

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
О научно-исследовательской работе
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	Модель магнитного поля Галактики J12	5
1.4	Постановка задачи	6
2	Результаты	8
2.1	Расчет плотности энергии античастиц в космических лучах .	8
2.2	Движение частицы в магнитном поле Галактики	10
2.3	Заключение	14
	Список литературы	15

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].

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

1. Первичное антиматерию, сохранившееся с момента зарождения Вселенной [2, 3], и сейчас, по предположению, может существовать в виде шаровых скоплений антизвезд [4].
2. Вторичное антиматерию, как результат столкновения ядерной компоненты космических лучей с межзвездным газом или с остатком оболочки сверхновой [5].
3. Антиматерию 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 антиматерии [3]. В данной работе рассматривается возможность существования шарового скопления антиматерии, который будет являться 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 мета-галактики.

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.

Шаровые скопления антизвезд могли образоваться во время формирования Галактики и сохраниться в ее гало к настоящему времени. Потоки космических антиядер - это основополагающий признак 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 [15].

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 звездообразующих 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 [16].

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 [17]-[18].

1.3. МОДЕЛЬ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ГАЛАКТИКИ J12

Магнитные поля, безусловно, являются одним из ключевых компонентов межзвездной среды. Крупномасштабные магнитные поля способствуют гидростатическому равновесию и стабильности межзвездной среды и даже динамике диска. Магнитные поля в молекулярных облаках, тесно связанные с галактическими полями, играют важную роль в процессе звездообразования. Более важно то, что магнитные поля нашей Галактики являются основным фактором переноса заряженных космических лучей. Невозможно понять происхождение и распространение космических лучей без адекватного знания магнитных полей Галактики [19].

Из радионаблюдений [20] мы можем ограничить галактическое магнитное поле (ГМП) и физические процессы, ответственные за его создание. Галактическое магнитное поле обычно разбивается на несколько мелких и крупных полей. Кроме того, считается, что мелкомасштабные флуктуации изменяют распространение космических лучей сверхвысоких энергий и будут играть важную роль в их анализе [21].

Для этого также требуется детальное знание структуры мелкомасштабного поля. До недавнего времени большинство исследований было сосредоточено на моделировании крупномасштабного ГМП [?]. В последнее время больше внимания уделяется мелкомасштабной компоненте поля: [23, 24].

Мы основываем наше исследование на модели ГМП J12 [25]. Их модель содержит отдельные компоненты для картин магнитного поля внутри

спирального диска, тороидального поля гало и X-образного полоидально-го 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 достигнуто построение тракторий частиц в магнитных полях Галактики.

1.4. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

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 [26]

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

Тогда рассмотрим три возможных механизма инжекции 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 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 ГэВ) и сформируют антиядерную составляющую космических лучей. Известно, что внутри диска могут генерироваться частицы с энергией \sim ГэВ, но вопрос о распространении таких частиц из гало в диск в настоящее время остается открытым. В этой статье этот механизм проникновения будет протестирован путем моделирования движения частиц в магнитных полях гало, диска и солнечной модуляции.

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.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ

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.

