

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»

На правах рукописи

КИРИЧЕНКО АНАСТАСИЯ ОЛЕГОВНА

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ АНТИЧАСТИЦ ОТ
ПРОТОТИПА ГИПОТЕТИЧЕСКОГО ШАРОВОГО СКОПЛЕНИЯ
АНТИЗВЕЗД В МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ ГАЛАКТИКИ**

Направление подготовки 14.04.02 «Ядерная физика и технологии»
Диссертация на соискание степени магистра

Научный руководитель,
д.ф.-м.н., проф.

_____ М. Ю. Хлопов

Научный консультант,
к.ф.-м.н., доцент

_____ А. Г. Майоров

Москва 2022

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА МАГИСТРА

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ АНТИЧАСТИЦ ОТ
ПРОТОТИПА ГИПОТЕТИЧЕСКОГО ШАРОВОГО СКОПЛЕНИЯ
АНТИЗВЕЗД В МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ ГАЛАКТИКИ**

Студент _____ А. О. Кириченко

Научный руководитель,
д.ф.-м.н., проф. _____ М. Ю. Хлопов

Научный консультант,
к.ф.-м.н., доц. _____ А. Г. Майоров

Рецензент,
д.ф.-м.н., проф. _____ А. В. Кузнецов

Секретарь ГЭК,
к.ф.-м.н. _____ А. А. Кириллов

Зав. каф. №40,
д.ф.-м.н., проф. _____ М. Д. Скорохватов

Рук. учеб. прог.,
д.ф.-м.н., проф. _____ М. Д. Скорохватов

РЕФЕРАТ

Отчет 30 с., 9 рис., 2 табл., 50 источн.

Ключевые слова

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

Цель работы

Расчет потока античастиц в потоке галактических космических лучей от гипотетического шарового скопления в гало Галактики.

Полученные результаты

Получено значение энергии магнитного обрезания при проникновении частицы в диск от источника в гало.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1.1 Первичное антивещество в современной Вселенной	4
1.2 Формирование доменов антивещества	5
1.3 Шаровые скопления в гало Галактики	6
2 Магнитное поле Галактики	8
3 Движение антигелия в магнитных полях Галактики	13
3.1 Моделирование от различных шаровых скоплений Галактики . .	14
3.2 Расчет плотности энергии античастиц от шарового скопления М4	16
3.3 Оценка энергии магнитного обрезания антигелия от шарового скопления М4	20
Заключение	24
Благодарности	25
Список литературы	26

ВВЕДЕНИЕ

1.1 ПЕРВИЧНОЕ АНТИВЕЩЕСТВО В СОВРЕМЕННОЙ ВСЕЛЕННОЙ

В конце 20х годов прошлого века П. Дирак предсказал существование античастиц – новых частиц, противоположных уже известным по знаку электрического, барионного, лептонного зарядов [1].

Антивещество стали подробно изучать [2], и, согласно современным представлениям, оно может быть следующего происхождения:

- 1) Первичное антивещество, сохранившееся с момента зарождения Вселенной [3, 4], и сейчас, например, могло бы существовать в виде шаровых скоплений антизвезд [5].
- 2) Вторичное антивещество, как результат столкновения ядерной компоненты космических лучей с межзвездным газом или с остатком оболочки сверхновой [6].
- 3) Антивещество от экзотических источников (испарение первичных черных дыр или распад/аннигиляция гипотетических частиц скрытой массы) [7].

Предсказание [5] основано на предположении о симметрии свойств шаровых скоплений вещества и антивещества [4]. В данной работе рассматривается возможность существования шарового скопления антивещества, как продукта антизвездной эволюции. В процессе ядерного горения антиводорода в таких звездах, по принципу образования гелия в обычных звездах, должен формироваться антигелий и тогда антизвезды будут являться источником первичного антигелия. Первичный антигелий - второй элемент по распространенности после антипротона. Шаровое скопление может являться источником более тяжелых антиядер. В процессе их распространения в межзвездной среде происходит фраг-

ментация таких ядер с образованием более легкой компоненты, включая антигелий. Подход в данной работе направлен на то, чтобы рассчитать предсказания этой гипотезы с учетом описания образования и распространения антигелия в магнитных полях Галактики.

Целью данной работы является расчет потока античастиц в потоке галактических космических лучей от гипотетического шарового скопления в гало Галактики. Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

- 1) Рассчитать функцию источника.
- 2) Рассмотреть распространение в галактическом магнитном поле и определить влияние эффекта магнитного обрезания.
- 3) Рассчитать долю неупругих реакций и убывших частиц, а также рождённых вторичных античастиц.

Актуальность

В настоящее время на орбите Земли запущен эксперимент AMS-02, одна из задач которого - поиск антивещества в составе космических лучей, в частности антигелия. Обнаружение даже нескольких событий антигелия было бы свидетельством его первичного происхождения. Один из вариантов - его образование в шаровом антизвездном скоплении Галактики.

Новизна

Впервые было получено значение энергии магнитного обрезания при проникновении частицы в диск от источника в гало.

Теоретическая и практическая значимость

Полученные данные в дальнейшем могут быть использованы в теоретических и практических исследованиях природы барионной асимметрии Вселенной.

1.2 ФОРМИРОВАНИЕ ДОМЕНОВ АНТИВЕЩЕСТВА

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

А.Д.Сахаров(1967) [8] и В.А.Кузьмин(1970) [9] сформулировали необхо-

димые условия для бариосинтеза с возможностью наблюдаемой генерации механизма генерации барионной асимметрии во Вселенной:

- 1) Асимметрия между частицами и античастицами как нарушение зарядовой C- и комбинированной CP-симметрии.
- 2) Нарушение закона сохранения барионного заряда.
- 3) Нарушение локального термодинамического равновесия.

В работах [10–13] показано, что почти все существующие механизмы бариосинтеза допускают существование доменов с избытком антивещества, в случае сильной неоднородности бариосинтеза. Размер доменов не фиксирован, он зависит от деталей рассматриваемых механизмов и может быть как малым, так и достигающим размера метагалактики.

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 [14].

В окружении вещества в ходе космологической эволюции не может сформироваться астрономический объект меньше, чем шаровое скопление, это показано в работе [15]. При меньших размерах антивещество еще до формирования Галактики проаннигилировало бы с окружающим его барионным веществом. Верхний предел размера домена задается наблюдаемыми потоками гамма-излучения [16].

Шаровые скопления антизвезд могли образоваться во время формирования Галактики и сохраниться в ее гало к настоящему времени. Потоки первичных антиядер в составе космических лучей - индикатор существования таких скоплений.

1.3 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 латинско-

го globulus - небольшой сферы. Шаровые скопления находятся в гало Галактики и содержат значительно больше звезд, оказывающихся старше, чем менее плотные открытые скопления, которые находятся в диске Галактики. Во Млечном Пути в настоящее время известно около 150 шаровых скоплений [17].

Наблюдения за шаровыми скоплениями показывают, что эти звездные структуры 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 [18].

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 [19, 20].

2 МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ГАЛАКТИКИ

Вселенная заполнена магнитными на любых масштабах. Поля существуют у планет, звезд, галактик и скоплений галактик [21].

Магнитные поля удерживают и распространяют космические лучи по межзвездной среде. Для описания распространения частиц в составе космических лучей прежде всего необходимо понимать их структуру, чтобы рассчитать влияние на поток вещества от источника [22]. В настоящее время величина и структура магнитных полей скоплений галактик остаются слабо определенными. Поэтому путь к пониманию космических магнитных полей лежит через изучение их происхождения в галактиках, и в частности в нашей [21, 23].

