

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 физики элементарных частиц (№40)

УДК 539.1.05, 524.1-52

ОТЧЁТ  
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ  
**РАСПРОСТРАНЕНИЕ АНТИЯДЕР В  
МЕЖЗВЁЗДНОМ ПРОСТРАНСТВЕ**

Научный руководитель

профессор, д.ф.-м.н.

\_\_\_\_\_ М. Ю. Хлопов

Научный консультант

к.ф.-м.н., доцент

\_\_\_\_\_ А. Г. Майоров

Студент гр. Б18-102

\_\_\_\_\_ А. В. Кравцова

Москва 2021

# СОДЕРЖАНИЕ

1 Введение	3
2 Шаровые скопления в гало Галактики	4
3 Постановка задачи	6
4 Результаты	7
5 Заключение	13
Список литературы	14

# 1. ВВЕДЕНИЕ

Согласно современным представлениям, антивещество имеет три возможных природы происхождения:

1. Первичное антивещество. Оно могло зародиться в ранней Вселенной вследствие неоднородного бариосинтеза [1; 2], эволюционировать в доменах антивещества и сейчас может существовать в виде макроскопических объектов антивещества, таких как шаровые скопления антизвёзд [3].
2. Вторичное антивещество. Оно образуется в результате столкновения высокоэнергетичной ядерной составляющей космических лучей с межзвездным газом или с остатком оболочки сверхновой.
3. Антивещество от экзотических источников. Это может быть испарение первичных чёрных дыр или распад/аннигиляция гипотетических частиц тёмной материи.

В изолированном пространстве не может образоваться астрономический объект меньше шарового скопления [4]. Антизвезда сможет образоваться только в окружении антиматерии масштаба по крайней мере шарового скопления, иначе окружающее барионное вещество проаннигилирует с антивеществом звезды. Большой размер доменов ограничен наблюдаемыми потоками гамма-излучения.

Таким образом, шаровые скопления антизвезд могли образоваться во время формирования Галактики и до настоящего времени сохраниться в ее гало (вследствие сильной аннигиляции антиматерии и газа материи в диске Галактики это было бы невозможно).

## 2. ШАРОВЫЕ СКОПЛЕНИЯ В ГАЛО ГАЛАКТИКИ

Шаровое звёздное скопление – совокупность звёзд, тесно связанных гравитацией и вращающихся вокруг галактического центра. Гравитация придаёт таким скоплениям сферическую форму и относительно высокую плотность звезд по направлению к их центрам.

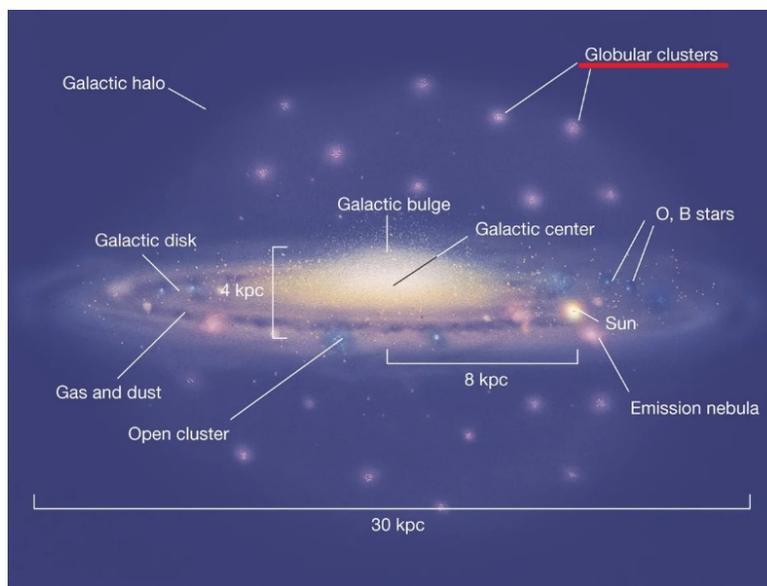


Рисунок 2.1 — Шаровые скопления звёзд в гало Галактики

Шаровые скопления расположены в галактическом гало [2.1](#), содержат больше звезд и намного старше, чем менее плотные открытые скопления, обнаруженные в галактическом диске. У звёзд в таких скоплениях низкая доля элементов, отличных от водорода и гелия, по сравнению с, например, Солнцем. В настоящее время в Млечном Пути известно около 150 звёздных скоплений этой категории [\[5\]](#), ни одно из которых не показывает активного звездообразования. 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 первоначального взрыва звездообразования. Это со-

гласуется с мнением о том, что шаровые скопления являются древнейшими объектами в Галактике и были одними из первых сформировавшихся скоплений звезд [6].