2.1. РАСЧЕТ ПЛОТНОСТИ ЭНЕРГИИ АНТИЧАСТИЦ В КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧАХ

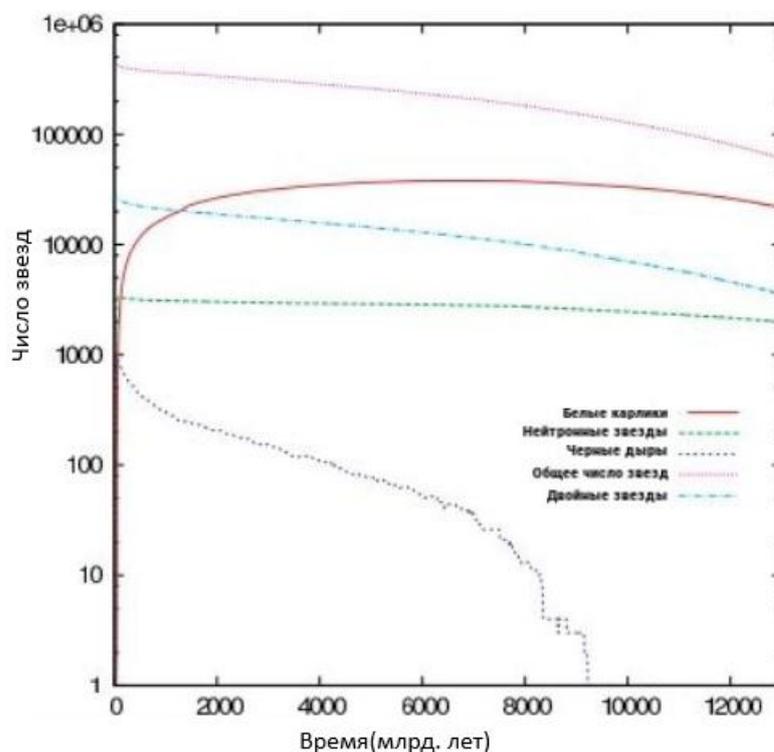


Рисунок 2.1 — Изменение населения М4 во времени

На рисунке (2.1) представлен график эволюции населения скопления М4[27]. 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

$$\rho_{CR} = \frac{E_{sn}\dot{N}_{sn}t_{ret}}{V} \quad (2.1)$$

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

Представим все численные значения этих величин в виде таблицы(2.1):

Таблица 2.1 — 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:

$$\rho_{CR} = 10^{-4} \text{ЭВ}/\text{см}^3 \quad (2.2)$$

Для сравнения приведем значение плотности энергии космических лучей обычного вещества:

$$\rho = 1 \text{ЭВ}/\text{см}^3 \quad (2.3)$$

Так же приведем плотность энергии для вторичных антипротонов

$$\rho_{\bar{p}} = 10^{-5} \text{эВ/см}^3 \quad (2.4)$$

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.

2.2. 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 [25], 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. 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. 2.2).