Считается, что первичные поля силой порядка 10^{20} Гс возникают в эпоху, предшествующую формированию галактик из абсолютно нулевого магнитного поля по механизму Бирмана [24]: любое накопление электронов в области пространства естественным образом приводит к стремлению электронов покинуть эту область, и это автоматически приводит к дисбалансу заряда, создающему электростатическое поле, и как следствие магнитное.

Однако, даже если бы звезды изначально рождаются без магнитного поля, то внутреннее затравочное поле может появиться по аналогичному механизму Бирмана - звездной батареи Бирмана, которое быстро усиливается звездным динамо [25]. Затем звездный ветер или другие выбросы направляют магнитное поле в межзвездное пространство и здесь оно уже становится затравочным полем для галактического динамо.

И, когда в галактике будет присутствовать достаточно сильное затравочное поле, то механизм динамо может воздействовать на это затравочное поле, преобразовывая механическую энергию воздействия в магнитную энергию. Механизм динамо $\alpha - \Omega$, основанный на взрывах сверхновых выглядит следующим образом (рис.2.1): На рис.2.1(a) начальное затравочное поле направлено в поступательном движении к плоскости вращения Галактики, а потенциальная сверхновая расположена под ним (Sn.). На рис.2.1(b) взрыв сверхновой создает

пузырь в межзвездной среде и механическим воздействием вытягивает силовую линию магнитного поля в петлю.

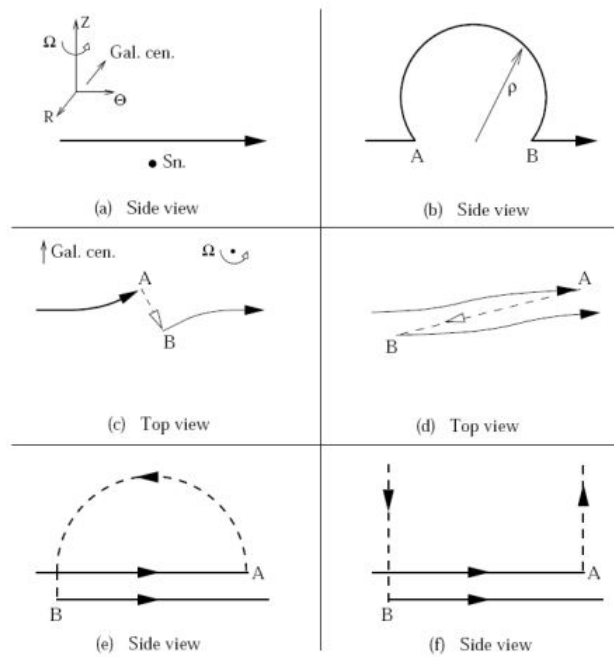


Рисунок 2.1 — Схематический вид динамо $\alpha - \Omega$, взятый из [25]. На рис.(a) и (b) сверхновая вытягивает силовую линию в петлю. На виде сверху на (c), где пунктирные линии показывают верхние части силовой линии, силы Кориолиса закручивают петлю в полоидальную плоскость. Затем дифференциальное вращение растягивает силовые линии, увеличивая магнитный поток в диске (d). В конце концов, верхняя часть силовой линии выбрасывается из диска, как показано на (e) и (f).

Из-за расширения пузыря момент инерции оболочки сильно увеличивается. И по закону сохранения углового момента пузырь замедляется в фиксированной системе отсчета и вращается против галактического движения в системе отсчета с началом в центре Галактики. Этот эффект Кориолиса и есть α -эффект и показан на рис.2.1(c). Точки A и B силовой линии в основании пузыря теперь лежат на разных радиусах и растянулись намного дальше друг от друга из-за дифференциального вращения (рис.2.1(d-f)). Это Ω -эффект, из-за которого напряженность магнитного поля будет увеличиваться линейно во времени. Предполагается, что силовые линии над плоскостью будут постоянно подниматься вверх, и таким образом это удалит отрицательный магнитный поток, оставляя магнитный поток в диске повышенным, но с глобальным сохранением

магнитного потока. Это крупномасштабная версия динамо среднего поля $\alpha - \Omega$, управляемая турбулентностью и действующая в меньших масштабах [25].

2.0.1 СТРУКТУРА МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ГАЛАКТИКИ

Магнитное поле имеет крупномасштабную регулярную составляющую, а также мелкомасштабную турбулентную (нерегулярную) составляющую. Оценка полного галактического магнитного поля вблизи Солнца составляет 6 ± 2 мкГс [26]. Отношение между регулярной и нерегулярной напряженностью поля оценивается как 0.6–1.0, но ожидается, что оно варьируется на масштабе Галактики: считается, что полное магнитное поле в оптических рукавах является самым сильным и в основном турбулентным, в межплечевых областях вероятнее всего преобладает регулярное поле, возможно, образуя магнитные рукава, которые простираются дальше оптических. В пределах (~ 200 пк) центра Галактики напряженность магнитного поля оценивается в ~ 10 мкГс и имеет примерно полоидальную форму в диффузной среде [27].

Регулярное поле диска

Как видно в соседних галактиках, регулярное поле имеет спиралевидную форму. Солнце расположено между спиральными рукавами Персея и Стрельца. Измерения вращения показывают, что магнитное поле направлено по часовой стрелке в рукаве Персея (расположенном за пределами солнечного круга) и против часовой стрелки в рукаве Стрельца [28]. Природа и количество крупномасштабных инверсий поля до сих пор остаются открытым вопросом.

Регулярное поле в гало

Протяженность галактического магнитного поля вдали от диска определить очень сложно. В работе [32] использовали меру вращения (RM) пульсаров для определения вертикального размера регулярного поля и оценили его в $\approx 1,5$ кпк. Другой подход состоял в том, чтобы предположить одинаковую энергетическую плотность между космическими лучами и магнитными полями и использовать наблюдаемое вертикальное распределение синхротронного излу-

чения для оценки вертикального распределения магнитного поля. Это привело к оценке масштаба до $\approx 5 - 6$ кпк. Третий подход [22] состоял в том, чтобы предположить одинаковую энергетическую плотность между космическими лучами, магнитными полями и силами гравитации. Оценив это как функцию расстояния от плоскости галактического диска и предполагая, что магнитное поле направлено параллельно плоскости магнитного диска, можно рассчитать распределение напряженности магнитного поля в вертикальном направлении. Геометрия поля гало не совпадает с конфигурацией поля в диске, предполагается более простая структура.

Турбулентное(нерегулярное) поле

Межзвездная среда турбулентна в широком масштабном диапазоне. В [29] показали, что спектр мощности межзвездной тепловой электронной плотности согласуется со степенным законом колмогоровского спектра с индексом $5/3$ [30] в масштабах от $\sim 10^{-11}$ до 10^{-3} пк. В самых больших масштабах [31] обнаружено, что звездный ветер или протозвездное истечение доминируют в инжекции турбулентной энергии на масштабах парсек в спиральных рукавах, а расширения сверхновых и сверхпузырей являются основными источниками энергии в межрукавных областях и происходят в масштабах 100 пк. До недавнего времени большинство исследований было сосредоточено на изучении крупномасштабного галактического магнитного поля [39]. В последнее время больше внимания уделяется нерегулярной компоненте: [33, 35, 40]. В [35] модели, которая показывает хорошее приближение к наблюдаемым данным, нерегулярное поле представлено как сумма анизотропной и изотропной компонент.

