

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

Отчет
по преддипломной практике по теме
Моделирование распространения античастиц от прототипа
гипотетического шарового скопления антизвезд в магнитных
полях Галактики

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 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

1	Введение	2
1.1	Первичное антивещество	3
1.2	Шаровые скопления в гало Галактики	4
1.3	Магнитное поле Галактики	5
1.4	Постановка задачи	9
1.5	Расчет плотности энергии античастиц в космических лучах .	11
1.6	Движение частицы в магнитном поле Галактики	13
1.7	Заключение	17
	Список литературы	18

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].

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

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

Предсказание [4] основано на предположении о симметрии свойств шаровых скоплений вещества и антивещества [3]. В данной работе рассматривается возможность существования шарового скопления антивещества, который будет является источником первичного антигелия. Первичный антигелий является вторым по распространенности после антипротона. Шаровое скопление также является источником более тяжелых антиядер. Но двигаясь по Галактике, тяжелые ядра будут подвергаться фрагментации. Именно поэтому антигелий является той характеристикой шарового скопления, которая, с одной стороны, практически не рождается как вторичная, а с другой стороны, будет более распространена как первичная [4]. Подход в данной работе направлен на то, чтобы уточнить предсказания этой гипотезы с учетом описания образования и распространения антигелия в магнитных полях Галактики.

1.1. ПЕРВИЧНОЕ АНТИВЕЩЕСТВО

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)[7] и В.А.Кузьмин(1970)[8] сформулировали необходимые условия для бариосинтеза – 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.

С другой стороны в работах [9] - [12] 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 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[13].

В окружении вещества в ходе космологической эволюции не может сформироваться астрономический объект меньше, чем шаровое скопление, это показано в работе [14]. При меньших размерах антивещество еще до формирования Галактики проаннигилировало бы с окружающим его барионным веществом. Верхний предел размера домена задается наблюдаемыми потоками гамма-излучения[15].

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.

1.2. 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 [16].

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 [17].

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 [18]-[19].

1.3. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ГАЛАКТИКИ

Хорошо известно, что Вселенная заполнена магнитными полями очень большого масштаба и значительной силы. Поля существуют во всех масштабах, в планетах, звездах, галактиках и скоплениях галактик [20]. Но по своему происхождению магнитное поле звезд и планет вторично, а поле галактик первично. Магнитные поля галактик являются важной частью межзвездной среды. Они играют непосредственную роль в удержании и распространении космических лучей Галактики. Для описания распространения частиц в составе космических лучей прежде всего необходимо понимать структуру магнитных полей Галактики, чтобы впоследствии описать их влияния на первоначальный поток вещества [21].

Так как ситуация со скоплениями галактик не очень ясна, их величина и структура слабо определены. Поэтому лучший путь к пониманию космических полей лежит через открытие их происхождения в галактиках, и в частности в нашей Галактике [20, 22].

Принято считать, что первичные поля силой порядка 10^{-20} Гс легко возникают в эпоху, предшествующую формированию галактик из абсолютно нулевого магнитного поля. Такие поля могут возникать из-за дополнительного члена в законе Ома по механизму Бирмана [23]: любое накопление давления электронов в любой точке естественным образом приводит к стремлению электронов покинуть эту точку и это автоматически приводит к дисбалансу заряда, создающему электростатическое поле, и как следствие магнитное.

Однако, даже если звезда родилась бы без магнитного поля, звездная батарея Бирмана создаст внутреннее затравочное поле, которое будет быст-

ро усилено звездным динамо. Звездные ветры или другие выбросы могут затем направить магнитные поля в межзвездное пространство и действовать как затравочное поле для галактического динамо.

Когда в галактике присутствует достаточное затравочное поле, считается, что механизм динамо может воздействовать на затравочное поле, увеличивая длину его когерентности и возводя в степень напряженность поля путем преобразования механической энергии в магнитную энергию. Механизм динамо $\alpha - \Omega$, работающего от взрывов сверхновых выглядит следующим образом (рис 1.1): На панели (а) начальное затравочное поле направлено в поступательном движении галактического вращения, а звезда, которая вот-вот станет сверхновой, расположена под ним. На следующей панели сверхновая создает пузырь и растягивает силовую линию в виде петли.

