

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 539.1.05, 524.1-52

**ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА  
К БАКАЛАВРСКОЙ ДИПЛОМНОЙ РАБОТЕ  
«ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЁТ РАСПРОСТРАНЕНИЯ АНТИЯДЕР В  
МЕЖЗВЁЗДНОМ ПРОСТРАНСТВЕ»**

Студент

 А. В. Кравцова

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 БАКАЛАВРА  
ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЁТ РАСПРОСТРАНЕНИЯ АНТИЯДЕР В  
МЕЖЗВЁЗДНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Студент

 А. В. Кравцова

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

 М. Ю. Хлопов

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

 А. Г. Майоров

Рецензент,  
д.ф.-м.н., проф.

 В. В. Михайлов

Секретарь ГЭК,  
к.ф.-м.н.

\_\_\_\_\_ А. А. Кириллов

Зав. каф. №40,  
д.ф.-м.н., проф.

\_\_\_\_\_ М. Д. Скорохватов

# СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
<b>1 Античастицы в галактических космических лучах</b>	<b>6</b>
1.1 Шаровые скопления в гало Галактики . . . . .	6
1.2 Свойства межзвёздной среды . . . . .	8
1.3 Античастицы вторичного происхождения и их эксперименталь- ный поиск . . . . .	14
<b>2 Расчёт траекторий заряженных частиц в электромагнитных полях</b>	<b>17</b>
<b>3 Результаты и их анализ</b>	<b>20</b>
Список литературы	24

# ВВЕДЕНИЕ

Ядро антигелия  $\overline{He^4}$ , состоящее из двух антипротонов  $\bar{p}$  и двух антинейтронов  $\bar{n}$ , впервые наблюдалось в 2011 году коллаборацией STAR [1] — всего зарегистрировано 18 ядер  $\overline{He^4}$  в  $10^9$  столкновениях  $Au + Au$  при энергиях центра масс 200 ГэВ и 62 ГэВ на нуклон-нуклонную пару.

Благодаря экспериментальному обнаружению антиядер были развиты теоретические модели, которые предполагают наличие антивещества во Вселенной и, в частности, в нашей Галактике [2]. Следуя этим теориям, космическую антиматерию разделяют на три группы:

1. Первичное антивещество. В статье [3] рассмотрены различные сценарии бариосинтеза. По данной теории первичное антивещество зародилось в ранней Вселенной вследствие неоднородного бариосинтеза [4], эволюционировало в доменах антиматерии и сейчас присутствует в виде макроскопических объектов антивещества [5]. Многие модели предполагают существование антиматерии, и в некоторых из них может быть образован не только антигелий, но и более тяжелые антиядра.
2. Вторичное антивещество. Оно образуется в результате столкновения высокоэнергетичной ядерной составляющей космических лучей (КЛ) с межзвездным веществом [6] или с остатком оболочки сверхновой [7].
3. Антивещество от гипотетических источников — испарение первичных чёрных дыр или распад/аннигиляция предполагаемых частиц скрытой массы [8].

В работе рассматривается проявление теоретически существующих макроскопических областей с избытком антибарионов в нашей Вселенной, появляющихся как возможное следствие некоторых моделей бариосинтеза. Диффузия вещества и антивещества к границе доменов антиматерии определяет минимальный масштаб сохранившихся до настоящего времени доменных

структур. В работе [9] рассмотрена модель диффузного антимира, в которой плотность внутри уцелевших доменов антивещества слишком мала для образования гравитационно связанных объектов. Антизвезда сможет образоваться только в окружении антиматерии масштаба по крайней мере шарового скопления [10], иначе окружающее барионное вещество проаннигилирует с антивеществом звезды. Большой размер доменов ограничен наблюдаемыми потоками гамма-излучения. В статье [11] также исследуется возможность существования бариоплотных звезд (BD) и антизвезд, которые могли быть созданы в очень ранней Вселенной по сценарию бариосинтеза Аффлека-Дайна, и показывается, что такие антизвёзды могут присутствовать в большом количестве в Галактике.

Сегодня первичное антивещество могло бы существовать в гало Галактики в виде доменов антиматерии, приняв форму шаровых скоплений антизвезд. В диске Галактики это было бы невозможно, так как, если мы рассмотрим  $p$  и  $\bar{p}$ , то увидим большое сечение их аннигиляции: оно обратно пропорционально характерной скорости аннигиляции и будет достигать порядка  $10^{11}$  см<sup>3</sup>/с [9]. В случае антиатомов эта цифра становится больше на несколько порядков. Проверить существование доменов возможно с помощью прецизионных экспериментов по поиску антивещества в потоках галактических космических лучей, таких как AMS-02 [12], PAMELA [13] и BESS [14], поскольку в случае регистрации антиядер этими экспериментами, можно с уверенностью сказать, что это будет именно первичное антивещество (см. ниже: раздел 1.3, рис. 1.7 и 1.8)

# 1. АНТИЧАСТИЦЫ В ГАЛАКТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧАХ

## 1.1. ШАРОВЫЕ СКОПЛЕНИЯ В ГАЛО ГАЛАКТИКИ

Шаровое звёздное скопление – большое и плотное сферически-симметричное скопление звёзд, вращающихся вокруг галактического центра [15]. Гравитация придаёт таким скоплениям сферическую форму и относительно высокую плотность звезд.

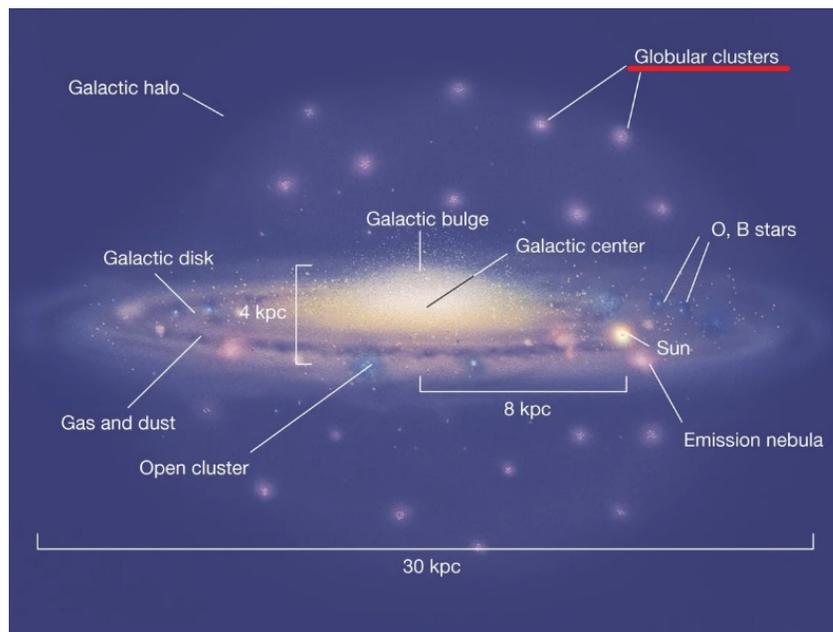


Рисунок 1.1 — Шаровые скопления звёзд в гало Галактики

Шаровые скопления (ШС) вращаются в звёздных гало, окружающих большинство галактик (рис. 1.1), и содержат одни из самых старых звезд. В ШС больше звёзд, чем в менее плотных открытых скоплениях, обнаруженных в галактическом диске, причём у звёзд в ШС низкая доля металлов (элементов помимо водорода и гелия), по сравнению, например, с Солнцем. В настоящее время в Млечном Пути известно около 150 звёздных скоплений этой категории [16], ни одно из которых не показывает активного звездообра-

зования. Они свободны от газа и пыли, и предполагается, что весь газ и пыль давно были либо превращены в звёзды, либо были выброшены из скопления во время первоначальной вспышки звездообразования. Это согласуется с мнением о том, что ШС являются древнейшими объектами в Галактике и были одними из первых сформировавшихся скоплений звёзд.

Согласно [17], объекты, состоящие из первичного антивещества, могут присутствовать в Галактике в виде шаровых скоплений звёзд из антиматерии. В космологии теории великого объединения возрождается старая проблема существования антиматерии во Вселенной, и в обзоре [5] эта проблема рассматривается в рамках моделей барионной асимметрии, которая обычно основывается на утверждении, что вокруг нас не существует макроскопического количества антиматерии в масштабах местного сверхскопления галактик. Это утверждение подтверждается отрицательными результатами прямых поисков антиматерии в окрестностях Земной орбиты и лимитированием на аннигиляцию материи и антиматерии. Исключение равных количеств вещества и антивещества вокруг нас достигаются за счёт наблюдаемого на орбите Земли фона гамма-излучения и анализа влияния аннигиляции в ранней Вселенной на спектр реликтового излучения и на обилие легких элементов, но это не исключает возможности существования макроскопического количества антиматерии. Антисвезда не может образоваться в окружении вещества, так как образование антисвезды предполагает развитие тепловой неустойчивости, во время которой холодные облака антивещества сжимаются горячим газом. А давление горячего газа материи на облако антиматерии сопровождается аннигиляцией. Таким образом, антисвёзды могут образоваться только в окружении антиматерии масштаба по крайней мере шарового скопления [10]. На основе предполагаемого сходства свойств ШС из вещества со свойствами ШС из антивещества рассматриваются возможности проверки гипотезы существования последних в поисках антигелия в КЛ. Наш подход направлен на уточнение предсказаний этой гипотезы с учетом реалистичного описания образования и распространения космических потоков антигелия в Галактике.