Анизотропное нерегулярное поле связано с крупномасштабным магнитным полем скалярным параметром и описывает нерегулярные поля в спиральном диске с полоидальной и тороидальной компонентами гало. Изотропное нерегулярное поле не зависит от крупномасштабной модели, и ее компоненты в диске и гало определяются отдельно. Диск с нерегулярным полем имеет постоянную напряженность в пределах радиуса 5 кпк и спиральную структуру во внешней части той же формы, что и крупномасштабный спиральный диск, но с различной амплитудой поля в каждом спиральном рукаве. Поле масштабируется как $1/r$. Нерегулярное поле гало затухает экспоненциально в радиальном

направлении и является гауссовским в направлении расстояния от плоскости галактического диска.

3 ДВИЖЕНИЕ АНТИГЕЛИЯ В МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ ГАЛАКТИКИ

Целью данной работы является установление ограничений на присутствие и характеристики шарового антизвездного скопления, для этого необходимо рассчитать от них поток ядер антигелия. Мы основываем наше моделирование движения ядер антигелия от шарового скопления до плоскости диска на модели галактического магнитного поля JF12 [34, 35].

В программном пакете matlab мы воспроизвели модель магнитных полей JF12. Написанная программа использовалась для генерирования начальных параметров для программного пакета моделирования движения частиц в Галактике [41]. Пакет работает с использованием метода частица-в-ячейке по схеме Бунеман-Борис [42, 43]. Схема реализует специальный расчет, который сохраняет кинетическую энергию частицы при вращательном движении в магнитном поле, это значительно повышает точность метода, сохраняя быстродействие. В результате созданный пакет программ оказывается применим для трассировки частиц в магнитном поле Галактики. На вход этой программы подаются не только компоненты магнитного поля, а так же характеристики частицы, такие как: масса, тип частицы, начальная энергия и вектор скорости. На выходе получаем траектории отдельных частиц в графическом и численном виде.

3.0.1 ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ ЗНАЧЕНИЯ МАГНИТНОГО ОБРЕЗАНИЯ ГАЛАКТИЧЕСКОГО ДИСКА ДЛЯ ВНЕГАЛАКТИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ

Прежде чем приступить к детальному рассмотрению механизма движения антигелия в магнитных полях, мы воспроизвели известное значение магнитного обрезания проникновения высокоэнергичных внегалактических частиц в диск нашей галактики. На рис.3.1

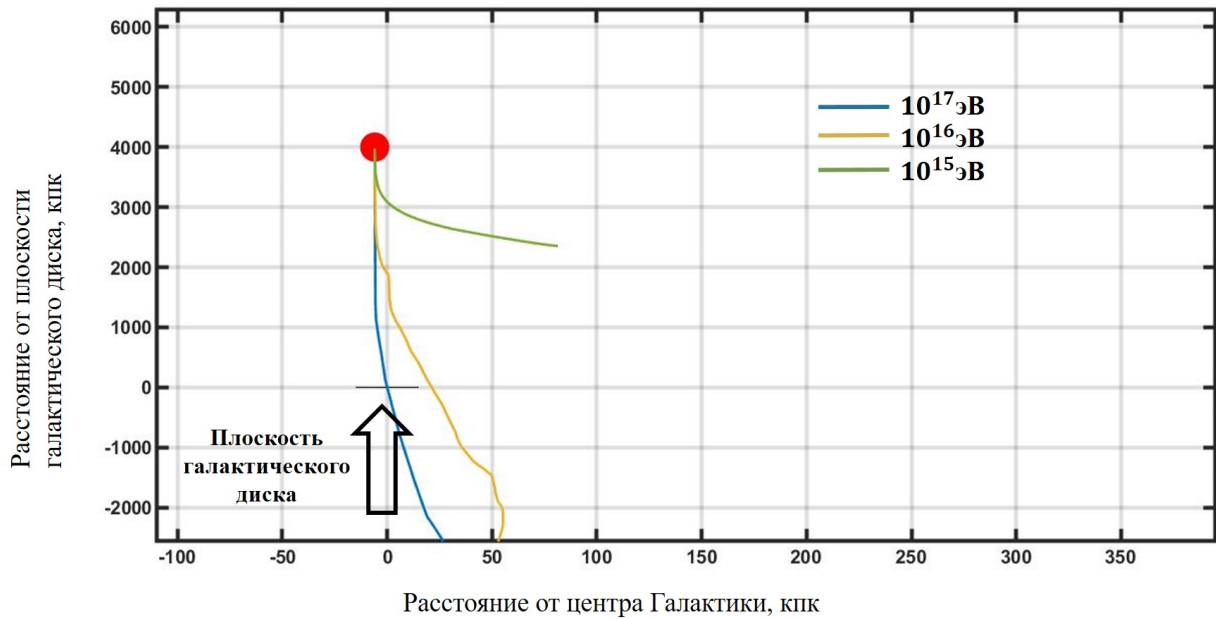


Рисунок 3.1 — Визуализация движения внегалактических частиц антигелия ультравысоких энергий. Красной точкой обозначено начальное положение - источник.

Опираясь на свойство изотропности космических лучей ультравысоких энергий, выбираем любую точку за пределами Галактики, на рисунке 3.1 источник обозначен красной точкой. Ядро антигелия проникает в галактический диск при достижении энергий 10^{17} эВ, такое же значение было получено группой CRProra при численном моделировании движения внегалактических космических лучей [44]. CRProra занимается моделированием и изучением космических лучей ультравысоких энергий. Далее можно приступить к получению собственных новых результатов, оценить энергию обрезания при проникновении в диск от источника в гало, полученное значение энергии должно значительно отличаться, так как частица уже находится в Галактике, то ей требуется гораздо меньшая энергия для проникновения в диск.

3.1 МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТ РАЗЛИЧНЫХ ШАРОВЫХ СКОПЛЕНИЙ ГАЛАКТИКИ

Работа выполнялась поэтапно. Для начала было промоделировано движение антигелия в полном магнитном поле Галактики от различных шаровых

скоплений в гало. В базе данных [45] представлена информация о наблюдаемых шаровых скоплениях Галактики, краткие характеристики и положение скоплений. На рис.3.2 представлены примеры траектории движения антигелия от нескольких шаровых скоплений из базы данных, время движения антигелия 10^5 дней (~ 300 лет). У всех ядер антигелия заданы одинаковые энергия (1000 ГэВ) и направление вектора начальной скорости (вдоль оси расстояния от центра Галактики по направлению к солнечной системе). Отличие состоит только в начальном положении частиц.