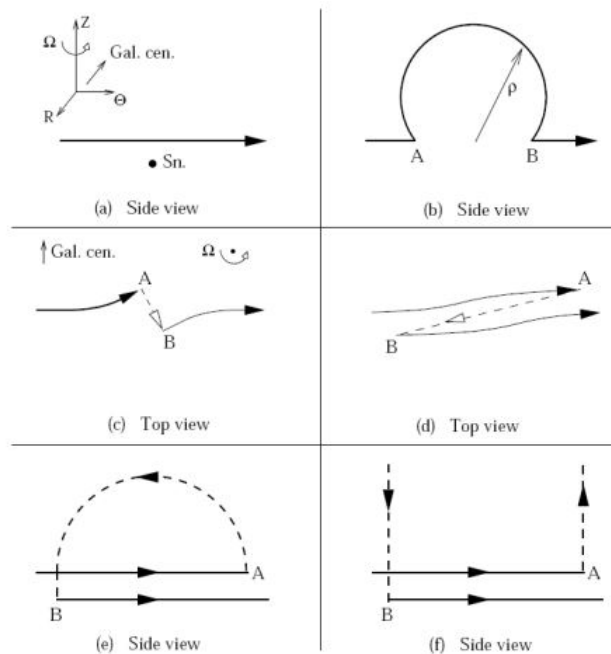


Рисунок 1.1 — Схематический вид динамо $\alpha - \Omega$, взятый из [24]. На панелях (а) и (б) сверхновая создает пузырь в межзвездном пространстве, растягивая силовую линию в петлю. На виде сверху на (в), где пунктирные линии показывают верхние части силовой линии, силы Кориолиса закручивают петлю в 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 (е) и (f).

Из-за расширения оболочки момент инерции оболочки сильно увеличился. По закону сохранения углового момента пузырь замедляется в фиксированной системе отсчета и вращается против галактического вращения в галактической системе отсчета. Этот эффект Кориолиса называется α -эффектом и показан сверху на панели (с). Точки А и В силовой линии в основании пузыря лежат на нескольких разных радиусах и теперь растянуты дальше друг от друга из-за дифференциального вращения, как показано на рисунке (d-f). Это Ω -эффект, и он будет продолжать увеличивать напряженность поля линейно во времени. Предполагается, что силовые линии над плоскостью бесконечно поднимаются вверх, что, таким образом, удалит отрицательный магнитный поток, оставив 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 [24].

Магнитное поле в диффузном МЗС имеет крупномасштабную регулярную составляющую, а также мелкомасштабную турбулентную составляющую. Стандартная оценка силы полного галактического магнитного поля вблизи Солнца составляет 6 ± 2 мкГс [25]. Отношение между регулярной и случайной напряженностью поля оценивается по данным звездного света и синхротрона как 0.6–1.0, но ожидается, что оно будет варьироваться по всей Галактике: считается, что полное поле в оптических рукавах является самым сильным и в основном турбулентным; в межплечевых областях может преобладать регулярное поле, возможно, образуя магнитные рукава, простирающиеся дальше оптических рукавов. В пределах (~ 200 пк) центра Галактики [26] оценивает напряженность поля в ~ 10 мкГс и имеет примерно полоидальную форму в диффузной среде и находит поля в ~ 1 мГс в волокнах и плотных облаках.

Регулярное поле

Как видно во внешних галактиках, регулярное поле имеет тенденцию иметь спиралевидную форму, напоминающую распределение материи в диске. Солнце расположено между спиральными рукавами Персея и Стрельца. Измерения вращения показывают, что магнитное поле направлено по часовой стрелке в рукаве Персея (расположенном за пределами сол-

нечного круга) и против часовой стрелки в рукаве Стрельца (Wielebinski Besk 2005). Природа и количество крупномасштабных инверсий поля до сих пор остаются открытым вопросом.