Согласно [3], объекты, состоящие из первичного антивещества, могут присутствовать в Галактике в виде шаровых скоплений звёзд из антиматерии. На основе предполагаемого сходства их свойств со свойствами шаровых скоплений из материи рассматриваются возможности проверки гипотезы шарового скопления антиматерии в поисках антигелиевой составляющей космических лучей. Наш подход направлен на уточнение предсказаний этой гипотезы с учетом реалистичного описания образования и распространения космических антигелиевых потоков в Галактике.

### 3. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В настоящее время на Международной космической станции запущен эксперимент AMS-02 по изучению характеристик космических лучей. Одна из его задач - поиск антиядер тяжелее антипротона, включая антигелий. Его регистрация указала бы на существование дополнительного источника антивещества, поскольку вероятность рождения вторичного антигелия невелика. Одним из источников может быть шаровое скопление антизвезд в гало нашей Галактики. В качестве примера рассматривается один из ближайших кластеров - М4 по каталогу Мессье (NGC 6121 в новом общем каталоге (NGC)). Предполагается, что это скопление состоит из антизвезд и является источником  $\overline{He}^4$  в галактических космических лучах.

Мой коллега, Владислав Сергеевич Голубков написал программу, реализующую эффективный метод численного решения уравнения движения космических лучей в различных полях (например, в гелиосфере, магнитосфере Земли или магнитном поле Галактики). На вход `GetTrajectoryInEMField` принимает некоторые начальные условия: начальные координаты и импульс частиц, временной шаг, а затем производит трассировку в том магнитном поле, которое ей задают. Другая коллега, Анастасия Олеговна Кириченко реализовала функцию `GetMWBfield`, задающую топологию магнитного поля Галактики [7]. С помощью этой функции моделируются траектории частиц с учётом влияния магнитного поля и оценивается доля частиц от первоначального потока, способная проникнуть в диск Галактики.

Помимо магнитных полей, на движение частиц от шаровых скоплений также влияет и межзвёздная среда. Чтобы учитывать её влияние, необходимо знать распределение плотности вещества. С помощью этой информации можно рассчитывать вероятность взаимодействия частиц с веществом, набираемым частицей во время полёта. Таким образом, моя задача заключалась в построении функции распределения межзвёздного вещества.

## 4. РЕЗУЛЬТАТЫ

На основе уравнений для расчёта различных компонент газа [8] составлена функциональная программа, входными параметрами которой являются координаты в Галактике, а выходными - суммарная концентрация ионизованного, атомарного и молекулярного водорода в декартовой системе координат.

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

$$n_{H_2}(R, z) = 3.24 \times 10^{-22} X_{CO} \epsilon_0(R) e^{-\ln 2 (z-z_0)^2/z_h^2}$$

Здесь  $\epsilon_0(R)$  ( $\text{К км сек}^{-1}$ ) – объёмная светимость CO,  $z_0(R)$  и  $z_h(R)$  – характерная шкала высоты и ширина распределения как функции расстояния от центра Галактики  $R$  4.1a, и  $X_{CO} = N_{H_2}/W_{CO} = 1.9 \times 10^{20}$  молекул  $\text{см}^{-2}$   $\text{К}^{-1} \text{ км}^{-1} \text{ сек}$  – конверсионный фактор.

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

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

Здесь  $Y(R)$  – распределение 4.16 ( $R < 16$  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  $H_{II}$ ,  $\text{см}$ :

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

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.

$R$ (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)	Radius Interval (kpc)	$n(\text{H I})$ ( $\text{cm}^{-3}$ )
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  $\text{K км сек}^{-1} \text{кпк}^{-1}$ .

(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  $z = 0.1$  изображены на 4.2, 4.3, 4.4, 4.5.

Распределения в аналитической модели [8] можно увидеть на 4.6.

На основе полученных графиков можно сказать, что составленная программа работает верно, так как распределение концентрации совпадает с данными [8], таким образом, программу можно использовать для моделирования траекторий частиц с учётом влияния межзвёздной среды.