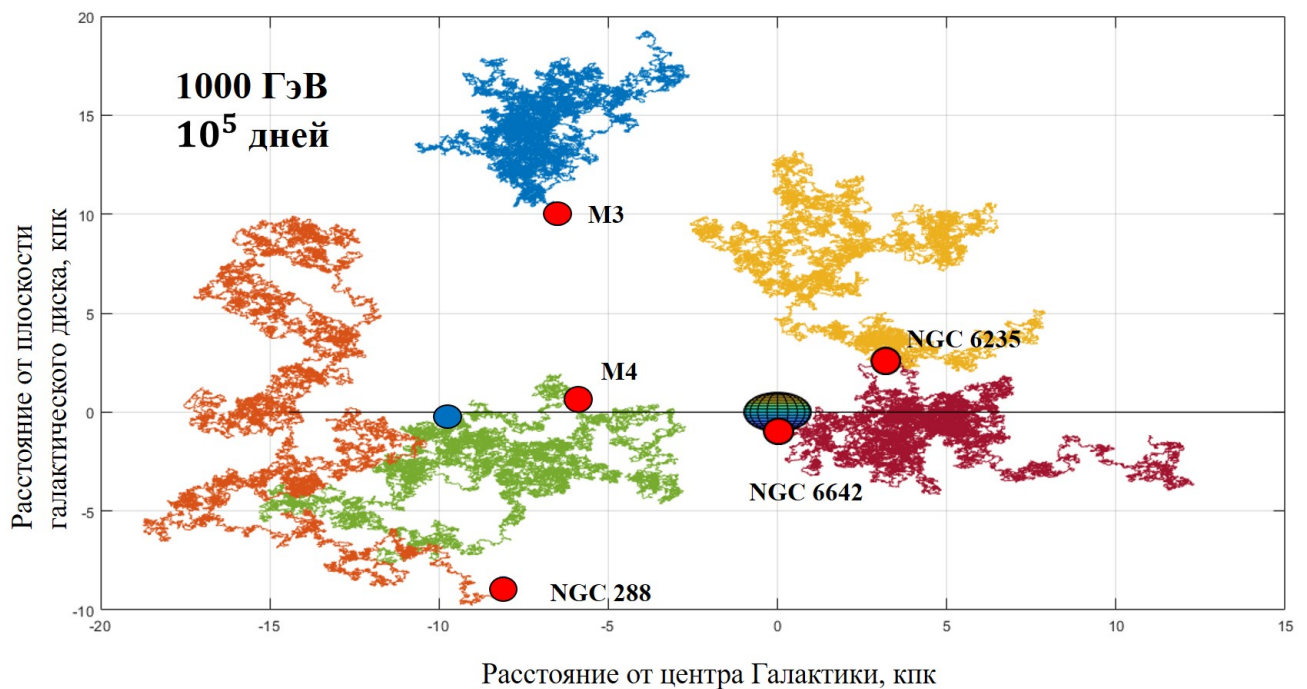


Рисунок 3.2 — Визуализация движения частиц антигелия от различных шаровых скоплений Галактики при времени движения антигелия 10^5 дней (~ 270 лет). Красными точками обозначены положения шаровых скоплений. Синим - положение солнечной системы.

На рис.3.3 представлены похожие траектории, но время движения ядер увеличено до 10^6 дней (~ 2700 лет), наблюдается указание на изотропию. При увеличении времени движения ядер по Галактике ожидается полная изотропия, что будет соответствовать характеру движения космических лучей в магнитных полях Галактики.

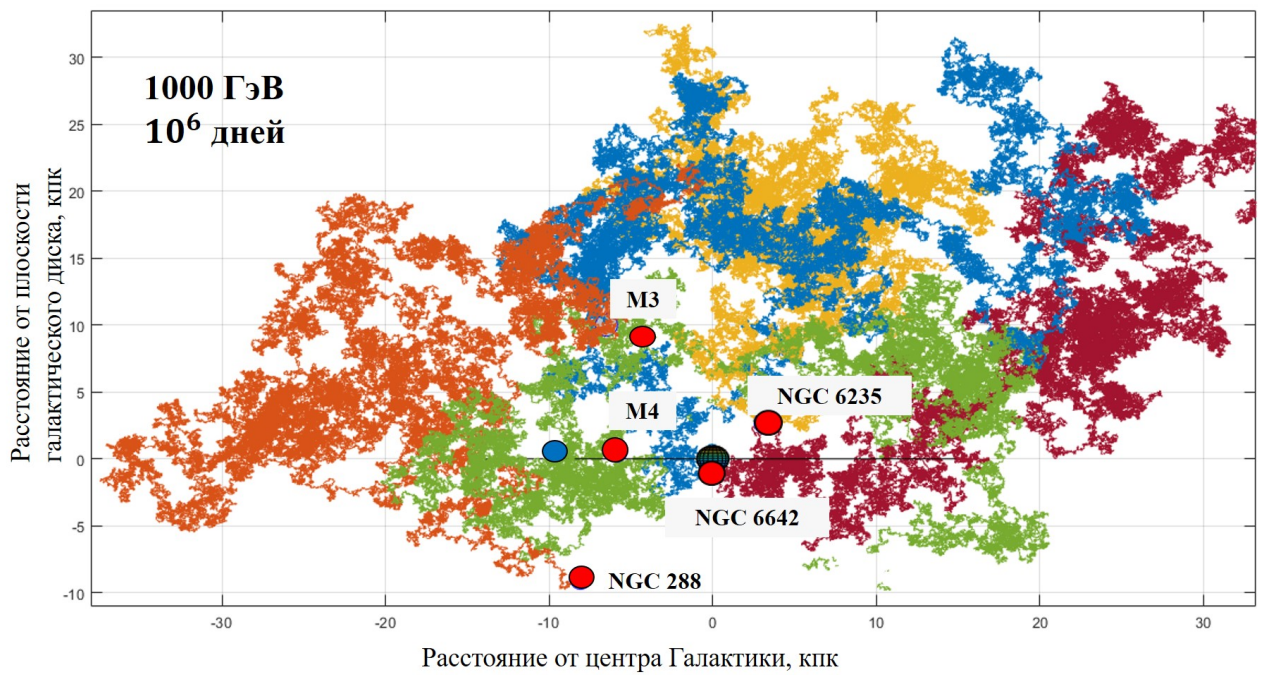


Рисунок 3.3 — Визуализация движения частиц антигелия от различных шаровых скоплений Галактики при времени движения антигелия 10^6 дней (~ 2700 лет). Красными точками обозначены положения шаровых скоплений. Синим - положение солнечной системы.

Для этого необходимо увеличить машинную мощность, именно на это будет направлена основная работа в дальнейшем - промоделировать движение на масштабе Галактики и на больших временных интервалах. На основании указания на изотропию можно предположить, что практически нет разницы какое шаровое скопление брать за источник. Мы выбрали известное наблюдаемое шаровое скопление M4, по данному скоплению имеется достаточное количество работ [46–49], которые позволяют изучить его население и свойства. И далее рассчитать поток антиядер от этого источника.

3.2 РАСЧЕТ ПЛОТНОСТИ ЭНЕРГИИ АНТИЧАСТИЦ ОТ ШАРОВОГО СКОПЛЕНИЯ M4

Исследуя известное наблюдаемое шаровое скопление M4, рассматриваем его как прототип шарового скопления антизвезд и, как следствие, источник антигелия. (таблица 3.1).

Таблица 3.1 — Параметры скопления М4 [48]

Возраст, млрд. лет	Расстояние от Солнца, кпк	Число звезд
12	1.72	$8 \cdot 10^4$

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

1) **Стационарное истечение вещества с поверхности антизвезд.**

Если область распространения антивещества шарового скопления будет пересекать галактический диск, то звездный ветер может попасть в диск, а затем и в Солнечную систему. Звезды постоянно теряют часть своей массы, создавая высокую концентрацию частиц от шарового скопления. В этом случае ожидаются энергии $\sim \text{МэВ}$, но тогда потребуется процесс дополнительного ускорения частиц для преодоления магнитного поля диска, а затем и Солнца, но, как известно, существует эффект солнечной модуляции.

2) **Вспышки на антизвездах.**

На Солнце постоянно происходят взрывные процессы, которые сопровождаются ускорением частиц и, как следствие, появлением солнечных космических лучей. Мы предполагаем существование подобных процессов в шаровом скоплении антизвезд. Частицы от таких вспышек на антизвездах получают энергию выше ($\sim \text{ГэВ}$) и сформируют антиядерную составляющую космических лучей.