## 1.2. СВОЙСТВА МЕЖЗВЁЗДНОЙ СРЕДЫ

Потоки антиядер в галактических космических лучах (ГКЛ) до сих пор не вычислены, и в настоящее время предпринимаются попытки численно их определить. Для этого необходимо знать расположение и мощности источников, структуру и размеры Галактики, свойства межзвездного вещества и Земное местоположение. Распространение ГКЛ в основном определяется структурой магнитных полей. Силовые линии регулярного поля приблизительно идут вдоль спиральных рукавов в галактической плоскости. Структура магнитного поля в гало Галактики известна не так точно.

В статье [18] описывается набор программ GALPROP для расчета распространения космических лучей в межзвёздном пространстве. Считается, что высокоэнергетические столкновения ядер космических лучей с межзвёздным газом является механизмом образования большинства антипротонов. Однако точный расчет вторичного потока антипротонов создает "фон" для поиска экзотических сигналов от аннигиляции суперсимметричных частиц и испарения первичных чёрных дыр. Источники частиц определенной мощности в различных частях Галактики можно задавать с помощью кода GALPROP. Он работает благодаря численному решению диффузионного уравнения с учетом детального описания распределений галактического магнитного поля и межзвездного вещества. Используемый в нашей работе подход отличается от работы пакета программ GALPROP, и вместо решения уравнения переноса выполняется трассировка отдельных частиц в межзвёздном пространстве.

В результате ядерных реакций с межзвёздной средой доля различных компонент КЛ, образованных и ускоренных на ударных волнах после вспышек сверхновых, при распространении в межзвёздном веществе меняется. Помимо этого, рождаются первоначально отсутствующие в источниках вторичные частицы или античастицы, например, антигелий, антидейтроны, антипротоны или позитроны. Чтобы учитывать такое влияние среды на движение частиц в Галактике, в нашем программном пакете необходимо использовать функцию распределения плотности вещества. Для её построения была взята аналитическая модель распределения межзвёздного вещества в Галактике

[18]. Распределения этой модели можно увидеть на рис. 1.2 ( $R = 0$  — центр Галактики).

Входными параметрами программы являются координаты в Галактике, а выходными — суммарная концентрация ионизованного, атомарного и молекулярного водорода в галактической системе координат.

Концентрация молекулярного водорода  $H_2$  в молекулах на  $\text{см}^{-3}$  в цилиндрической системе координат с началом отсчета в Галактическом центре:

$$n_{H_2}(R, z) = 3.34 \times 10^{-22} X_{CO} \epsilon_0(R) e^{-\ln^2(z-z_0)^2/z_h^2} \quad (1.1)$$

Здесь  $\epsilon_0(R)$  ( $\text{К км сек}^{-1}$ ) — объёмная светимость молекул CO,  $z_0(R)$  и  $z_h(R)$  — характерная шкала высоты и ширина распределения как функции расстояния от центра Галактики  $R$  (см. табл. 1.3а), и  $X_{CO} = N_{H_2}/W_{CO} = 1.9 \times 10^{20}$  молекул  $\text{см}^{-2} \text{К}^{-1} \text{км}^{-1} \text{сек}$  — фактор конверсии интенсивности излучения CO вдоль луча зрения в количество молекул молекулярного водорода [19].

Относительное распределение атомарного водорода  $H_I$ ,  $\text{см}^{-3}$ :

$$n_{H_I}(R, z) = \frac{1}{n_{GB}} Y(R) \begin{cases} \sum_{i=1,2} A_i e^{-\ln^2 z^2/z_i^2} + A_3 e^{-|z|/z_3}, & R \leq 8 \text{ кпк} \\ n_{DL} \exp(-z^2 e^{-0.22R}/z_4^2), & R \geq 10 \text{ кпк} \end{cases} \quad (1.2)$$

Здесь  $Y(R)$  — распределение из таблицы 1.3б ( $R < 16$  кпк),  $n_{GB} = 0.33 \text{ см}^{-3}$  и  $n_{DL} = 0.57 \text{ см}^{-3}$  — концентрации атомов  $H_I$  в диске на расстоянии  $4 < R < 8$  кпк. Распределение по  $z$  интерполируется между 8 и 10 кпк. Величины  $A_1 = 0.395$ ,  $A_2 = 0.107$ ,  $A_3 = 0.064$ ,  $z_1 = 0.106$ ,  $z_2 = 0.265$ ,  $z_3 = 0.403$ ,  $z_4 = 0.0523$ . Для  $R > 16$  кпк используется экспоненциальное затухание.

Распределение ионизованного водорода  $H_{II}$ , см:

$$n_{H_{II}}(R, z) = \sum_{i=1,2} n_i e^{-|z|/h_i} - (R - R_i)^2/a_i^2 \quad (1.3)$$

Здесь  $n_1 = 0.025$ ,  $n_2 = 0.200$ ,  $h_1 = 1$  кпк,  $h_2 = 0.15$  кпк,  $R_1 = 0$ ,  $R_2 = 4$  кпк,  $a_1 = 20$  кпк,  $a_2 = 2$  кпк.

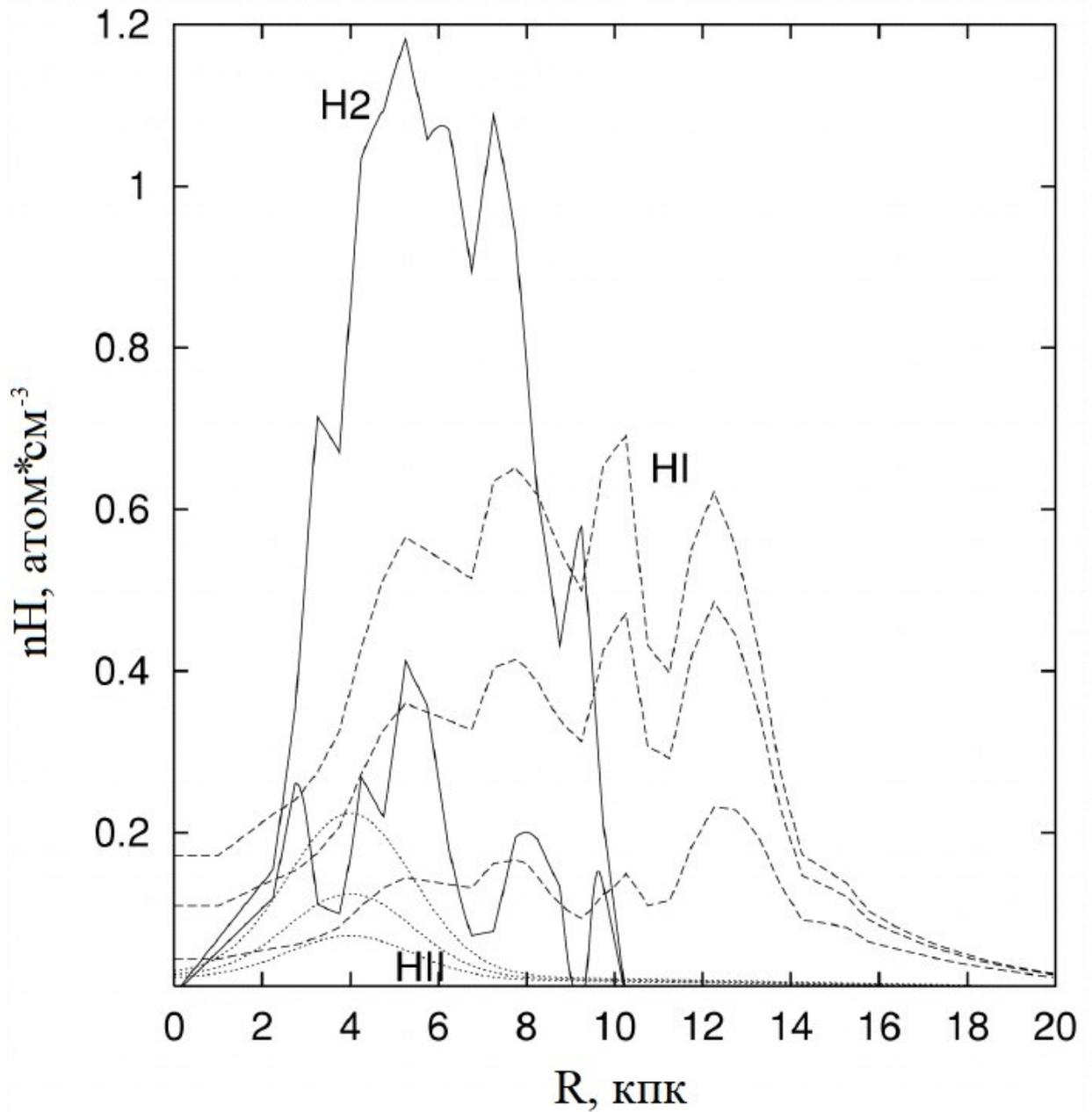


Рисунок 1.2 — Концентрации атомов молекулярного водорода  $H_2$  ( $2 \times n_{H_2}$ , сплошные линии), атомарного  $H_I$  (пунктир) и ионизованного  $H_{II}$  (точечные линии) газа в Галактике [18]. Линии показаны для расстояний  $z = 0, 0.1, 0.2$  кпк от Галактической плоскости (с увеличением  $z$  концентрация уменьшается). На расстоянии  $z = 0.2$  кпк концентрация молекулярного водорода очень мала и поэтому не показана.