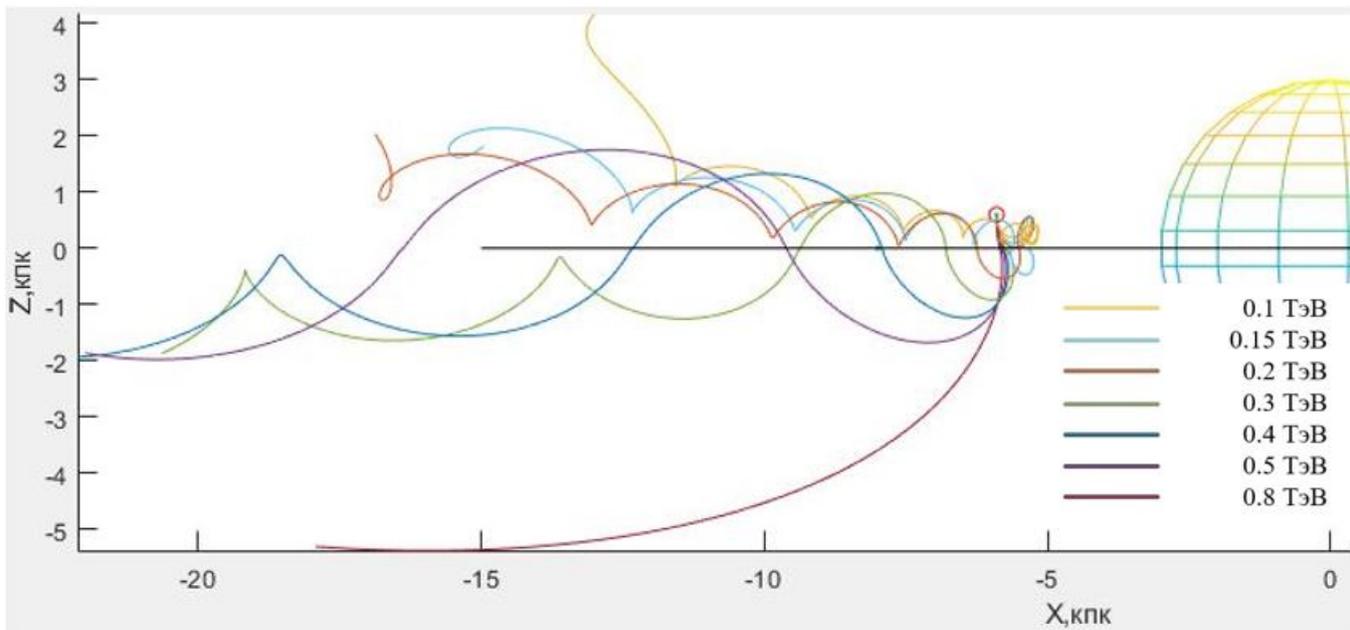


Рисунок 2.2 — Визуализация движения моноэнергетических частиц

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

На Рис.2.3 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 стремится 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.

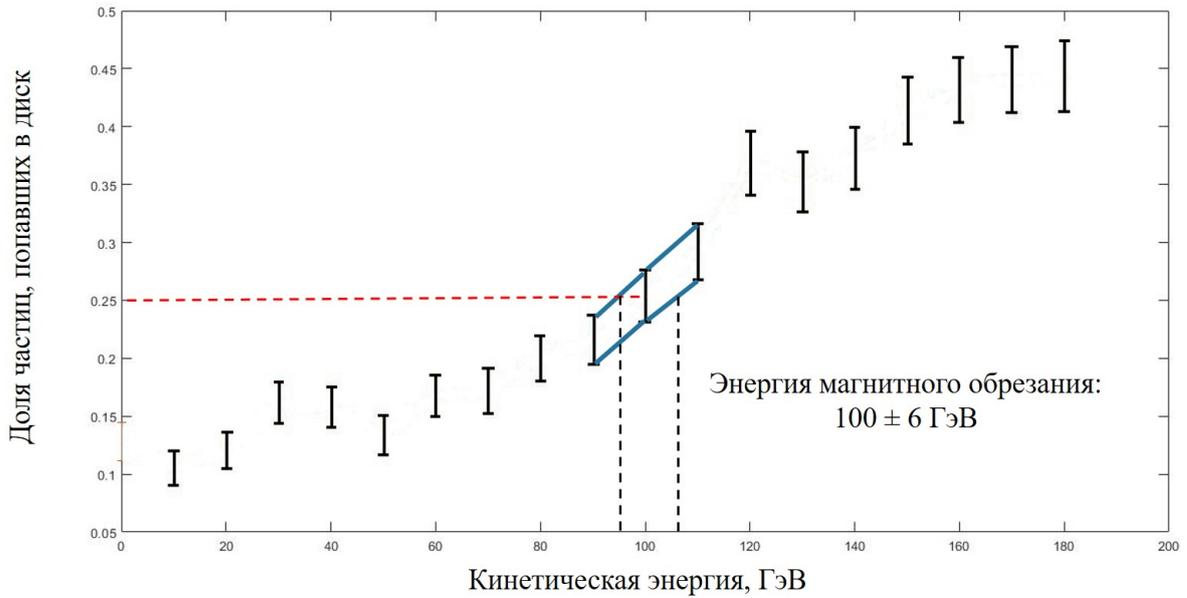


Рисунок 2.3 — Зависимость доли частиц, проникших в диск, от энергия частицы

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 [25, 28], была так же написана программа для мелкомасштабной компоненты МП. Были так же построены энергетические мононии. Мелкомасштабная компонента МП внесла некоторые модификации в результирующую энергию магнитного обрезания. На иллюстрации (Рис. 2.4) 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.