3) **Взрывы антисверхновых в шаровом скоплении антизвезд.**

Взрывы сверхновых – это результат эволюции звезд, который сопровождается выбросом энергии $\sim 10^{51}$ эрг. Оболочка взорвавшейся антизвезды распространяется с высокой скоростью, и частицы могут получать энергию до ($\sim 10^{15}$ эВ) в результате различных механизмов ускорения и входить в состав космических лучей. По аналогии со звездами, которые являются источником частиц в космических лучах, антизвезды могут быть основным источником античастиц в галактических космических лучах, поэтому антисверхновые могут быть наиболее вероятным генератором антиядер в галактических космических лучах.

Анализ начинается с наиболее вероятного механизма – взрывов антисверхновых, потому как магнитные поля Галактики препятствуют проникновению античастиц низких энергий в Галактический диск и могут значительно подавить начальный поток ядер антигелия.

3.2.1 РАСЧЕТ ПЛОТНОСТИ ЭНЕРГИИ АНТИЧАСТИЦ В КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧАХ

Перед тем, как начать моделирование распространения частиц, необходимо оценить энергетическую плотность античастиц в космических лучах в предположении, что М4 - является скоплением антивещества.

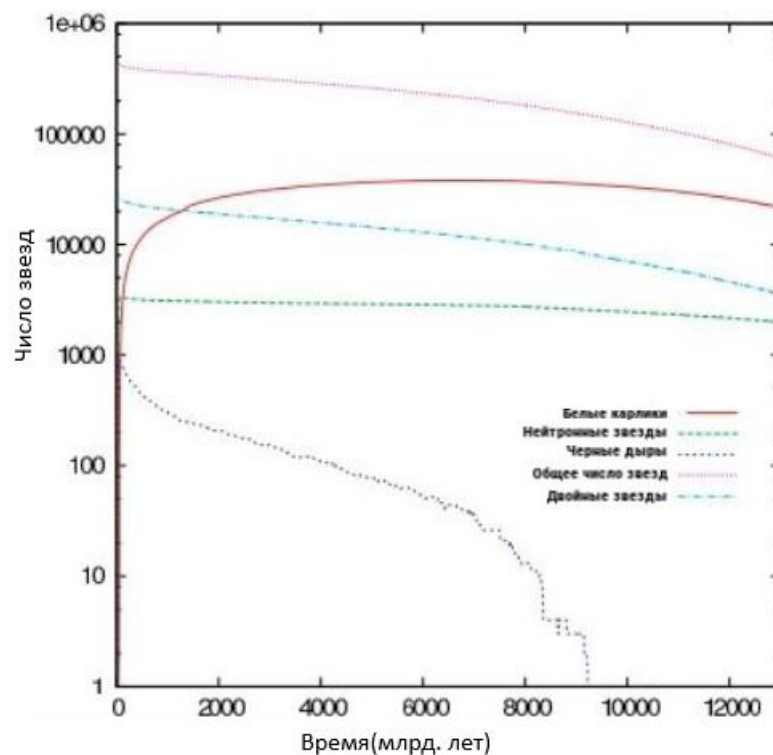


Рисунок 3.4 – Изменение населения М4 во времени.

На рис.3.4 представлен график эволюции населения скопления М4 [49]. 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.

Используя формулу для плотности энергии космических лучей обычного вещества

$$\rho_{CR} = \frac{E_{sn} \dot{N}_{sn} t_{ret}}{V} \quad (3.1)$$

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

Представим все численные значения этих величин в виде таблицы (3.2):

Таблица 3.2 — Таблица численных характеристик величин для расчета плотности энергии античастиц.

N_{sn}	t , млрд.лет	\dot{N}_{sn}	E_{sn} , эрг	t_{ret} , млн. лет	V , kpc^3
12	1.72	$8 \cdot 10^4$	10^{51}	$2 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^3$

Рассчитаем плотность, используя формулу (1) и значения таблицы:

$$\rho_{CR} = 10^{-4} \text{эВ}/\text{см}^3 \quad (3.2)$$

Для сравнения приведем значение плотности энергии космических лучей обычного вещества:

$$\rho = 1 \text{эВ}/\text{см}^3 \quad (3.3)$$

Так же приведем плотность энергии для вторичных антипротонов

$$\rho_{\bar{p}} = 10^{-5} \text{эВ}/\text{см}^3 \quad (3.4)$$

Полученное значение качественно совпадает с экспериментальным данным для плотности энергии антипротонов. Но, если учесть, что частицы космических лучей, движущиеся по Галактике, теряют часть своей энергии при различных взаимодействиях и, впоследствии, не могут проникнуть в диск из-за подавления проникновения частиц с низкой энергией, тогда можно будет уточнить результат. Для этого необходимо более подробно рассмотреть механизм движения

галактических космических лучей, представленный в следующей части.

3.3 ОЦЕНКА ЭНЕРГИИ МАГНИТНОГО ОБРЕЗАНИЯ АНТИГЕЛИЯ ОТ ШАРОВОГО СКОПЛЕНИЯ М4

3.3.1 МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ АНТИГЕЛИЯ В РЕГУЛЯРНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ ГАЛАКТИКИ. ОЦЕНКА ЭНЕРГИИ ОБРЕЗАНИЯ ДЛЯ РЕГУЛЯРНОГО ПОЛЯ ГАЛАКТИКИ.

Промоделируем движение частиц антигелия от прототипа шарового антизвездного скопления сначала в регулярном магнитном поле Галактики. На рис.3.5 представлены траектории частиц с различными энергиями. При начальной энергии порядка 100 ГэВ, частицы антигелия начинают проникать в плоскость галактического диска.

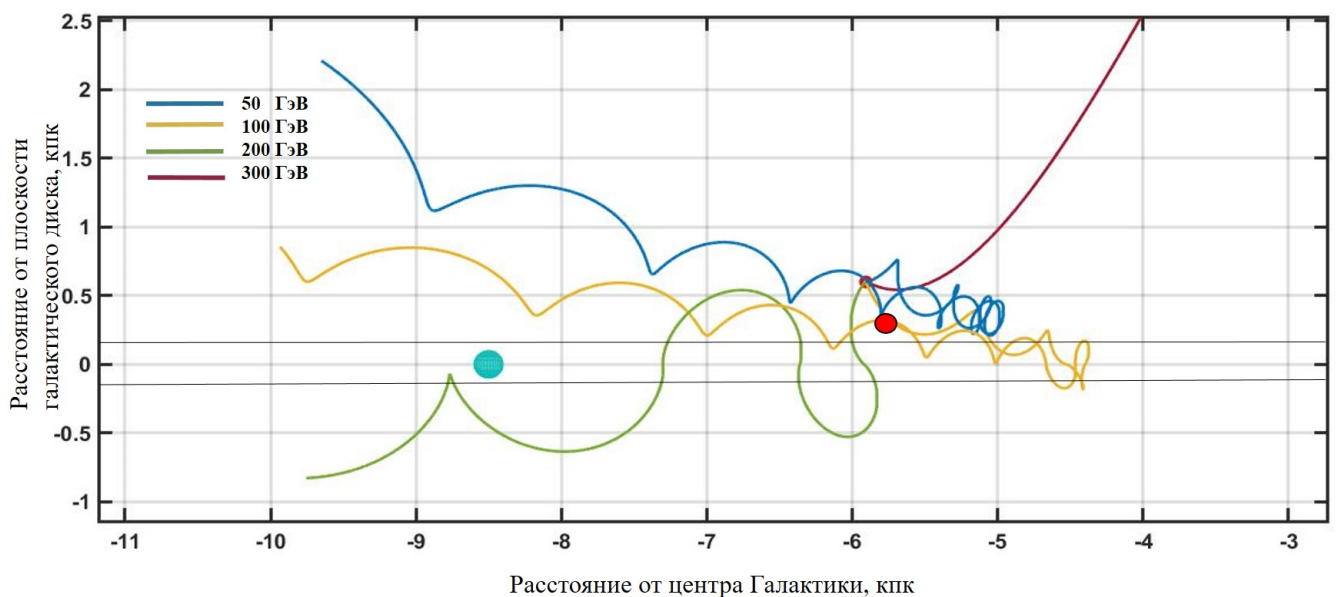


Рисунок 3.5 — Визуализация движения частиц антигелия. Красным кругом обозначено положение скопления М4. Синим - солнечной системы.