Турбулентные поля

Межзвездная среда турбулентна в очень большом диапазоне масштабов. [27] показали, что спектр мощности межзвездной тепловой электронной плотности согласуется со степенным законом с колмогоровским спектральным индексом $5/3$ [28] в масштабах от 107 до 1015 см ($\sim 10^{-11}$ до 10^{-3} пк). В самых больших масштабах [29] обнаружили, что звездные ветры или протозвездные истечения доминируют в инжекции турбулентной энергии на парсековых масштабах в спиральных рукавах, в то время как расширения сверхновых и сверхпузырей являются основными источниками энергии в межрукавных областях и происходят в масштабах 100 пк.

Поля в гало

Протяженность галактического магнитного поля вдали от диска определить очень сложно. В работе [30] использовали RM пульсаров для определения масштабной высоты регулярного поля и нашли $z_0 \approx 1,5$ кпк. Другой подход состоит в том, чтобы предположить равное распределение между космическими лучами и магнитными полями и использовать наблюдаемое вертикальное распределение синхротронной излучательной способности для оценки вертикального распределения магнитного поля. Это приводит к оценкам высоты шкалы до $z_0 \approx 5 - 6$ кпк. Третий подход [21] состоит в том, чтобы предположить, что существует приблизительное равное распределение между нетепловыми формами давления: магнитным, космическими лучами и динамическим давлением. Оценив нетепловое давление как функцию z и предполагая, что магнитное поле направлено параллельно плоскости, можно рассчитать вертикальное распределение напряженности магнитного поля. Геометрия поля вряд ли будет такой же в гало, как и в диске, а карты мер вращения неба показывают меньше вариаций на больших широтах, что подразумевает более простую структуру, чем диск. Кроме того, как описано ниже, внешние галактики, видимые с ребра, часто демонстрируют значительные вертикальные поля вдали от диска.

В настоящее время активно разрабатываются модели магнитных полей в основе которых лежит не описание поля гало и диска как уравнения одного поля с разной силой и интенсивностью [31], а разделение галактического поля на несколько мелких и крупных полей, каждое из которых описывается собственной динамикой, такие модели лучше согласуются с экспериментальными данными [35].

До недавнего времени большинство исследований было сосредоточено на моделировании крупномасштабного ГМП [36]. В последнее время больше внимания уделяется мелкомасштабной компоненте поля: [37, 38]. Считается, что мелкомасштабные флуктуации изменят распространение космических лучей сверхвысоких энергий и будут играть важную роль в их анализе [34].

1.4. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Мы основываем наше исследование на модели ГМП JF12 [31, 39]. Модель описывает отдельные компоненты для картин магнитного поля внутри спирального диска, тороидального поля гало и X-образного полоидального поля гало и дополнительно так же рассматривается мелкомасштабная компонента МП как сумма изотпорной и анизотропной компонент. Каждый из этих компонентов моделируется таким образом, чтобы обеспечить нулевую магнитную дивергенцию. Опираясь на расчетные формулы для вектора магнитного поля с помощью программы моделирования движения частиц, на вход которой подаются компоненты поля будет доступно построение траекторий частиц в магнитных полях Галактики.

Исследуя известное наблюдаемое шаровое скопление М4, рассматриваем его как прототип шарового скопления антизвезд и, как следствие, источник антигелия. (таблица 1.1).

Таблица 1.1 — Параметры скопления М4 [40]

Возраст, Млдр. 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 Солнца, но, как известно, этот эффект подавляется.

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. Известно, что внутри диска могут генерироваться частицы с энергией $\sim \text{ГэВ}$, но вопрос о распространении таких частиц из гало в диск в настоящее время остается открытым.

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.

Но так же немаловажно отметить, что частота взрыва таких сверхновых мала на фоне вспышек антизвезд и на фоне постоянного истечения стационарного вещества антизвезд.

1.5. РАСЧЕТ ПЛОТНОСТИ ЭНЕРГИИ АНТИЧАСТИЦ В КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧАХ

Перед тем, как начать моделирование распространения частиц, необходимо оценить **энергетическую плотность античастиц** в космических лучах. Эта оценка при сопоставлении с экспериментальными данными(ссылка) поможет сделать предположения по распространению потока в Галактике.