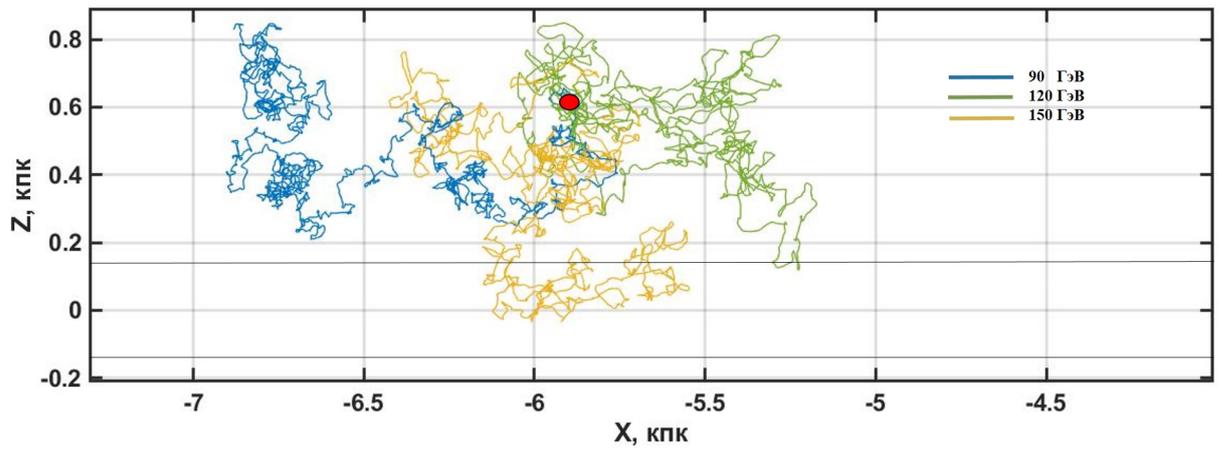


Рисунок 2.4 — Визуализация движения монолинейных частиц с учетом флуктуаций поля

2.3. 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. Расчитана плотность энергии высокоэнергетических античастиц, выброшенных ШС антивещества в космических лучах. Полученное значение с учетом неопределенностей диффузии антипротонов качественно соответствует данным наблюдений.

Так же в части моделирования траектории потока частиц оценена пороговая энергия проникновения частиц в диск на крупномасштабном магнитном поле. Была произведена визуализация траекторий частиц с учетом флуктуаций магнитного поля Галактики. Уже на иллюстрации замечено, что такая модификация увеличила порог энергии магнитного обрезания частиц. Таким образом, дальнейшая работа направлена на получение более точной оценки энергии обрезания в пределах статистической погрешности с учетом нерегулярного магнитного поля Галактики. 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] <http://gclusters.altervista.org/>
- [16] M. Paul: *Star Clusters. Encyclopedia of Astronomy and Astrophysics*, 2014.
- [17] <https://www.astro.keele.ac.uk/workx/globulars/globulars.html>
- [18] J. S. Kalirai, H. B. Richer: Star clusters as laboratories for stellar and dynamical evolution, Royal society publishing, (2009).
- [19] A. Boulares, D.P. Cox: Galactic Hydrostatic Equilibrium with Magnetic Tension and Cosmic-Ray Diffusion, *Astrophysical Journal* **365**, 544 (1990).
- [20] R. Beck, A. Brandenburg, D. Moss, A. Shukurov, and D. Sokoloff: Galactic Magnetism: Recent Developments and Perspectives, *ARA& A* **34**, 155–206 (1996).
- [21] 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).
- [22] L. Page, G. Hinshaw: Three-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Polarization Analysis, *ApJS* **170**, 335–376 (2007).
- [23] M.-A. Miville-Deschenes, N. Ysard: Separation of anomalous and synchrotron emissions using WMAP polarization data, *A& A* **490**, 1093–1102 (2008)

- [24] T. R. Jaffe, J. P. Leahy: Modelling the Galactic magnetic field on the plane in two dimensions, *MNRAS* **401**, 1013–1028 (2010).
- [25] R. Jansson and G. R. Farrar: A New Model of the Galactic Magnetic Field, *ApJ* **757**, 14 (2012).
- [26] D. C. Heggie and M. Giersz: Modelling individual globular clusters, Cambridge University Press Access S246,**3**, 121-130 (2007).
- [27] 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).
- [28] 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).
- [29] M. Opher, F. Alouani Bibi: A strong, highly-tilted interstellar magnetic field near the Solar System, *Nature*, **462**, 1036–1038 (2009).