$R$ (кпк)	$\epsilon_0(R)$ ( <sup>a</sup> )	$z_0(R)$ (пк)	$z_h(R)$ (пк)	$R$ (кпк)	$\epsilon_0(R)$ ( <sup>a</sup> )	$z_0(R)$ (пк)	$z_h(R)$ (пк)	$R$ (кпк)	$n_{\text{H}}$ ( $\text{см}^{-3}$ )
0.00	43.7	0	70	5.25	$9.6 \pm 0.6$	$-1 \pm 4$	$82 \pm 4$	2.0–2.5...	0.13
0.10	24.5	0	70	5.75	$8.6 \pm 0.4$	$-4 \pm 3$	$83 \pm 4$	2.5–3.0...	0.14
0.20	10.7	0	70	6.25	$9.1 \pm 0.5$	$-19 \pm 3$	$73 \pm 3$	3.0–3.5...	0.16
0.30	1.6	0	70	6.75	$7.9 \pm 0.4$	$-22 \pm 3$	$63 \pm 4$	3.5–4.0...	0.19
0.40	1.4	0	70	7.25	$9.2 \pm 0.5$	$-14 \pm 3$	$58 \pm 4$	4.0–4.5...	0.25
0.50	1.5	0	70	7.75	$7.7 \pm 0.5$	$-9 \pm 5$	$72 \pm 7$	4.5–5.0...	0.30
0.60	1.1	0	70	8.25	$5.0 \pm 0.3$	$-4 \pm 5$	$80 \pm 9$	5.0–5.5...	0.33
0.70	0.9	0	70	8.75	$3.6 \pm 0.6$	$13 \pm 6$	$66 \pm 10$	5.5–6.0...	0.32
0.80	0.8	0	70	9.25	$4.8 \pm 0.6$	$-4 \pm 3$	$23 \pm 5$	6.0–6.5...	0.31
0.90	0.7	0	70	9.75	$1.7 \pm 0.5$	$-20 \pm 77$	$147 \pm 139$	6.5–7.0...	0.30
1.00	0.6	0	70	10.0	0.4	0	111	7.0–7.5...	0.37
1.10	0.5	0	70	11.0	1.2	0	136	7.5–8.0...	0.38
1.20	0.4	0	70	12.0	1.0	0	147	8.0–8.5...	0.36
1.30	0.3	0	70	13.0	0.7	0	160	8.5–9.0...	0.32
1.40	0.2	0	70	14.0	0.3	0	223	9.0–9.5...	0.29
1.50	0.1	0	70	15.0	0.15	0	257	9.5–10.0...	0.38
2.25	$1.5 \pm 0.4$	$39 \pm 26$	$77 \pm 30$	16.0	0.09	0	220	10.0–10.5...	0.40
2.75	$3.3 \pm 0.5$	$36 \pm 9$	$80 \pm 10$	17.0	0.07	0	200	10.5–11.0...	0.25
3.25	$5.8 \pm 0.5$	$0 \pm 4$	$61 \pm 4$	18.0	0.05	0	188	11.0–11.5...	0.23
3.75	$5.5 \pm 0.5$	$-8 \pm 4$	$65 \pm 5$	19.0	0.005	0	200	11.5–12.0...	0.32
4.25	$8.4 \pm 0.5$	$1 \pm 3$	$71 \pm 3$	20.0	0.008	0	200	12.0–12.5...	0.36
4.75	$9.0 \pm 0.8$	$-10 \pm 5$	$72 \pm 5$	21.0	0.004	0	200	12.5–13.0...	0.32
								13.0–13.5...	0.25
								13.5–14.0...	0.16
								14.0–14.5...	0.10
								14.5–15.0...	0.09
								15.0–15.5...	0.08
								15.5–16.0...	0.06

<sup>a</sup> $\epsilon_0(R)$  дано в единицах  $\text{К км сек}^{-1} \text{кпк}^{-1}$ .

(а) Табл.1: Параметры распределения молекулярного водорода

(б) Табл.2: Радиальное распределение объёмной плотности

Распределения различных компонент газа, полученные с помощью составленной функции для плоскости  $z = 0.1$  кпк изображены на рис. 1.4 – 1.6. На основе полученных графиков можно сделать вывод, что составленная программа работает верно, так как распределение концентрации совпадает с данными [18].

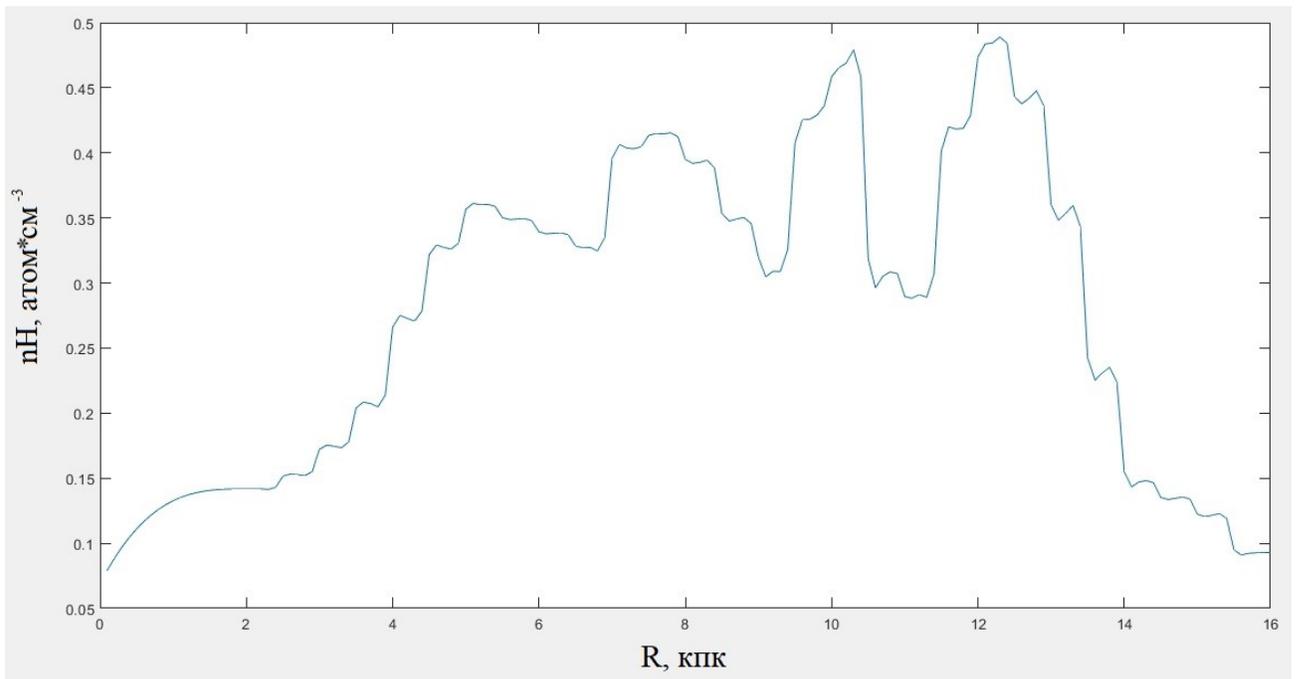


Рисунок 1.4 — Концентрация атомов атомарного водорода для высоты над плоскостью галактического диска  $z = 0.1$  кпк