Необходимо детальнее исследовать зависимость проникновения частиц в данную область. Для этого была построена зависимость доли событий, попавших в галактический диск толщиной 300 пк, от энергии этих частиц (рис.3.6).

Для энергии, соответствующей магнитному обрезанию, проведено сглаживание полученной зависимости с учётом статистической погрешности и определены энергии, при которых сглаженные кривые пересекают уровень 0.25, т.е. ширину на полувысоте графика (с ростом энергии график стремиться к значению ~ 0.5 , что соответствует геометрическому фактору плоскости диска из точки с координатами скопления М4). Полученная характерная энергия магнитного обрезания составляет 100 ± 10 ГэВ. Это означает, что поток антиядер гелия от гипотетически шарового скопления антизвёзд М4 будет в значительной степени подавлен при энергиях менее ~ 100 ГэВ. Это внесет значительные модификации в первоначальный поток частиц, и из трех возможных механизмов инжекции, рассмотренных ранее, уже на этапе оценки энергии обрезания в регулярном поле, остается наиболее вероятным самый высокоэнергетичный случай - анти-вещество от взрыва гипотетических антисверхновых.

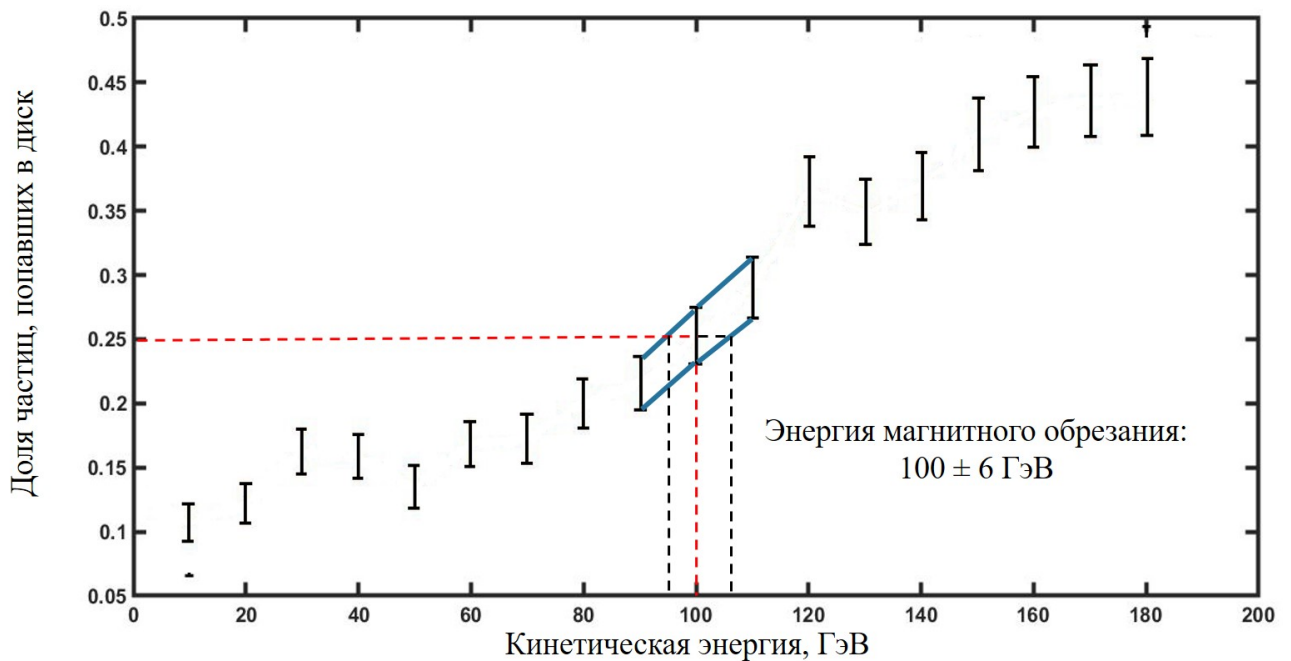


Рисунок 3.6 — Зависимость доли частиц антигелия, проникших в диск, от их энергии в регулярном магнитном поле Галактики.

Таким образом можно отметить, что частицы с низкой энергией (порядка десятка ГэВ и ниже) не смогут проникнуть в галактический диск. Активно антигелий начинает проникать в диск, начиная с энергий порядка 100 ГэВ.

3.3.2 МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ АНТИГЕЛИЯ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ ГАЛАКТИКИ С УЧЕТОМ НЕРЕГУЛЯРНОСТЕЙ. ОЦЕНКА ЭНЕРГИИ ОБРЕЗАНИЯ ДЛЯ ПОЛНОГО ПОЛЯ ГАЛАКТИКИ.

На следующем этапе было добавлено нерегулярное слагаемое магнитного поля. Так же (рис.3.7) были промоделировано движение частиц антигелия уже в полном магнитном поле Галактики с различной начальной энергией от источника. Энергетический порог вырос в сравнении с прошлой визуализацией траекторий в регулярном поле.