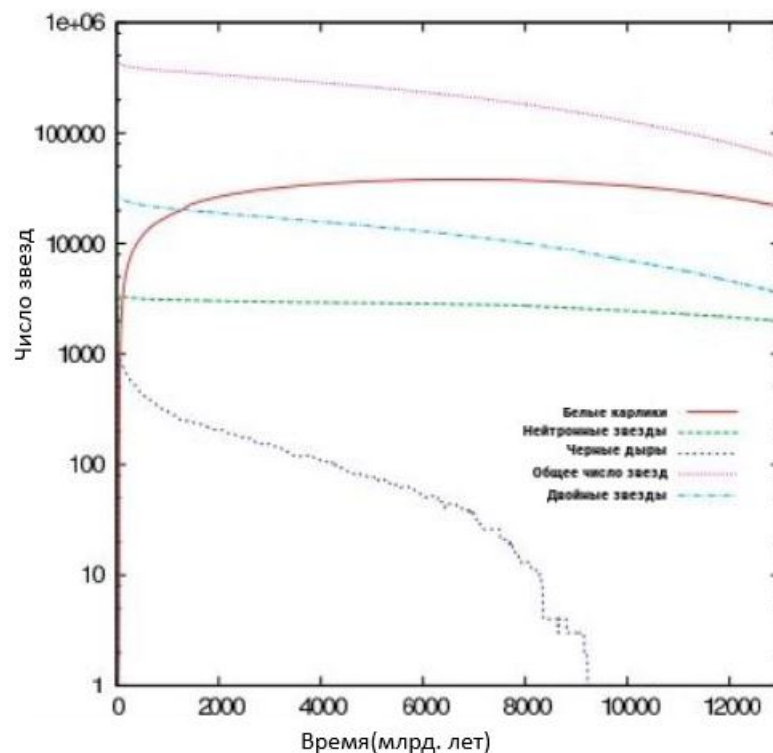


Рисунок 1.2 — Изменение населения М4 во времени

На рисунке (1.2) представлен график эволюции населения скопления М4[41]. 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

$$\rho_{CR} = \frac{E_{sn}\dot{N}_{sn}t_{ret}}{V} \quad (1.1)$$

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(1.2):

Таблица 1.2 — 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:

$$\rho_{CR} = 10^{-4} \text{ЭВ/см}^3 \quad (1.2)$$

Для сравнения приведем значение плотности энергии космических лучей обычного вещества:

$$\rho = 1 \text{ЭВ/см}^3 \quad (1.3)$$

Так же приведем плотность энергии для вторичных антипротонов

$$\rho_{\bar{p}} = 10^{-5} \text{ЭВ/см}^3 \quad (1.4)$$

Полученное значение качественно совпадает с экспериментальным данным для плотности энергии антипротонов. Но, если учесть, что частицы косми-

ческих 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.

1.6. ДВИЖЕНИЕ ЧАСТИЦЫ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ ГАЛАКТИКИ

Моделирование движения частиц в магнитных полях Галактики необходимо для оценки реальной доли частиц из начального потока, которые будут распространяться в диск Галактики.

Моделирование магнитного поля галактики. Была составлена функциональная программа на основе уравнений из [31, 39], входными параметрами функции являются координаты в Галактике, а выходными параметрами - компоненты векторов магнитного поля в декартовой системе координат.

Следующим шагом было объединение программы, задающей топологию магнитного поля с программой построения траектории частиц по заданой топологии [42]. Первый и самый важный шаг - определить порог энергии частицы, проникающей в галактический диск.

Для этого на входе программы задавались энергетические монолинии и на каждом определялся процент частиц от общего потока, запускаемых от шарового скопления М4.

Монолинии выбирались исходя из запуска визуализации траекторий отдельных частиц (Рис. 1.3).