Теперь помощью функции InterStMedium, основная программа для расчёта траекторий частиц GetTrajectoryInEMField способна вычислить путь как в единицах длины, так и в единицах плотности. В результате моделирования была построена гистограмма распределения частиц по набранному вдоль траектории количеству вещества 4.7.

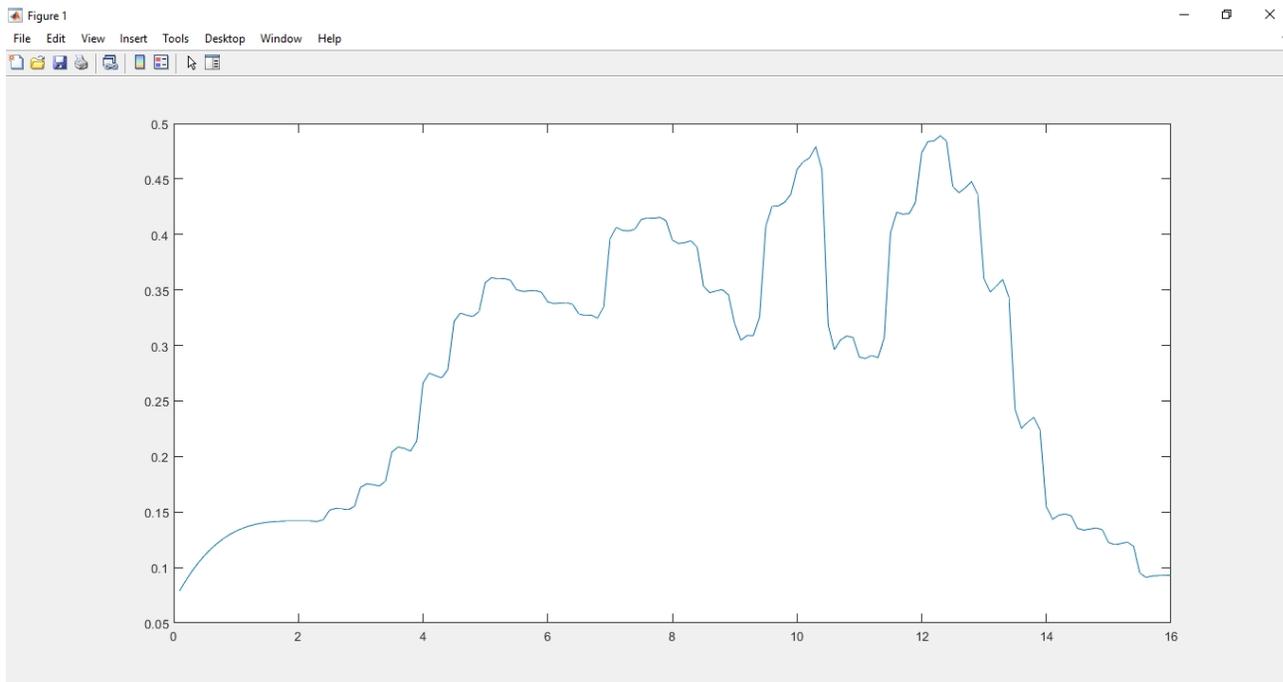


Рисунок 4.2 — Концентрация атомов атомарного водорода

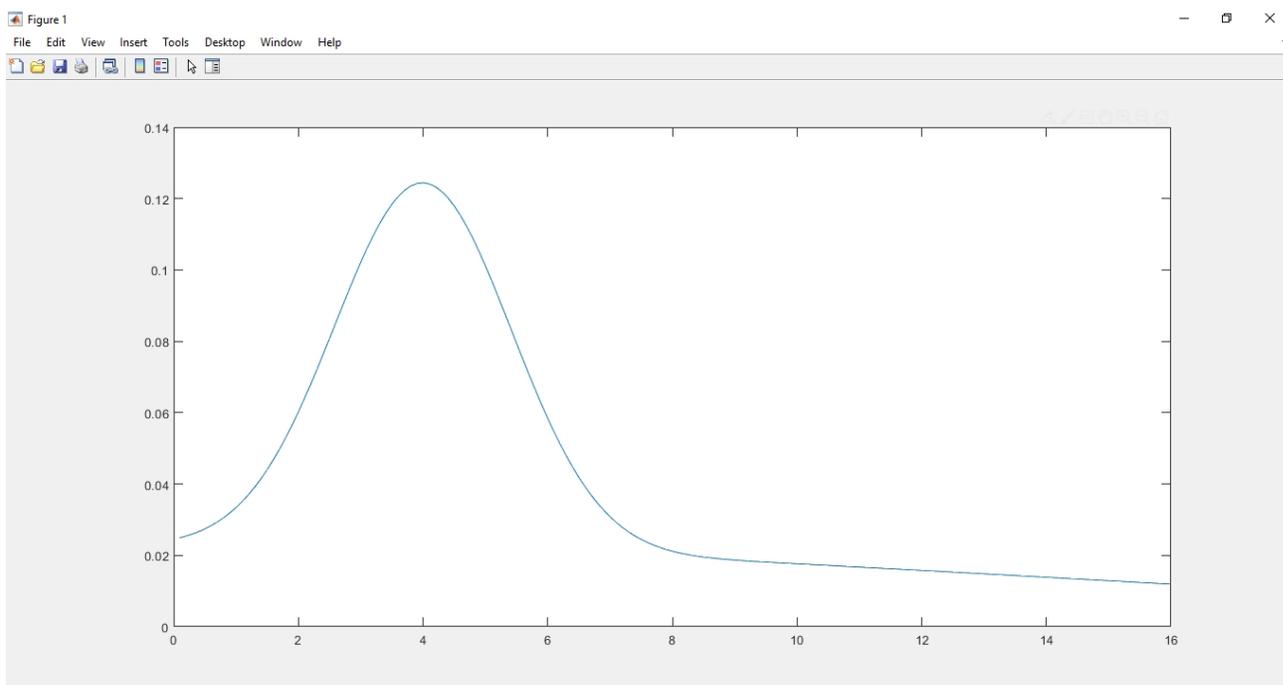


Рисунок 4.3 — Концентрация атомов ионизованного водорода

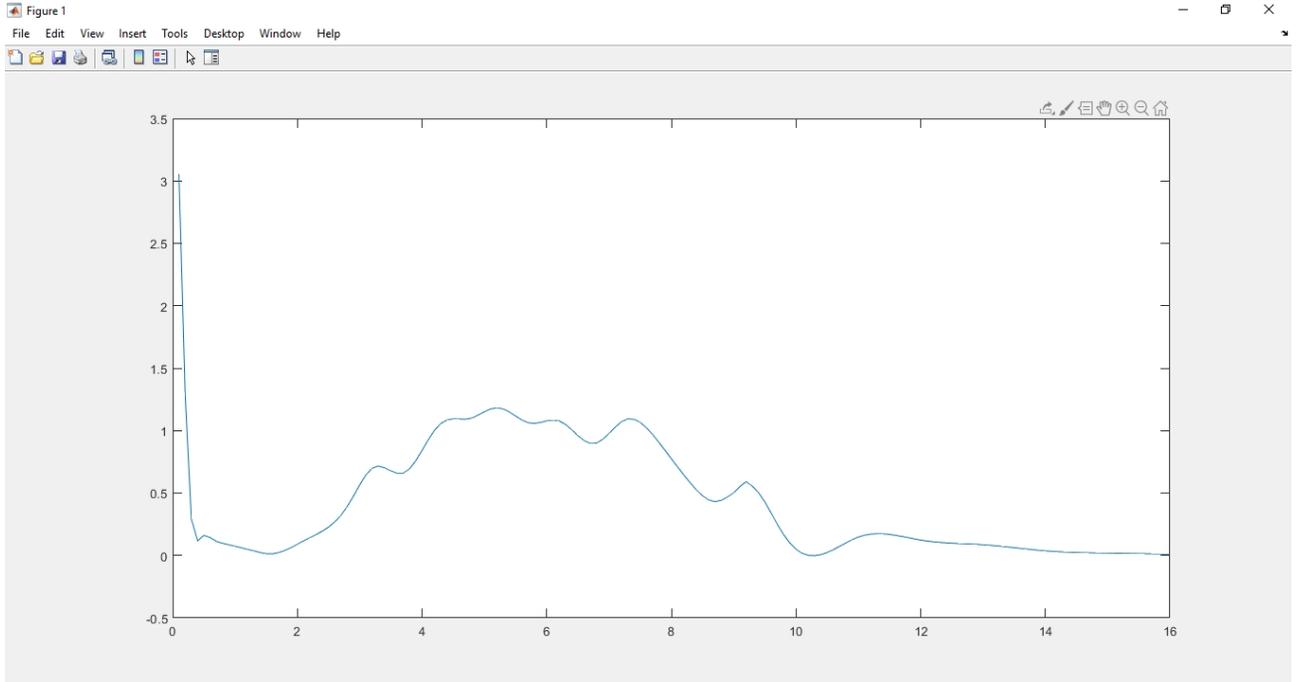


Рисунок 4.4 — Концентрация атомов молекулярного водорода