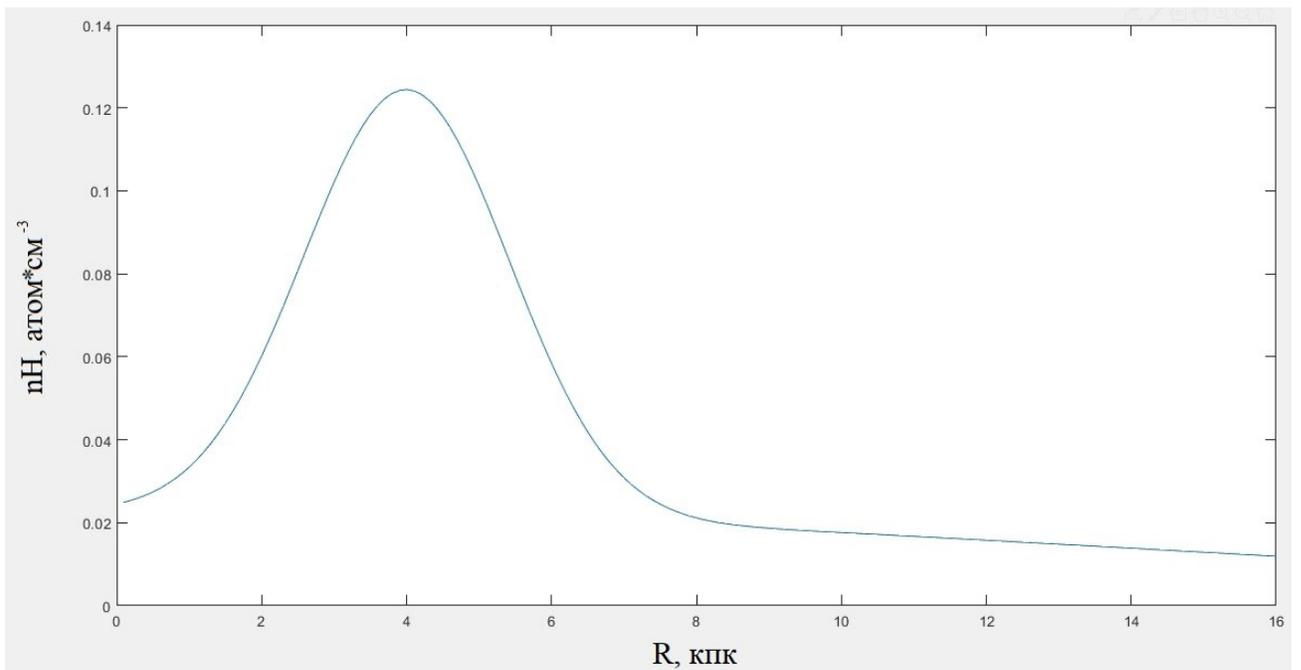


Рисунок 1.5 — Концентрация атомов ионизованного водорода для высоты над плоскостью галактического диска  $z = 0.1$  кпк

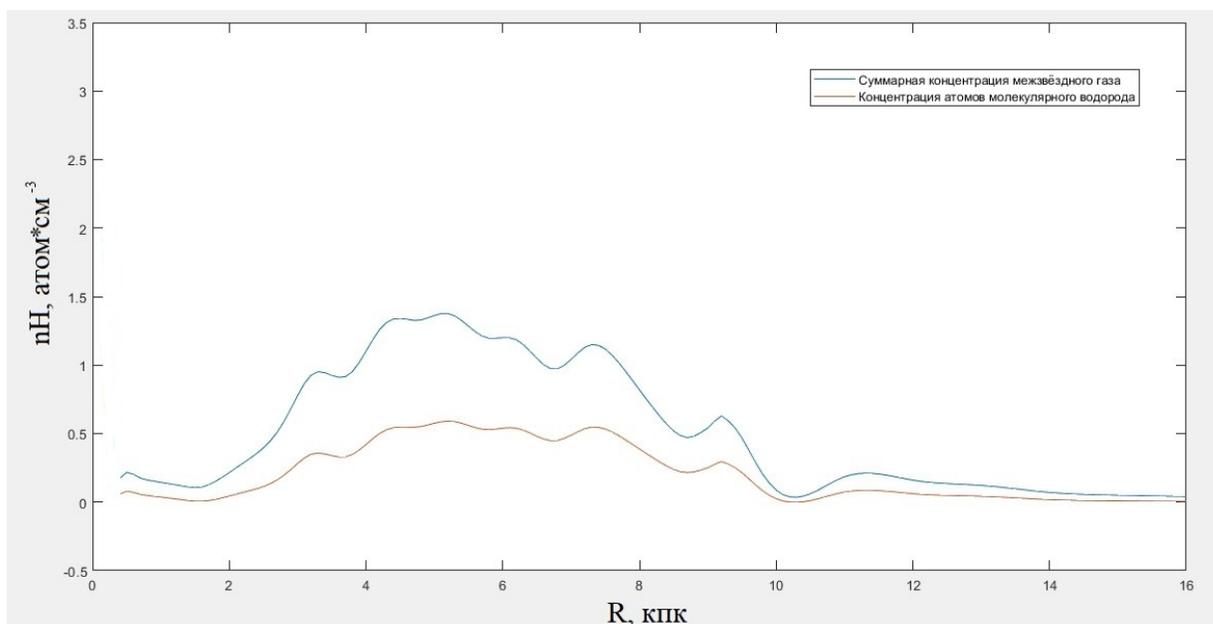


Рисунок 1.6 — Концентрация атомов молекулярного водорода (красный); суммарная концентрация межзвёздного газа (синий) для высоты над плоскостью галактического диска  $z = 0.1$  кпк

Анализируя графики, можно заметить, что ионизованный и молекулярный водород в основном концентрируются ближе к центру Галактики (но не в самом центре), а атомарный водород распределяется по всей Галактике (кроме центра). Это объясняется тем, что  $H_{II}$  образуется в скоплении звёзд, создающих ионизирующее излучение. Из самого центра Галактики вещество "выдувается" активными процессами, либо перерабатывается в образующихся звёздах, поэтому там ионизованного водорода меньше. Молекулярный водород образуется там, где есть микрочастицы для его образования и меньший уровень излучения. Это области, где звёзды проэволюционировали, взорвались, а новые рождаются не так быстро. Наконец, атомарный водород может быть везде, кроме центра, в том числе и на периферии, где нет звёзд и излучений.

### 1.3. АНТИЧАСТИЦЫ ВТОРИЧНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ И ИХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ ПОИСК

Одним из важнейших вопросов космологии является объяснение наблюдаемой барионной асимметрии, т. е. практически полного отсутствия антивещества в видимой части Вселенной. С помощью измерения потоков антиядер с  $|Z| \geq 2$  можно оценить реальную величину асимметрии в первичных КЛ около Солнечной системы. В настоящее время на Международной космической станции проводится эксперимент AMS-02 [20] по изучению характеристик КЛ. Одна из его задач — поиск антиядер тяжелее антипротона, включая антигелий. Его регистрация указала бы на существование дополнительного источника первичного антивещества, поскольку значение теоретического расчёта спектра для вторичного антигелия мало и не превосходит  $= 10^{-16} - 10^{-12}$  (см. рис. 1.7). Чувствительность AMS-02 значительно выше данной величины, что позволяет надеяться на обнаружение в этом эксперименте первичных антиядер, сохранившихся с момента Большого взрыва [22].

В работе [23] произведён поиск антигелия по данным экспериментов PAMELA 2006-2009 гг. в диапазоне от 0.6 до 600 ГВ (событий с зарядом  $-2$  не обнаружено). PAMELA — космический эксперимент, позволяющий изучить с высокой точностью космические лучи галактической и солнечной природы в широком диапазоне энергий [13]. Основная цель — исследование антипротонов, позитронов и поиск антивещества. PAMELA впервые обнаружила антипротонный радиационный пояс вокруг Земли. В статье [23] также приводится верхний интегральный предел отношения потоков  $\overline{He}/He = 4.7 \cdot 10^{-7}$  (см. рис. 1.8).

