc. London, A117,1928
- [2] An antimatter globular cluster in our Galaxy - a probe for the origin of the matter. Gravitation and Cosmology (1998), V. 4, PP. 69-72.
- [3] Сахаров А.Д. Нарушение СР-инвариантности, С-асимметрия и барионная асимметрия Вселенной. // Письма в ЖЭТФ, Т. 5, 1967. - С. 32.
- [4] Кузьмин В.А.// Ibidem, Т. 13, 1970
- [5] V.M.Chechetkin, M.G.Sapozhnikov, M.Yu.Khlopov and Ya.B.Zeldovich Astrophysical aspects of antiproton interaction with He (Antimatter in the Universe). Phys. Lett. (1982), V. 118B, PP. 359-362.
- [6] V.M.Chechetkin, M.Yu.Khlopov and M.G.Sapozhnikov Antiproton interactions with light elements as a test of GUT cosmologies. Rivista Nuovo Cimento (1982) , V. 5, N-10, PP. 1-80.
- [7] Долгов А.Д., Илларионов А.Ф., Кардашев Н.С., Новиков И.Д. // ЖЭТФ, Т. 1, 1987
- [8] Khlopov M.Yu., Rubin S.G., Sakharov A.S. Possible Origin of Antimatter Regions in the Baryon Dominated Universe.Phys.Rev. D62 (2000) 083505
- [9] Fundamental Physics in Antihydrogen Experiments M. Charlton, S. Eriksson, G. M. Shore, 2020
- [10] Khlopov M.Yu., Konoplich R.V., Mignani R., et al. Evolution and observational signature of diffused antiworld. // Astroparticle Phys. V. 12, Is. 4, 2000
- [11] Belotsky K.M., Golubkov Yu.A., Khlopov M.Yu. et al. Antihelium flux signature for antimatter globular cluster in Galaxy. // arXiv:astro-ph/9807027v1.2, 1998.

- [12] А2никанова Е.В., Белоцкий К.М., Гальпер А.М., Майоров А.Г. и др. Шаровое скопление антизвезд как источник антигелия в Галактике. // Труды 8-ой Курчатовской молодежной школы, 2010
- [13] Ilias Cholis, Tim Linden Anti-Deuterons and Anti-Helium Nuclei from Annihilating Dark Matter, 2020
- [14] P. Blasi The origin of the positron excess in cosmic rays arXiv:0903.2794, 2009
- [15] Pasquale Blasi and Pasquale D. Serpico High-energy antiprotons from old supernova remnants, 2009
- [16] Trimble V. Existence and nature of dark matter in the universe, 1987
- [17] Gianfranco Bertone, Dan Hooper Particle Dark Matter: Evidence, Candidates and Constraints, 2004
- [18] Zeldovitch, Novikov The Hypothesis of Cores Retarded During Expansion and the Hot Cosmological Model, 1966
- [19] Hawking S. Gravitationally collapsed objects of very low mass, 1971
- [20] Carroll, Bradley; Ostlie, Dale An Introduction to Modern Astrophysics. Addison Wesley, 1996
- [21] Casolino, M. et al. Launch of the Space experiment PAMELA". Advances in Space Research, 2008
- [22] <https://space.mephi.ru/project/pamela.htm>
- [23] Майоров А. Потоки изотопов легких антиядер в первичных космических лучах, 2011
- [24] BESS Collaboration BESS and its future prospect for polar long duration flights, 2002
- [25] K. Abe, H. Fuke Search for Antihelium with the BESS-Polar Spectrometer, 2012
- [26] <http://ams.cern.ch/>

- [27] AMS Collaboration J. Alcaraz x, D. Alvisi Search for antihelium in cosmic rays, 1999
- [28] Kenneth Janes (November 2000). Star Clusters. Encyclopedia of Astronomy and Astrophysics, 2014.
- [29] Talpur, Jon (1997). A Guide to Globular Clusters. Keele University, 2007
- [30] Kalirai(2010). Star clusters as laboratories for stellar and dynamical evolution, Philosophical Transactions of the Royal Society A, 1913
- [31] Douglas C. Heggie and Mirek Giersz Modelling individual globular clusters, 2010
- [32] A. Marino, S. Villanova Spectroscopic and Photometric evidence of two stellar populations in the Galactic Globular Cluster NGC 6121 (M4), 2018
- [33] Мурзин В.С. Астрофизика космических лучей
- [34] C. P. Johnstone, M. Gudel Stellar winds on the main-sequence, 2015
- [35] Агекян Т.А. Звёзды, Галактика, Метагалактика
- [36] Douglas C. Heggie, Mirek Giersz Monte Carlo simulations of star clusters – V. The globular cluster M4, 2008
- [37] C. J. Nixon, T. O. Hands The origin of the structure of large-scale magnetic fields in disc galaxies, 2018
- [38] M.Opher, F.Alouani Bibi A strong, highly-tilted interstellar magnetic field near the Solar System, 2009