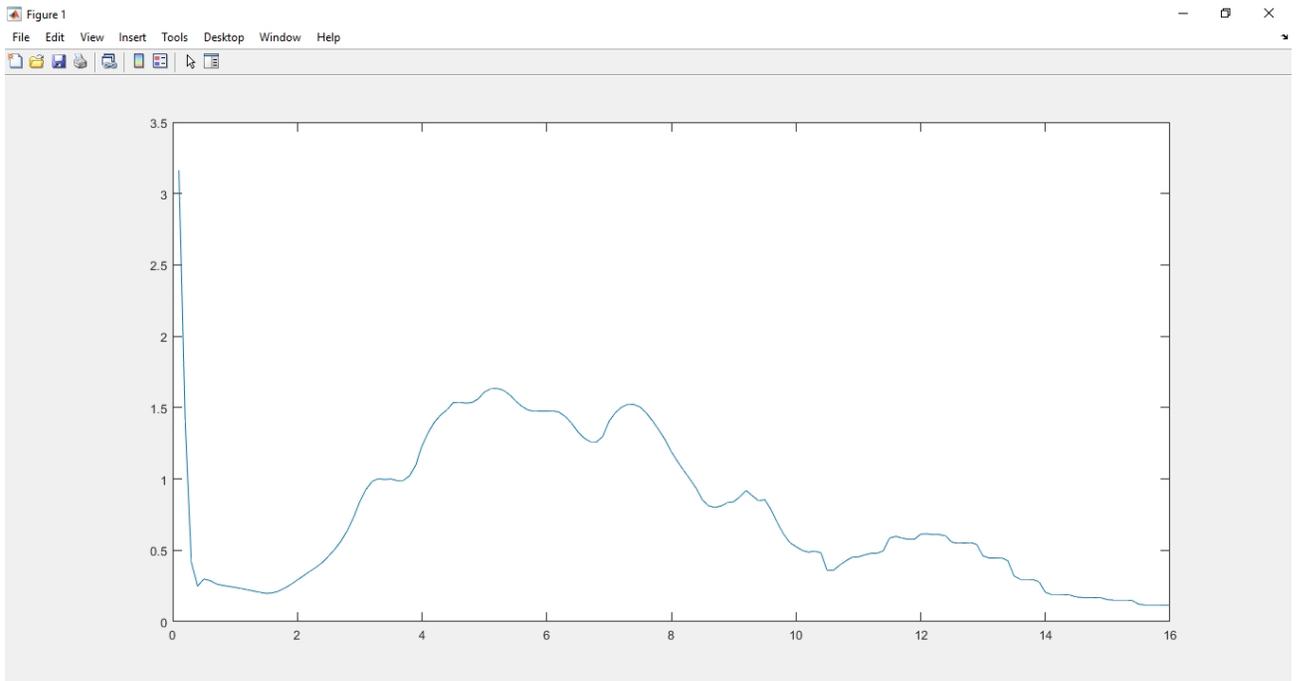


Рисунок 4.5 — Суммарная концентрация межзвёздного газа

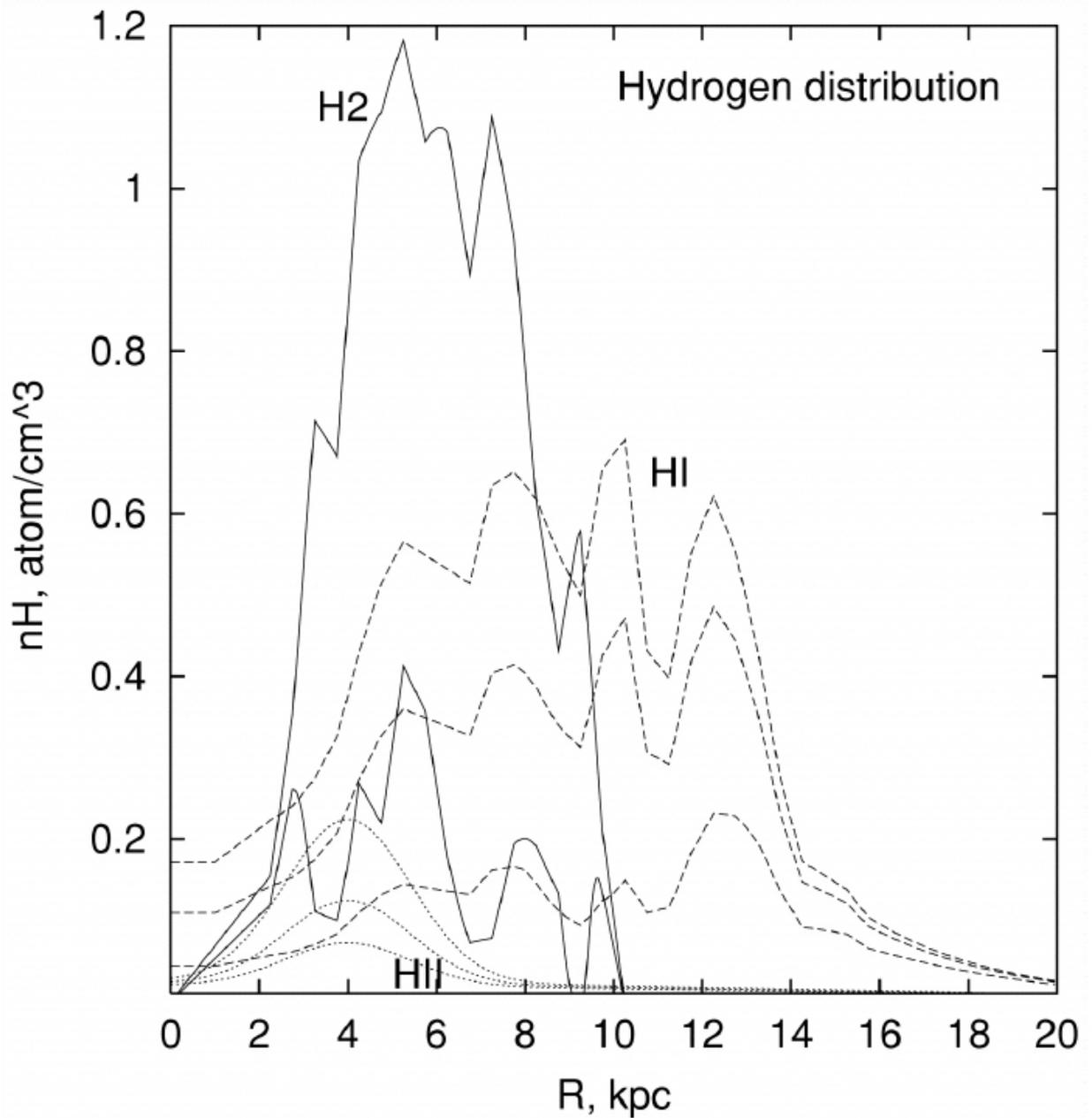


Рисунок 4.6 — Концентрации атомов молекулярного водорода  $H_2$  ( $2 \times n_{H_2}$ , сплошные линии), атомарного  $H_I$  (пунктир) и ионизованного  $H_{II}$  (точечные линии) газа в Галактике. Линии показаны для расстояний  $z = 0, 0.1, 0.2$  кпк от Галактической плоскости (с увеличением  $z$  концентрация уменьшается). На расстоянии  $z = 0.2$  кпк концентрация молекулярного водорода очень мала и поэтому не показана