На рисунке 1.8 также указан предел отношения антигелия к гелию, полученный в эксперименте BESS [14], целями которого являлись точные измерения спектра низкоэнергетических антипротонов и поиск антиматерии с  $|Z| \geq 2$  в космических лучах. В ходе двух длительных полетов на воздушном шаре над Антарктидой совместная программа Balloon-borne Experiment with a Superconducting Spectrometer (BESS) провела поиск  $\overline{He}$  в космическом из-

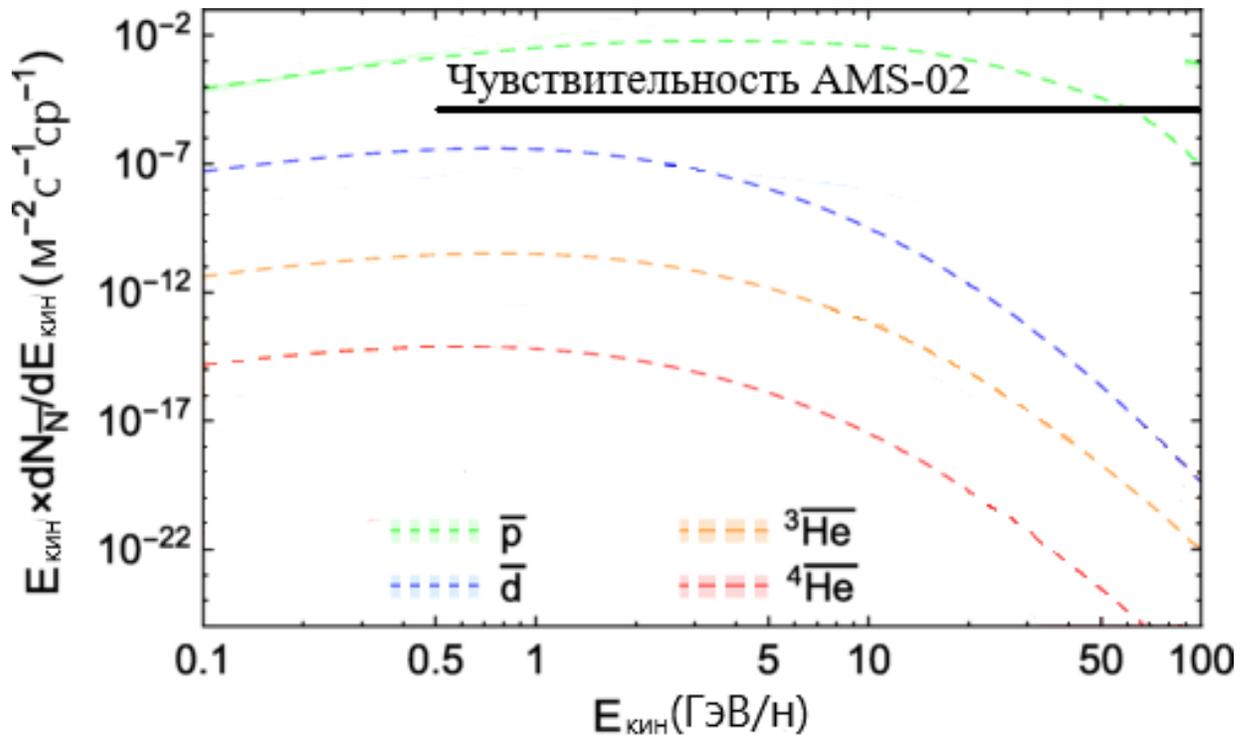


Рисунок 1.7 — Теоретический спектр космических лучей  $\bar{p}$  (зеленый),  $\bar{d}$  (синий),  $\overline{{}^3\text{He}}$  (оранжевый) и  $\overline{{}^4\text{He}}$  (красный), предсказанный на основе модели аннигиляционной темной материи [21]

лучении. BESS-Polar I совершил полет в 2004 году (наблюдения — 8,5 дней). BESS-Polar II совершил полет в 2007-2008 годах (24,5 дней). Ни одного кандидата в  $\overline{He}$  не было обнаружено ни в BESS-Polar I, ни в BESS-Polar II. По результатам полётов были получены самые низкие на 2012 г. верхние пределы отношения потоков  $\overline{He}/He \sim 10^{-7}$ .

Наиболее вероятным источником антиядер в галактических космических лучах считаются сверхновые антизвёзды, по аналогии с тем фактом, что звёзды являются источником частиц в ГКЛ [24]. Взрывы сверхновых являются результатом эволюции звезд, сопровождающейся выделением высокой энергии  $\sim 10^{51}$  эрг. Вещество от взорвавшейся антизвезды распространяется с большой скоростью. Частицы и античастицы, ускоряющиеся на оболочке сверхновой, могут приобретать энергию  $\sim 10^{15}$  эВ. В качестве прототипа скопления антизвёзд и источника  $\overline{He}^4$  в ГКЛ рассматривается один из ближайших кластеров — М4 по каталогу Мессье (NGC 6121 в новом общем каталоге) [25].

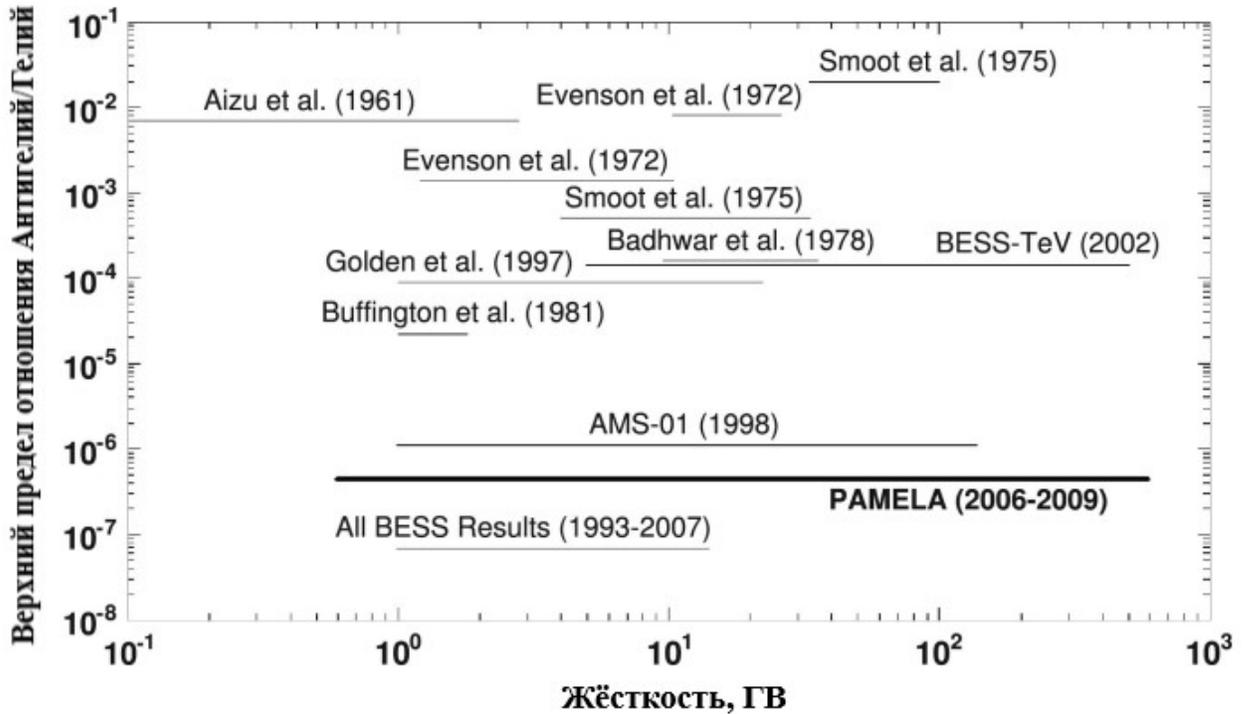


Рисунок 1.8 — Верхний предел отношения  $\overline{He}/He$  (при значении доверительного интервала 95%) от PAMELA и других экспериментов

Частицы КЛ после того, как родились и ускорились в источнике, попадают пространство с межзвездным веществом. «Запутываясь» в магнитных полях Галактики, они меняют свою исходную траекторию, и, дойдя до окраины, могут покинуть Млечный Путь. В современном представлении пространство КЛ носит диффузионный характер. Коэффициент диффузии  $K_D$  растёт с увеличением энергии, соответственно, время удержания ГКЛ до выхода за границы Галактики уменьшается, так как оно обратно пропорционально  $K_D$ . Время удержания для частиц с энергией 1-2 ТэВ составляет  $\sim 4 \cdot 10^7$  лет. Хотя вещество в Галактике в основном очень разрежено, за это время они успевают заполнить гало Галактики и пройти толщу вещества около  $10 \text{ г/см}^2$ . При больших энергиях пройденный путь частиц сильно уменьшается и, например, при энергии 10 ТэВ составляет  $0.1 - 0.4 \text{ г/см}^2$ , а время жизни  $\sim 4 \cdot 10^6$  лет [26].

## 2. РАСЧЁТ ТРАЕКТОРИЙ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЯХ

Пакет программ [27] для расчёта траекторий заряженных частиц в электромагнитных полях, включая его адаптацию для использования при трассировке частиц в магнитном поле Галактики, позволяет использовать метод для расчёта траекторий галактических и внегалактических космических лучей, включая область гало, путём решения их уравнения движения. Для удобства использования реализованного метода создан программный пакет с возможностью гибкой настройки различных параметров частиц, магнитного поля, задания среды, с которой могут взаимодействовать космические лучи (рис. 2.1). На вход `GetTrajectory` принимает некоторые начальные условия: начальные координаты, тип и импульс частиц, временной шаг, после чего производит трассировку частиц в заданной среде и заданном магнитном поле. В работе [28] описана используемая функция `GetMWBfield`, которая задаёт топологию магнитного поля Галактики. Функция основана на модели галактического магнитного поля JF12 [29]. С помощью неё моделируются траектории частиц с учётом влияния магнитного поля и оценивается доля частиц от первоначального потока, способная проникнуть в диск Галактики.