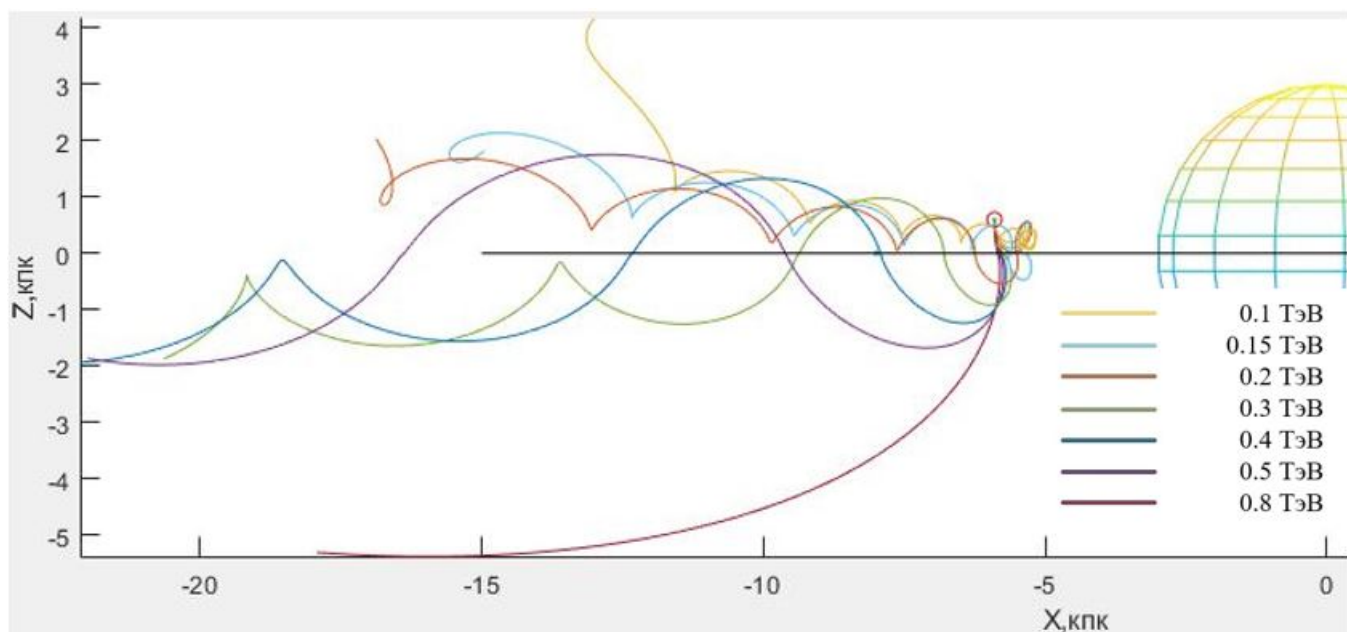


Рисунок 1.3 — Визуализация движения моноэнергетических частиц

Благодаря визуализации диапазон поиска пороговой энергии сузился до промежутка от 50 ГэВ до 50 ТэВ.

На Рис.1.4 линией, соединяющей точки с ошибками, показана доля событий, попавших в галактический диск толщиной 300 пк, в зависимости от энергии частиц.

Для энергии, соответствующей магнитному обрезанию, проведено сглаживание полученной зависимости с учётом погрешности и определены энергии, при которых сглаженные кривые пересекают уровень 0.25, т.е. ширину на полувисоте 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 антивзвёзд М4 будет в значительной степени подавлен при энергиях менее ~ 100 ГэВ.