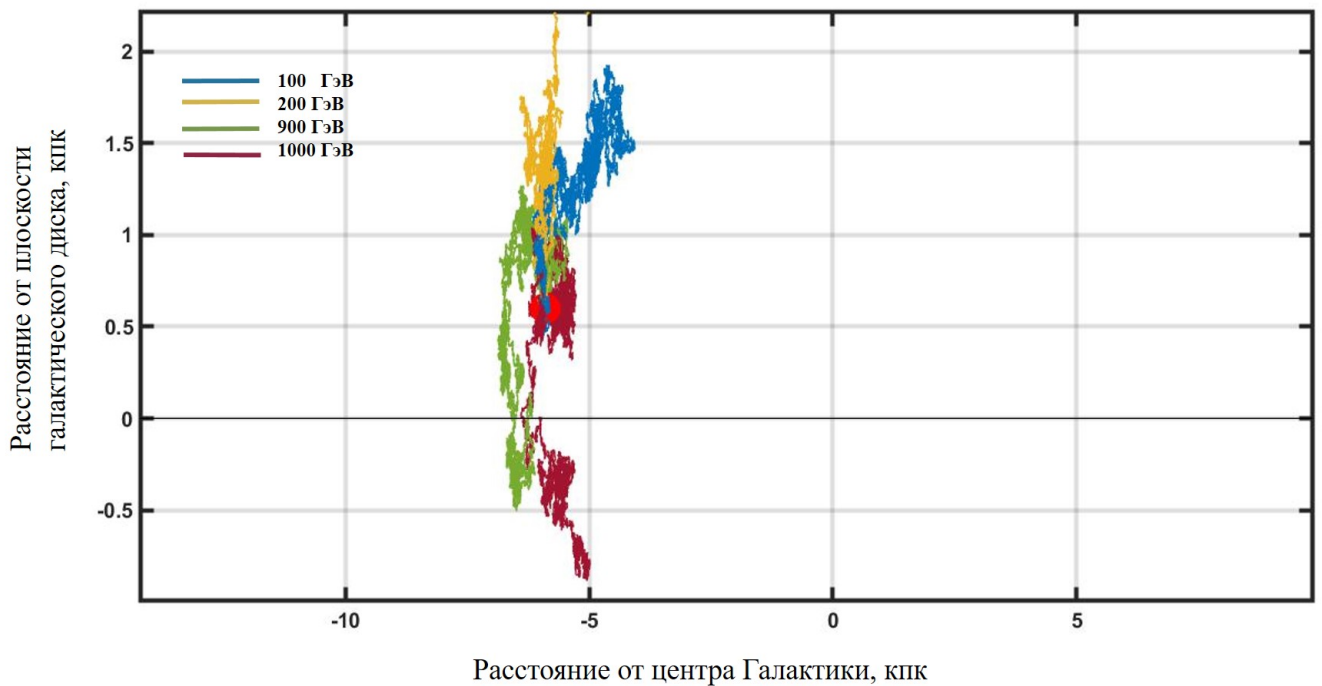


Рисунок 3.7 — Визуализация движения ядер антигелия с учетом нерегулярного поля. Красным кругом обозначено положение скопления М4.

Далее аналогичным способом, что и рис.3.6, была оценена энергия обреза для полного поля, уже с учетом нерегулярной компоненты (рис.3.8).

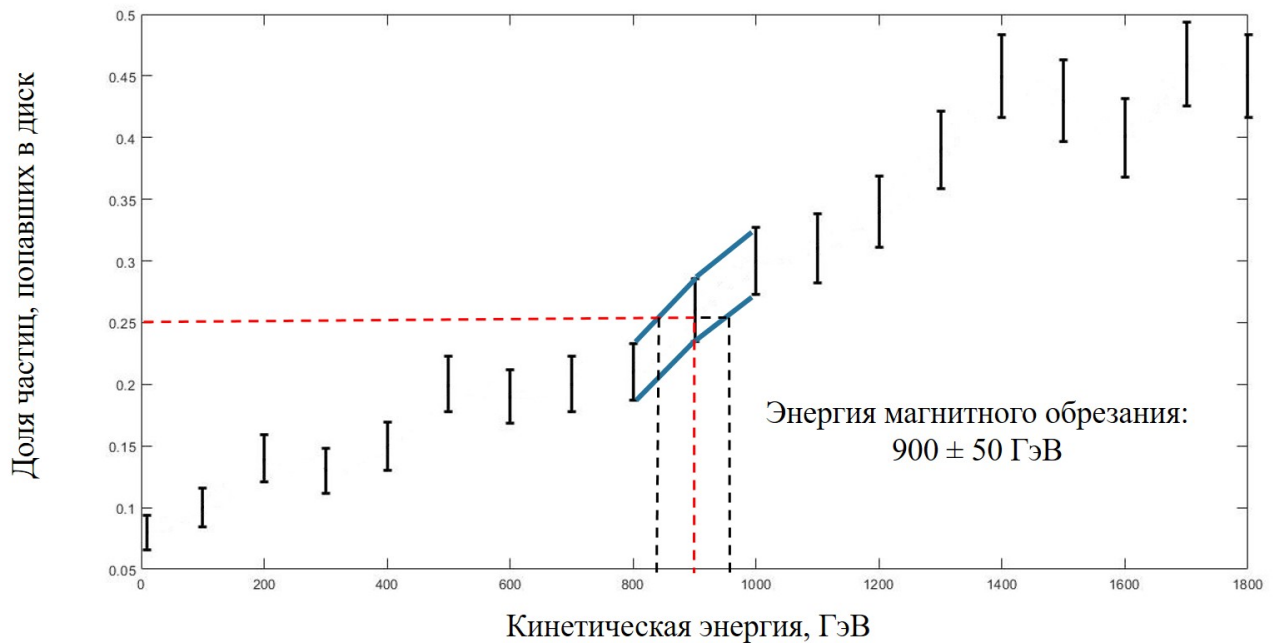


Рисунок 3.8 — Зависимость доли частиц, проникших в диск, от энергии частицы в поле Галактики с учетом нерегулярностей.

С добавлением нерегулярного слагаемого энергия магнитного обрезания возросла практически на порядок, это говорит о том, что поток частиц антигелия в диск значительно снизился. Это установило более строгое ограничение на возможные механизмы инъекции. Таким образом исключается вариант стационарного истечения вещества и вспышек на звездах. Магнитные поля диска являются практически непреодолимым барьером для частиц таких низкий энергий, исходя из анализа полученной энергии магнитного обрезания. И тем самым получаем некоторый анализ функции источника. В качестве нулевого приближения спектра источника взят классический степенной спектр с показателем степени $\gamma = 2.8$ при энергиях до 10^5 ГэВ и плавно меняющимся γ с 2.8 до 3.2 при энергии больше 10^6 ГэВ. При энергии больше 10^{10} ГэВ показатель γ падает до ~ 2.8 . Дальнейшая работа будет направлена уточнение значения величины энергии обрезания для полного магнитного поля Галактики путем увеличения времени движения ядер антигелия в магнитном поле, используя большую машинную мощность для обработки данных. Так же на более полный и подробный анализ функции источника. Необходимо будет так же учесть рождение вторичных античастиц, долю неупругих реакций при взаимодействии с межзвездной средой. И рассмотреть влияние эффекта солнечной модуляции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной дипломной работе было изучено типичное шаровое скопление М4, взятое за прототип шарового скопления, изучены механизмы инъекции антивещества в космические лучи от М4 и оценена энергия обрезания проникновения ядер антигелия в галактический диск в полном магнитном поле Галактики. Полученная величина устанавливает ограничение на распространение в область диска начального потока антигелия - при энергиях ниже 1000 ГэВ поток сильно подавлен. Проведен некоторый анализ функции источника - в качестве нулевого приближения при высоких энергиях взят классический степенной спектр.

Дальнейшая работа направлена на уточнение оценки энергии обрезания, путем увеличения времени движения ядер антигелия в магнитных полях Галактики, а так же на учет доли образовавшихся вторичных античастиц и процент неупругих реакций в межзвездной среде и изучение распространения потока в области гелиосферы с учетом эффекта солнечной модуляции.

Вышеперечисленные и дальнейшие исследования помогут получить поток антиядер от скопления и, таким образом, установить ограничение на присутствие и свойства домена антивещества в нашей галактике.

БЛАГОДАРНОСТИ

Выражаю благодарность моему научному руководителю М.Ю. Хлопову за профессиональный педагогический и наставнический подход к моему обучению на пути к научной карьере. Так же выражаю благодарность моему научному консультанту А.Г. Майорову за уникальный подход, который поспособствовал формированию моей самостоятельности, что является основополагающим фактором в научной деятельности. И наконец, выражаю благодарность коллективу кафедре №40 за весомые замечания на протяжении всей научной работы, которая и стала основой для данной диссертации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] P. A. M. Dirac: The quantum theory of the electron, Proc. Roy. Soc. (London) **A117**, 610—624 (1928).
- [2] O. Chamberlain, E. Segre, C. Wiegand, T. Ypsilantis: Observation of Antiprotons, Phys. Rev. **100**, 947 (1955).
- [3] M. Y. Khlopov: *Fundamentals of Cosmoparticle Physics* CISP-Springer, Cambridge, UK, 2012.
- [4] A. D. Dolgov: Matter and antimatter in the universe, Nucl. Phys. Proc. Suppl. **113**, 40 (2002).
- [5] M.Yu. Khlopov: An antimatter globular cluster in our Galaxy - a probe for the origin of the matter, Gravitation and Cosmology , **4**, 69-72 (1998).
- [6] Nicola Tomassetti, Alberto Oliva: Secondary antinuclei from supernova remnants and background for dark matter searches, 35th International Cosmic Ray Conference – ICRC2017, (2017).
- [7] Stecker F.W., Tylka A.J., The cosmic-ray antiproton spectrum from dark matter annihilation and its astrophysical implications: a new look, The Astrophysical Journal **336**, 51-54 (1989).
- [8] V.A. Kuzmin: CP violation and baryon asymmetry of the universe, JETP Lett **12**, 228 (1970).
- [9] A.D. Sakharov: Violation of CP-invariance, C-asymmetry and baryon asymmetry of the Universe, JETP Lett **5**, 32 (1967).
- [10] 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. **118B**, 359-362 (1982).