В программном пакете для моделирования шарового скопления используется `GeneranorCR` (рис. 2.1) — функция источника космических лучей, генерирующая изотропный поток частиц из заданной точки Галактики. Но нас интересуют не все генерируемые частицы, а только те, что долетят до диска Галактики или провзаимодействуют с межзвёздным веществом на пути к диску (рис. 2.2) (какие-то частицы отразятся от диска вследствие влияния магнитного поля, а какие-то изначально полетят в противоположную сторону). Для эффективного использования пакета программ по построению тра-

екторий заряженных частиц, необходимо определить приемлемый диапазон значений временного и пространственного шагов при заданном количестве запускаемых частиц, так как, с одной стороны, имеется физическое ограничение, с другой, — ограничение, связанное с временем работы компьютера.

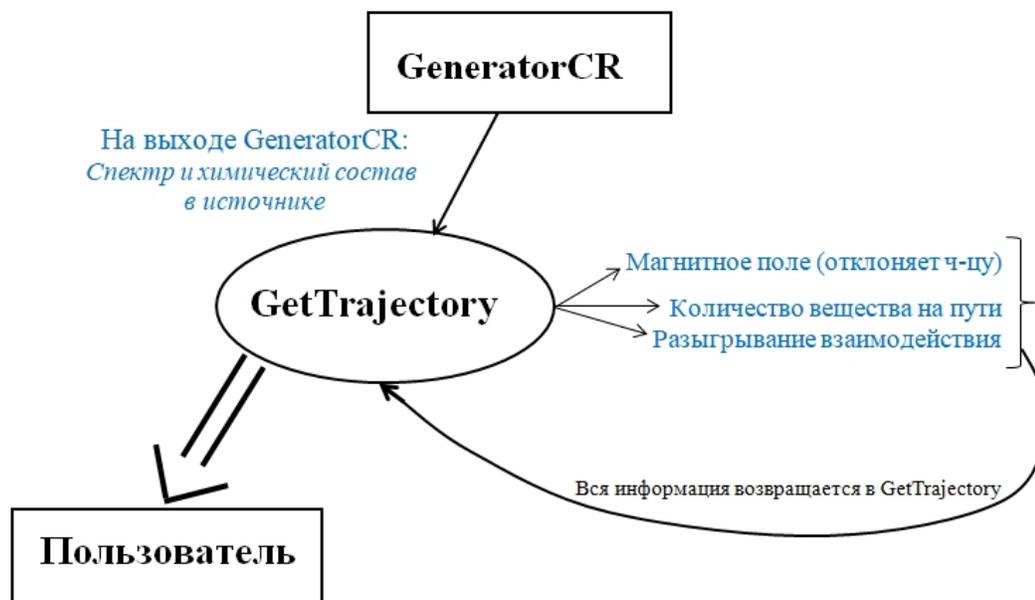


Рисунок 2.1 — Схема работы пакета программ по моделированию траекторий заряженных частиц

Пример траектории, рассчитанной программой **GetTrajectory**, показан на рис. 2.3, (вид на Галактику с ребра). На каждом шаге вдоль траектории вычисляется количество межзвёздного вещества, набранного частицей (см. 1.6). Благодаря этому есть возможность рассчитать ослабление потока антитигелия от источника из-за неупругих взаимодействий. Таким образом, для каждого события вычисляется не только путь в единицах длины, но и в единицах плотности.

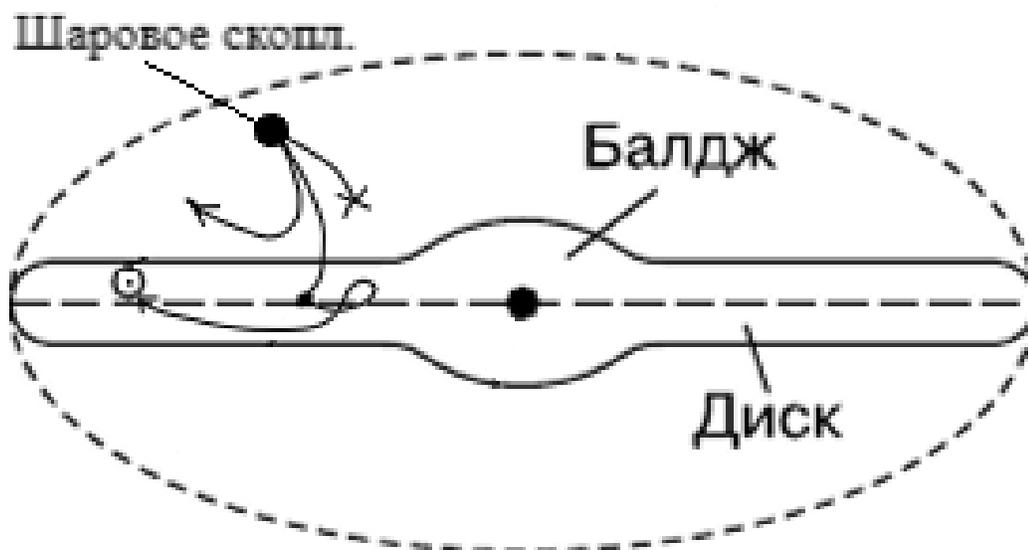


Рисунок 2.2 — Варианты траекторий частицы из шарового скопления. Слева направо: 1) частица отклонилась магнитным полем Галактики; 2) частица проникла в диск и долетела до Солнечной системы; 3) частица неупруго взаимодействовала с межзвёздной средой

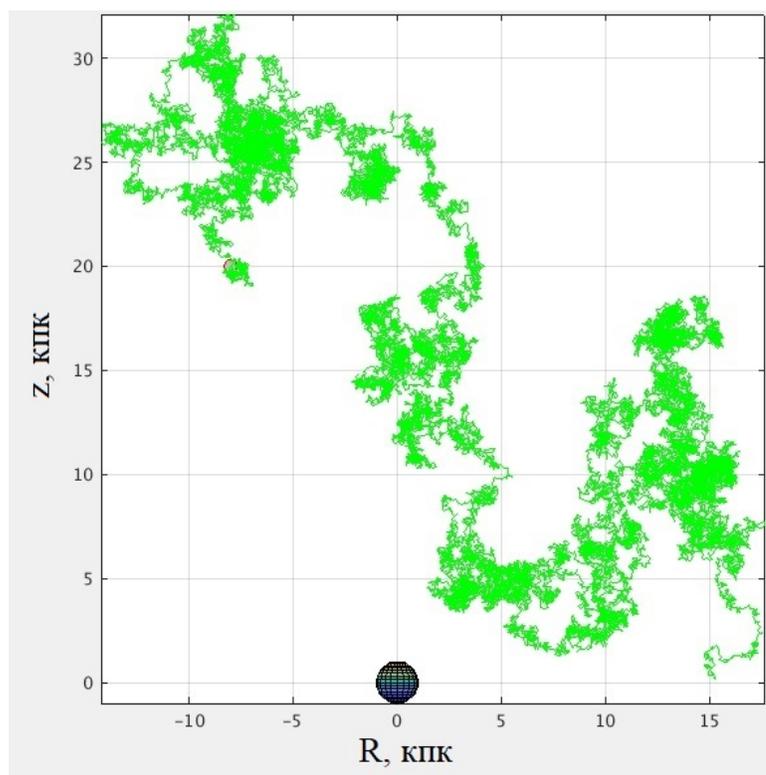


Рисунок 2.3 — Пример построенной траектории частицы из ШС. Здесь сферой радиусом 1 кпк обозначен центр Галактики