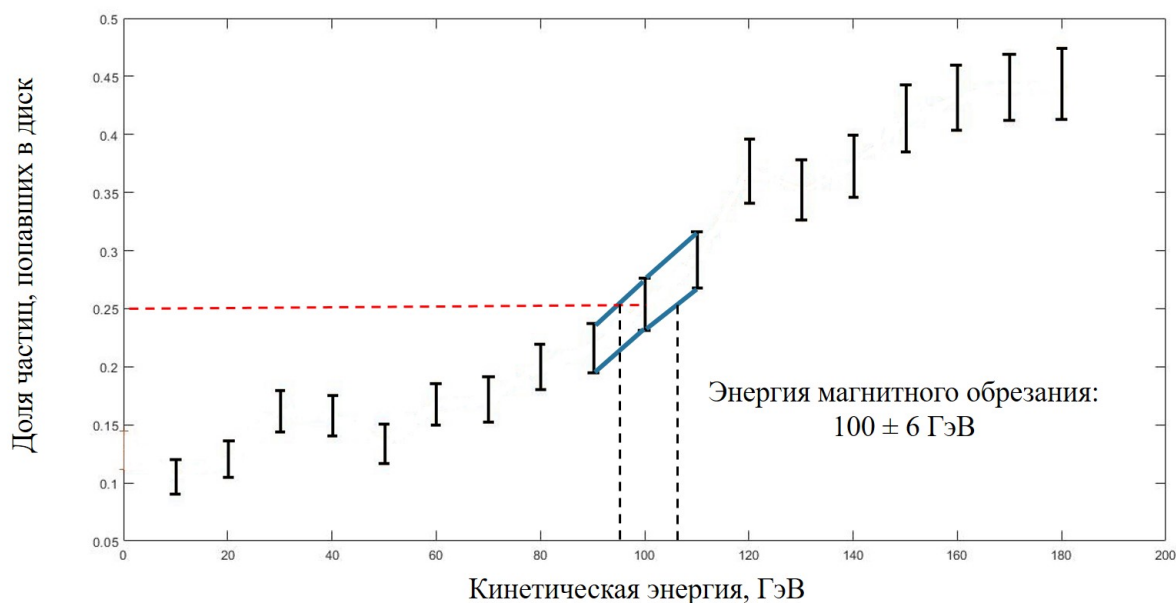


Рисунок 1.4 — Зависимость доли частиц, проникших в диск, от энергия частицы в регулярном поле Галактики

Таким образом можно отметить, что частицы с низкой энергией (порядка десятка ГэВ) не проникают в галактический диск. Активно антигелий начинает проникать в диск, начиная с энергий порядка 100 ГэВ. То есть в первом приближении можно сделать вывод, что проникновение частиц порядка нескольких ГэВ в диск маловероятно, то есть второй механизм инжекции становится менее вероятным.

Далее, используя данные работ [31, 39], была так же написана программа для мелкомасштабной компоненты МП. Были так же построены энергетические монолинии. Мелкомасштабная компонента МП внесла некоторые модификации в результирующую энергию магнитного обрезания. На иллюстрации (Рис. 1.5) заметно, что энергетический порог вырос. Но для более точной оценки необходимо так же рассчитать количество проникших в диск частиц на каждом промежутке энергии. Это предстоит сделать в дальнейшем.

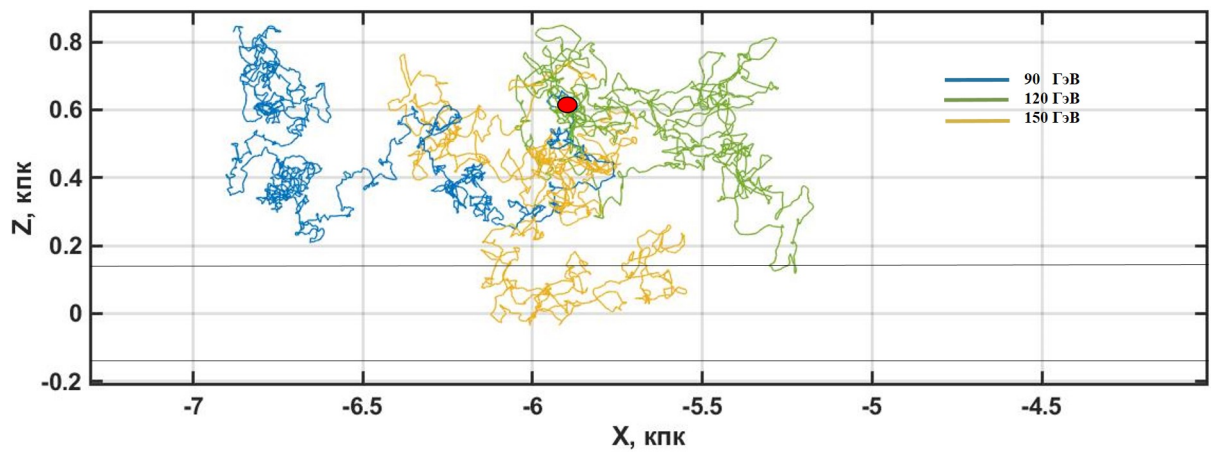


Рисунок 1.5 — Визуализация движения монолиний частиц с учетом флуктуаций поля

Далее аналогичным способом, что и рис.1.4, была оценена энергия обрезания для полного поля, уже с учетом нерегулярной компоненты 1.6.