- [11] V.M. Chechetkin, M.Yu. Khlopov and M.G. Sapozhnikov: Antiproton interactions with light elements as a test of GUT cosmologies., *Rivista Nuovo Cimento* **5**, 1-80 (1982).
- [12] A.D. Dolgov, A.F. Illarionov, N.S. Kardashev, I.D. Novikov, Cosmological model of a baryon island, *JETP* **67**, 1517-1524 (1988).
- [13] M.Yu. Khlopov, S.G. Rubin, A.S. Sakharov: Possible Origin of Antimatter Regions in the Baryon Dominated Universe., *Phys.Rev.D* **62**, 083505 (2000).
- [14] M. Charlton, S. Eriksson, G. M. Shore: Fundamental Physics in Antihydrogen Experiments, 97-98 (2020).
- [15] M.Yu. Khlopov, R.V. Konoplich, R. Mignani, et al.: Evolution and observational signature of diffused antiworld., *Astroparticle Phys.* **12**, 367-372 (2000).
- [16] The Fermi-LAT Collaboration: Fermi-LAT Observations of the Diffuse Gamma-Ray Emission: Implications for Cosmic Rays and the Interstellar Medium., *ApJ* **750**, 1 (2012).
- [17] <http://gclusters.altervista.org/>
- [18] M. Paul: *Star Clusters. Encyclopedia of Astronomy and Astrophysics*, 2014.
- [19] <https://www.astro.keele.ac.uk/workx/globulars/globulars.html>
- [20] J. S. Kalirai, H. B. Richer: Star clusters as laboratories for stellar and dynamical evolution, Royal society publishing, (2009).
- [21] E.N. Parker: *Cosmical magnetic fields: Their origin and their activity*, Oxford, Clarendon Press; New York, Oxford University Press, (1979).
- [22] A. Boulares, D.P. Cox: Galactic Hydrostatic Equilibrium with Magnetic Tension and Cosmic-Ray Diffusion, *Astrophysical Journal* **365**, 544 (1990).
- [23] A. Ruzmaikin, D. Sokoloff, A. Shukurov: Magnetism of spiral galaxies, *Nature* **336**, 341–347 (1988).
- [24] L. Biermann: On the origin of magnetic fields on stars and in interstellar space (with an appendix by A. Schlueter), *Zs. Naturforschung* **5a**, 65 (1950).

- [25] R. Kulsrud: Magnetic reconnection with Sweet-Parker characteristics in two-dimensional laboratory plasmas, *Physics of Plasmas* **6**, 1743 (1999).
- [26] R. Beck: Galactic and Extragalactic Magnetic Fields. *Space Science Reviews* **99**, 243–260 (2001).
- [27] K.Ferriere: Interstellar magnetic fields in the Galactic center region, *A&A* **505**, 1183 - 1198 (2009).
- [28] R. Wielebinski, R. Beck: *Cosmic Magnetic Fields* CISP-Springer, Springer Science & Business Media, Berlin, Heidelberg, 2005.
- [29] J.W. Armstrong, B.J. Rickett, S.R. Spangler: Electron Density Power Spectrum in the Local Interstellar Medium, *ApJ* **443**, 209 (1995).
- [30] Kolmogorov, A.N. The local structure of turbulence in incompressible viscous fluid for very large reynolds numbers, *Doklady Akademii Nauk SSSR* **30**, 301-304 (1941).
- [31] Haverkorn, J.C. Brown, B.M. Gaensler: The outer scale of turbulence in the magnetoionized galactic interstellar medium, *ApJ* **680**, 362 (2008).
- [32] J.L. Han, G.J. Qiao: On Galactic magnetic field derived from RMs of pulsars., *A&A* **288**, 759 (1994).
- [33] M.A. Miville-Deschenes, N. Ysard: Separation of anomalous and synchrotron emissions using WMAP polarization data, *A&A* **490**, 1093–1102 (2008).
- [34] R. Jansson and G. R. Farrar: A New Model of the Galactic Magnetic Field, *ApJ* **757**, 14 (2012).
- [35] M. C. Beck, A. M. Beck, Andrew W. Strong: New constraints on modelling the random magnetic field of the MW, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* **2016**, 056 (2016).
- [36] R. Beck, A. Brandenburg, D. Moss, A. Shukurov, and D. Sokoloff: Galactic Magnetism: Recent Developments and Perspectives, *ARA& A* **34**, 155–206 (1996).

- [37] P. G. Tinyakov and I. I. Tkachev: Deflections of cosmic rays in a random component of the Galactic magnetic field, *Astroparticle Physics* **24**, 32–43 (2005).
- [38] Planck Collaboration, P. A. R. Ade, et al., Planck intermediate results. XIX. An overview of the polarized thermal emission from Galactic dust, *A&A* **576**, A104 (2015).
- [39] L. Page, G. Hinshaw: Three-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Polarization Analysis, *ApJS* **170**, 335–376 (2007).
- [40] T. R. Jaffe, J. P. Leahy: Modelling the Galactic magnetic field on the plane in two dimensions, *MNRAS* **401**, 1013–1028 (2010).
- [41] V. Golubkov, A. Mayorov: Software for Numerical Calculations of Particle Trajectories in the Earth’s Magnetosphere and Its Use in Processing PAMELA Experimental Data, *Bull.Russ.Acad.Sci.Phys.* **85**, 383-385 (2021).
- [42] J.P. Boris: The acceleration calculation from a scalar potential, *Plasma Physics Laboratory, Princeton University, MATT-152*, (1970) URL: <https://www.osti.gov/biblio/4168374>
- [43] S. Zenitani, T. Umeda: On the Boris solver in particle-in-cell simulation, *Physics of Plasmas* **25**, 112110 (2018).
- [44] R.A. Batista, A. Dundovic: CRPropa 3—a public astrophysical simulation framework for propagating extraterrestrial ultra-high energy particles, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* **05 2016**, 038 (2016).
- [45] <http://gclusters.altervista.org/>
- [46] S. Jang, J. J. Kim, Y. Lee: Multiple populations in globular clusters: Unified efforts from stellar evolution and chemical evolution models, *ApJ* **886**, 116 (2019).
- [47] M. Tailo, A. P. Milone: Mass loss of different stellar populations in Globular Clusters: the case of M4., *ApJ* **873**, 123 (2019).
- [48] D. C. Heggie and M. Giersz: Modelling individual globular clusters, *Cambridge University Press Access S246* **3**, 121-130 (2007).

- [49] D. C. Heggie, M. Giersz: Monte Carlo simulations of star clusters – V. The globular cluster M4, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 1 **388**, 429–443 (2008).
- [50] M. Opher, F. Alouani Bibi: A strong, highly-tilted interstellar magnetic field near the Solar System, *Nature*, **462**, 1036–1038 (2009).