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

В рамках научно-исследовательской работы была проведена трассировка антиядер гелия от скопления М4, являющегося прототипом кластера антивзвёзд, к плоскости галактического диска. С помощью составленной функции межзвёздного вещества в программный пакет была добавлена возможность аннигиляции антиядер вследствие взаимодействия с межзвёздной средой (см. рис. 3.1). Благодаря ним, программа учитывает случаи, когда античастица погибает/рождает новые античастицы (см. рис. 2.2, траектория 3).

```

Progress: I I I I I I I I I I I S ~ anti_protonInelastic ~ 10 (9.548 GeV)
Gen: 1 (1 of 10) = mu+ (0.272 GeV)= D ~ GTDecay ~ 3 (0.374 GeV)
Gen: 2 (1 of 3) = e+ (0.024 GeV)= S ~ annihil ~ 2 (0.001 GeV)
Gen: 3 (1 of 2) = gamma (0.001 GeV)=
Gen: 3 (2 of 2) = gamma (0.001 GeV)=
Gen: 2 (2 of 3) = nu_e (0.255 GeV)=
Gen: 2 (3 of 3) = anti_nu_mu (0.095 GeV)=
Gen: 1 (2 of 10) = nu_mu (0.017 GeV)=
Gen: 1 (3 of 10) = mu- (1.176 GeV)= D ~ GTDecay ~ 3 (1.280 GeV)
Gen: 2 (1 of 3) = e- (0.964 GeV)=
Gen: 2 (2 of 3) = anti_nu_e (0.091 GeV)=
Gen: 2 (3 of 3) = nu_mu (0.225 GeV)=
Gen: 1 (4 of 10) = anti_nu_mu (0.835 GeV)=
Gen: 1 (5 of 10) = mu+ (0.971 GeV)= D ~ GTDecay ~ 3 (1.067 GeV)
Gen: 2 (1 of 3) = e+ (0.128 GeV)=
Gen: 2 (2 of 3) = nu_e (0.255 GeV)=
Gen: 2 (3 of 3) = anti_nu_mu (0.685 GeV)=
Gen: 1 (6 of 10) = nu_mu (0.143 GeV)=
Gen: 1 (7 of 10) = neutron (0.394 GeV)= D ~ GTDecay ~ 3 (0.395 GeV)
Gen: 2 (1 of 3) = e- (0.002 GeV)= S ~ eIoni ~ 0 (0.000 GeV)
Gen: 2 (2 of 3) = anti_nu_e (0.000 GeV)=
Gen: 2 (3 of 3) = proton (0.393 GeV)= S ~ hIoni ~ 0 (0.000 GeV)
Gen: 1 (8 of 10) = mu- (0.214 GeV)= D ~ GTDecay ~ 3 (0.318 GeV)

```

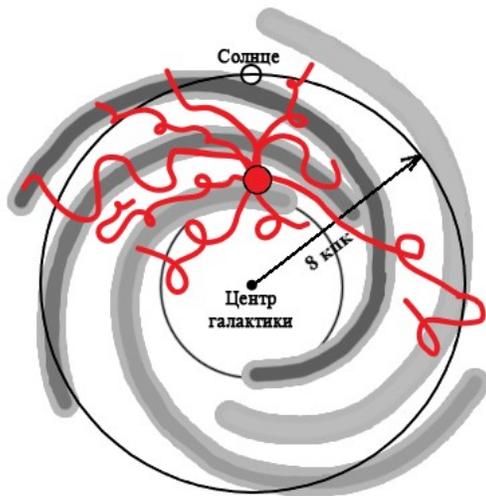
Рисунок 3.1 — Результаты запуска антипротона, испытавшего неупругое взаимодействие с межзвёздной средой. На рисунке показано, что образовались вторичные частицы, такие как электроны, мюоны, позитроны и нейтрино.

Для того, чтобы узнать, какая доля античастиц от шарового скопле-

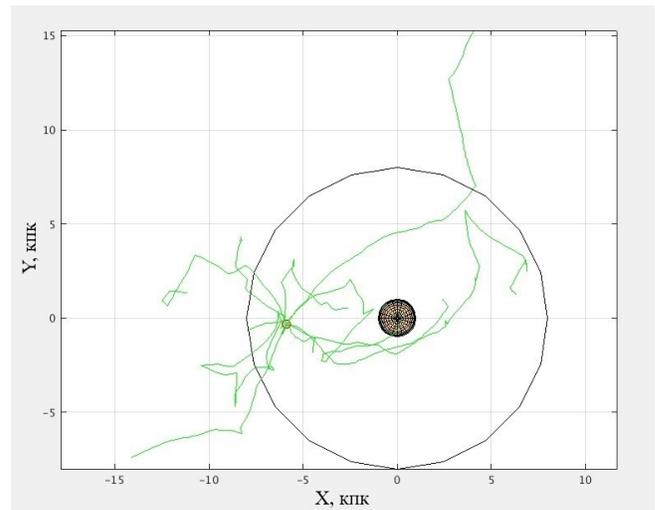
ния долетает до орбиты Земли, необходимо трассировать изотропный поток частиц от источника и определить, какая часть долетает до координат Солнечной системы (СС). Но в масштабах Галактики СС — маленькая точка, вероятность прохождения частицы через эту точку стремится к нулю. Поэтому мы, воспользовавшись азимутальной симметрией, рассматривали кольцо радиусом 8 кпк (расстояние от центра Галактики до СС) и шириной 1 кпк (толщина толстого диска Галактики), и поток через это кольцо условно называли потоком антиядер через СС.

Таким образом, необходимо было вычислить количество траекторий (долю от общего числа) антиядер гелия, проходящих через кольцо радиусом 8 кпк за заданное время экспозиции (см. рис. 3.2). Для этого в программе были созданы специальные условия остановки (Break Conditions), выполняющиеся при пересечении частицей кольца (см. рис. 3.3).

В результате моделирования было протрассировано от 10 до 100 частиц и построен график 3.4 связи числа частиц, долетающих до Солнечной системы, и общего числа частиц из источника. В результате расчетов установлено, что доля долетающих до Земной орбиты частиц составляет 12,4%.



(а) Схематическое изображение траекторий в Галактике



(б) Изображение траекторий, полученное в результате моделирования

Рисунок 3.2 — Галактика, вид сверху. Красным кругом обозначено ШС антивзвезд, откуда вылетают античастицы по красным (а) и зелёным (б) траекториям. Мы рассматриваем те их них, которые пересекают кольцо с  $R=8$  кпк

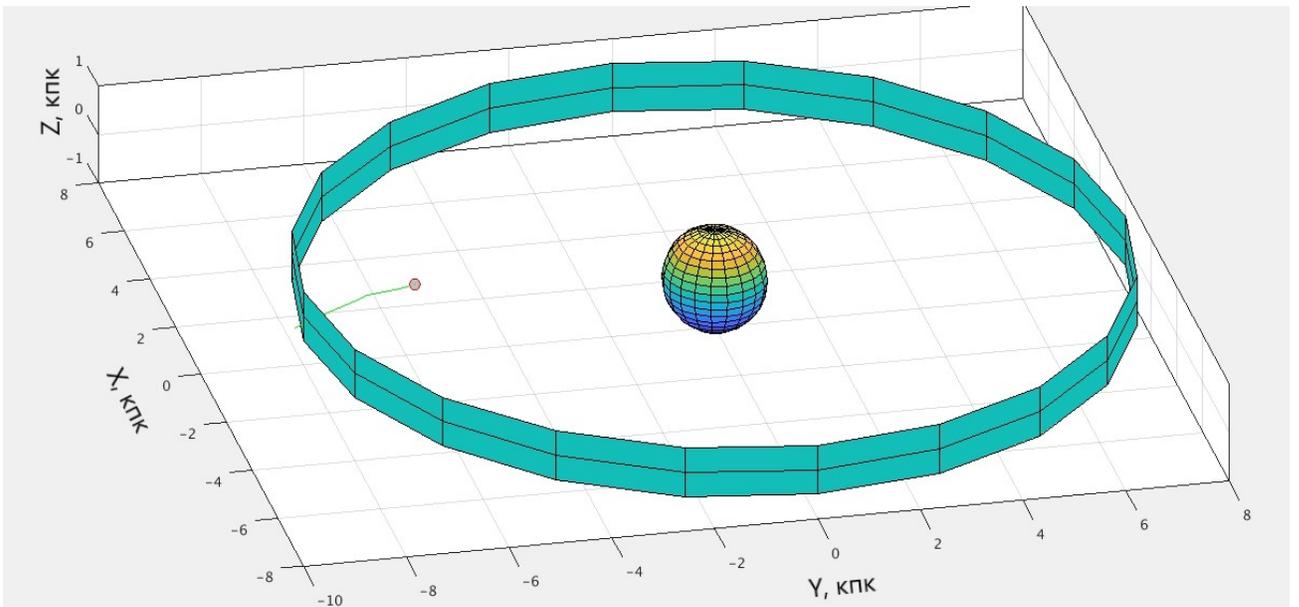


Рисунок 3.3 — Срабатывание Break Conditions в случае пересечения частицей кольца радиусом 8 кпк. Здесь сферой с  $R=1$  кпк обозначен центр Галактики