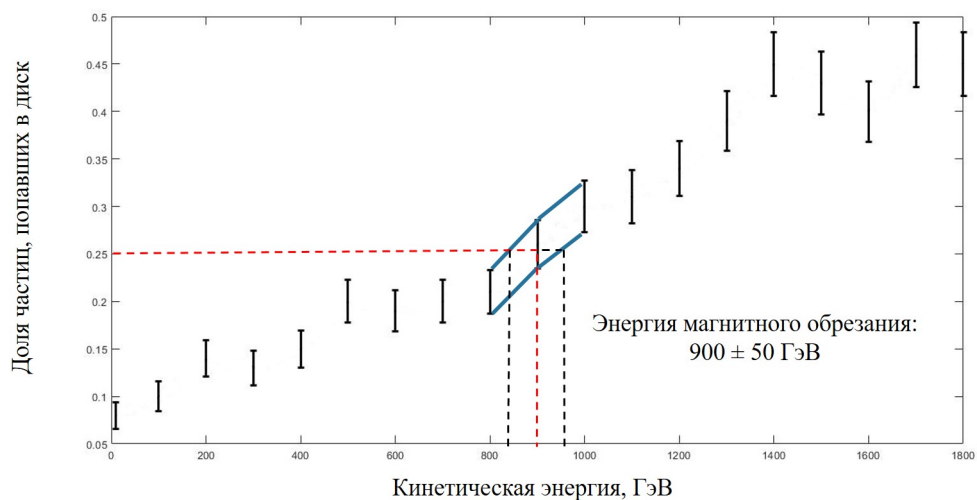


Рисунок 1.6 — Зависимость доли частиц, проникших в диск, от энергии частицы в поле Галактики с учетом нерегулярностей

С добавлением к регулярному полю нерегулярного слагаемого, энергия магнитного обрезания сильно вырос - практически на порядок, это говорит о том, что порог проникновения в диск частиц значительно вырос.


1.7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе было рассмотрено типичное шаровое скопление М4 как прототип шарового скопления антивезд. Основываясь на симметрии свойств вещества и антивещества, обсудили эволюцию этого ШС и механизмы инъекции антивещества в КЛ.

В части моделирования траектории потока частиц оценена пороговая энергия проникновения частиц в диск в регулярном и нерегулярном магнитных полях Галактики. Добавление нерегулярного слагаемого в компоненту поля увеличило порог энергии магнитного обрезания частиц. Дальнейшая работа направлена на моделирование движения бо́льшего частиц на области всей Галактики и получение более точной оценки энергии обрезания. Реализация нашей программы поможет получить прогнозы ожидаемого потока антиядер от доменов антивещества в нашей Галактике.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] P. A. M. Dirac: The quantum theory of the electron, Proc. Roy. Soc. (London) **A117**, 610—624 (1928).
- [2] M. Y. Khlopov: *Fundamentals of Cosmoparticle Physics* CISP-Springer, Cambridge, UK, 2012.
- [3] A. D. Dolgov: Matter and antimatter in the universe, Nucl. Phys. Proc. Suppl. **113**, 40 (2002).
- [4] 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).
- [5] Nicola Tomassetti, Alberto Oliva: Secondary antinuclei from supernova remnants and background for dark matter searches, 35th International Cosmic Ray Conference – ICRC2017, (2017).
- [6] 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).
- [7] V.A. Kuzmin: CP violation and baryon asymmetry of the universe, JETP Lett **12**, 228 (1970).
- [8] A.D. Sakharov: Violation of CP-invariance, C-asymmetry and baryon asymmetry of the Universe, JETP Lett **5**, 32 (1967).
- [9] 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).
- [10] 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).

- [11] A.D. Dolgov, A.F. Illarionov, N.S. Kardashev, I.D. Novikov, Cosmological model of a baryon island, JETP **67**, 1517-1524 (1988).
- [12] 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).
- [13] M. Charlton, S. Eriksson, G. M. Shore: Fundamental Physics in Antihydrogen Experiments, 97-98 (2020). 
- [14] M.Yu. Khlopov, R.V. Konoplich, R. Mignani, et al.: Evolution and observational signature of diffused antiworld., Astroparticle Phys. **12**, 367-372 (2000).
- [15] 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).
- [16] <http://gclusters.altervista.org/>
- [17] M. Paul: *Star Clusters. Encyclopedia of Astronomy and Astrophysics*, 2014.
- [18] <https://www.astro.keele.ac.uk/workx/globulars/globulars.html>
- [19] J. S. Kalirai, H. B. Richer: Star clusters as laboratories for stellar and dynamical evolution, Royal society publishing, (2009).
- [20] E.N. Parker: Cosmical magnetic fields: Their origin and their activity, Oxford, Clarendon Press; New York, Oxford University Press, (1979).
- [21] A. Boulares, D.P. Cox: Galactic Hydrostatic Equilibrium with Magnetic Tension and Cosmic-Ray Diffusion, Astrophysical Journal **365**, 544 (1990).
- [22] A. Ruzmaikin, D. Sokoloff, A. Shukurov: Magnetism of spiral galaxies, Nature **336**, 341–347 (1988).
- [23] L. Biermann: On the origin of magnetic fields on stars and in interstellar space (with an appendix by A. Schlüter), Zs. Naturforschung **5a**, 65 (1950).

- [24] R. Kulsrud: Magnetic reconnection with Sweet-Parker characteristics in two-dimensional laboratory plasmas, *Physics of Plasmas* **6**, 1743 (1999).
- [25] R. Beck: Galactic and Extragalactic Magnetic Fields. *Space Science Reviews* **99**, 243–260 (2001).
- [26] K.Ferriere: Interstellar magnetic fields in the Galactic center region, *A&A* **505**, 1183 - 1198 (2009).
- [27] J.W. Armstrong, B.J. Rickett, S.R. Spangler: Electron Density Power Spectrum in the Local Interstellar Medium, *ApJ* **443**, 209 (1995).
- [28] 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).
- [29] Haverkorn, J.C. Brown, B.M. Gaensler:The outer scale of turbulence in the magnetoionized galactic interstellar medium, *ApJ* **680**, 362 (2008).
- [30] J.L. Han, G.J. Qiao:On Galactic magnetic field derived from RMs of pulsars., *A&A* **288**, 759 (1994).
- [31] R. Jansson and G. R. Farrar: A New Model of the Galactic Magnetic Field, *ApJ* **757**, 14 (2012).
- [32] 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).
- [33] R. Beck, A. Brandenburg, D. Moss, A. Shukurov, and D. Sokoloff: Galactic Magnetism: Recent Developments and Perspectives, *ARA& A* **34**, 155–206 (1996).
- [34] 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).
- [35] 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).

- [36] L. Page, G. Hinshaw: Three-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Polarization Analysis, *ApJS* **170**, 335–376 (2007).
- [37] M.-A. Miville-Deschenes, N. Ysard: Separation of anomalous and synchrotron emissions using WMAP polarization data, *A&A* **490**, 1093–1102 (2008)
- [38] T. R. Jaffe, J. P. Leahy: Modelling the Galactic magnetic field on the plane in two dimensions, *MNRAS* **401**, 1013–1028 (2010).
- [39] 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).
- [40] D. C. Heggie and M. Giersz: Modelling individual globular clusters, *Cambridge University Press Access S246*, **3**, 121-130 (2007).
- [41] 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).
- [42] 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).
- [43] M. Opher, F. Alouani Bibi: A strong, highly-tilted interstellar magnetic field near the Solar System, *Nature*, **462**, 1036–1038 (2009).