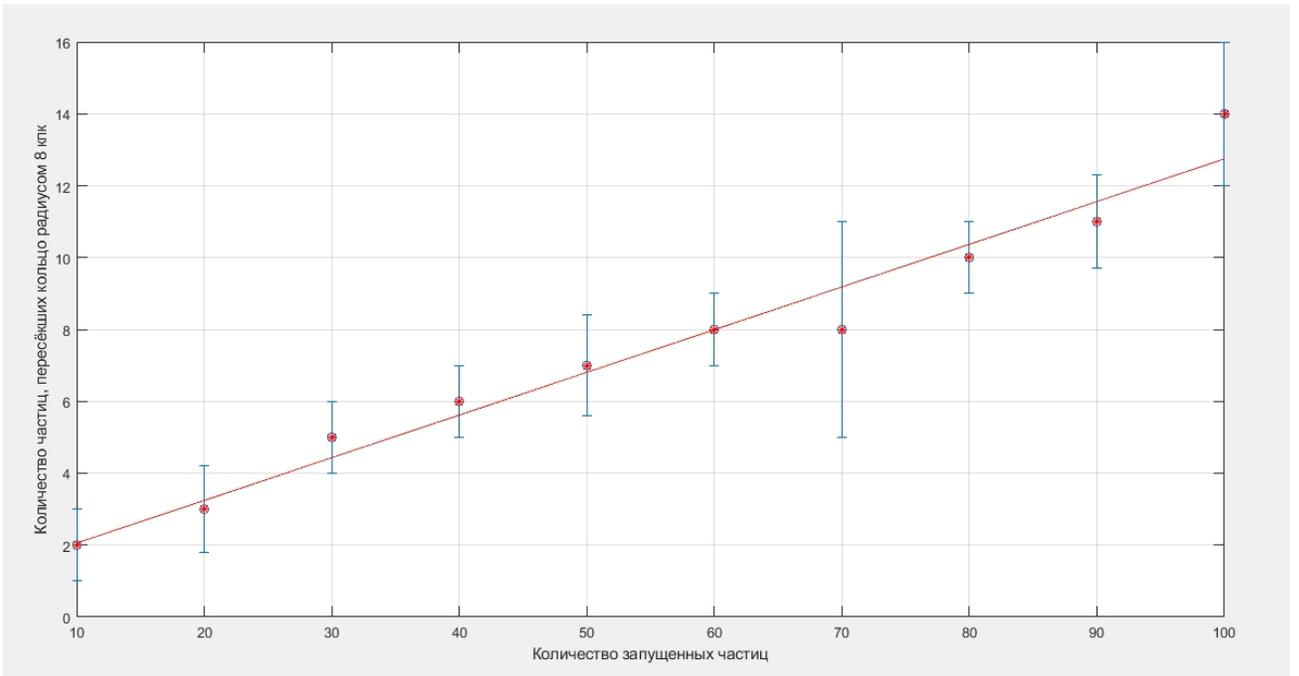


Рисунок 3.4 — График зависимости числа частиц, долетевших до СС, от общего числа частиц из источника

Ненулевой результат означает, что есть смысл в дальнейших расчётах, включающих неупругие взаимодействия. После их включения доля долетающих до Солнечной системы частиц уменьшится, приблизившись к значениям, которые могут быть получены в случае подтверждения гипотезы шарового скопления антизвёзд. Таким образом, следующим шагом будет учёт межзвёздной среды в расчёте потока долетающих до Земной орбиты античастиц.

Полученные данные будут использованы для интерпретации результатов экспериментальных поисков антиядер в космических лучах и изучения механизма возникновения барионной асимметрии Вселенной. Предварительные указания на возможную регистрацию антигелия в эксперименте AMS-02, которые нельзя объяснить как вторичные события из астрофизических источников, если они будут подтверждены, станут серьёзным доказательством существования форм первичного антивещества в нашей Галактике. Это будет способствовать физике, выходящей за рамки стандартной модели, которая может поддерживать создание и выживание доменов антивещества в барионно-асимметричной Вселенной.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] The STAR Collaboration: Observation of the antimatter helium-4 nucleus, *Nature* **473**, 353-356 (2011), arXiv:1103.3312
- [2] L. Boyle, K. Finn and N. Turok: CPT-Symmetric Universe, *Phys. Rev. Lett.* **121(25)**, 251301 (2018), arXiv:1803.08928
- [3] A.D. Dolgov: Matter and antimatter in the universe, *Nucl. Phys. Proc. Suppl.* **113**, 40 (2002), doi:10.1016/S0920-5632(02)01821-2
- [4] M.Y. Khlopov: *Fundamentals of Cosmoparticle Physics* CISP-Springer, Cambridge, UK (2012).
- [5] V. M. Chechetkin, M. Yu. Khlopov, and M. G. Sapozhnikov: Antiproton interactions with light elements as a test of GUT cosmology, *La Rivista del Nuovo Cimento* (1978-1999), **5(10)**, 1-79, (1982), doi:10.1007/BF02740484
- [6] B. Gato Rivera: Antimatter, *Revista española de física* **34(3)**, 1-6 (2020), arXiv:2205.08348
- [7] N. Tomassetti, A. Oliva: Secondary antinuclei from supernova remnants and background for dark matter searches, 35th International Cosmic Ray Conference — ICRC2017 **301**, 271 (2017), arXiv:1707.06919
- [8] F.W. Stecker, A.J. Tylka: The cosmic-ray antiproton spectrum from dark matter annihilation and its astrophysical implications: a new look, *Astrophysical Journal* **336**, L51 (1989), doi:10.1086/185359 .
- [9] M. Y. Khlopov et al.: Evolution and observational signature of diffused antiworld, *Astroparticle Physics* **12(4)**, 367-372 (2000), doi:10.1016/S0927-6505(99)00099-7

- [10] A. D. Dolgov: Antistars in the Galaxy, 20th Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics (2022), arXiv:2201.04529 .
- [11] S. I. Blinnikov, A. D. Dolgov, and K. A. Postnov: Antimatter and antistars in the universe and in the Galaxy, Physical Review D **92(2)**, (2015), doi:10.1103/PhysRevD.92.023516
- [12] AMS Collaboration, J. Alcaraz et. al.: Search for Antihelium in Cosmic Rays, Phys. Lett. **287**, B461 (1999), doi:10.1016/S0370-2693(99)00874-6
- [13] M. Casolino, P. Picozza, F. Altamura et al.: Launch of the space experiment PAMELA, Advances in Space Research **42 (3)**, 455 (2008), doi:10.1016/j.asr.2007.07.023
- [14] K. Yoshimura et al.: BESS-Polar experiment: Progress and future prospects, Advances in space research **42(10)**, 1664-1669 (2008), doi:10.1016/j.asr.2007.05.048
- [15] Ashman, M. Keith, and S. E. Zepf.: *Globular cluster systems*, Cambridge, UK: Cambridge University Press (2008).
- [16] <http://gclusters.altervista.org>
- [17] 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).
- [18] A.W. Strong, I.V. Moskalenko: Secondary antiprotons and propagation of cosmic rays in the galaxy and heliosphere, The Astrophysical Journal **564**, 280-296 (2001), arXiv:astro-ph/0106567
- [19] A. W. Strong, and J. R. Mattox: Gradient model analysis of EGRET diffuse Galactic gamma-ray emission, Astronomy and Astrophysics **308**, L21-L24 (1996).
- [20] K. Lübelmeyer et al.: Upgrade of the Alpha Magnetic Spectrometer (AMS-02) for long term operation on the International Space Station (ISS), Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators,

- Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, **654** (1), 639-648, (2011), doi:10.1016/j.nima.2011.06.051
- [21] I. Cholis, T. Linden: Anti-Deuterons and Anti-Helium Nuclei from Annihilating Dark Matter, Phys. Rev. D **102**, (2020), arXiv:2001.08749
- [22] <http://ams.cern.ch/>
- [23] A.G. Mayorov, A.M. Galper, O. Adriani et al. Upper limit on the antihelium flux in primary cosmic rays. JETP Lett. **93**, 628 (2011), doi:10.1134/S0021364011110087
- [24] M. Charlton, S. Eriksson , G. M. Shore: Testing fundamental physics in antihydrogen experiments, Seminar on Precision Physics and Fundamental Symmetries (2020), arXiv:2002.09348 .
- [25] D. C. Heggie, and M. Giersz: Modelling individual globular clusters, Proceedings of the International Astronomical Union **3(S246)**, 121-130 (2007), arXiv:0711.2620 .
- [26] A.W. Strong, I.V. Moskalenko: Propagation of cosmic-ray nucleons in the Galaxy, The Astrophysical Journal **509**, 212-228 (1998), arXiv:astro-ph/9807150
- [27] 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), doi:10.3103/S1062873821040122
- [28] A. O. Kirichenko, A. V. Kravtsova, M. Y. Khlopov, A. G. Mayorov: Researching of magnetic cutoff for local sources of charged particles in the halo of the Galaxy, Bled Workshops in Physics **22**, 171-177 (2021), arXiv:2112.00361 .
- [29] R. Jansson and G. R. Farrar: A New Model of the Galactic Magnetic Field, ApJ **757**, 14 (2012), doi:10.1088/0004-637X/757/1/14