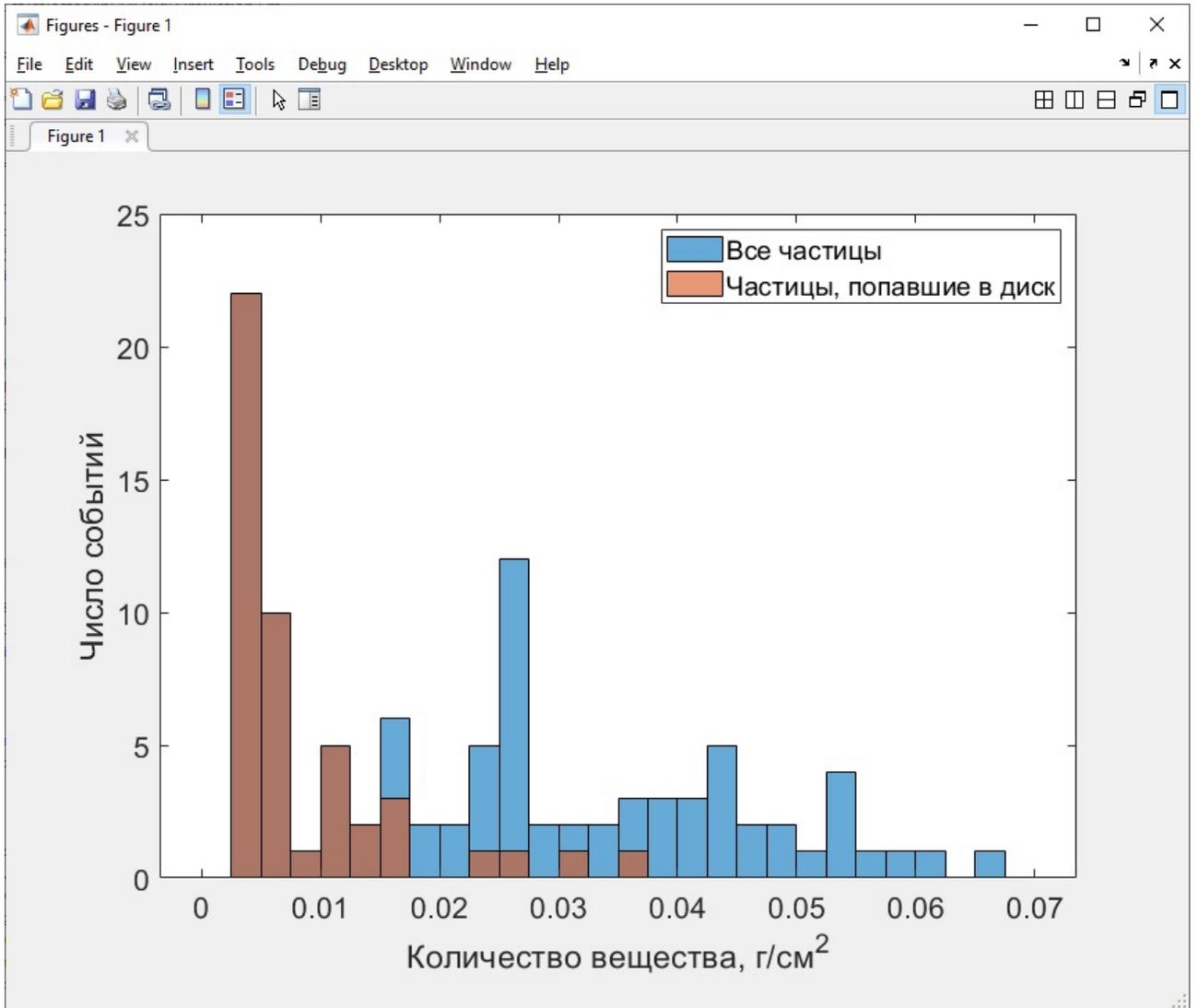


Рисунок 4.7 — Результаты трассировки частиц из шарового скопления М4 с координатами [5.9 0.3 -0.6] кпк до выполнения двух условий: 1) частица улетает за пределы галактики, координата  $Z > 8$  кпк и 2) частица попадает в диск, координата  $Z < 0.15$  кпк = 150 пк. Разброс в бинах обусловлен статистикой (всего 100 частиц с энергией от 0.1 ГэВ до 1 ТэВ).

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Составленная программа функции межзвёздного газа позволяет вычислять количество вещества на пути частицы, летящей из шарового скопления. В дальнейшем эта информация позволит вычислить сечение взаимодействия античастиц из источника с межзвёздным газом.

Зная количество вещества на траектории частицы и сечение её взаимодействия, мы уже сможем оценить, какая доля антиядер, вылетающих из шаровых скоплений антизвёзд, достигает орбиты Солнечной системы. Полученные данные будут использованы для интерпретации результатов экспериментальных поисков антиядер в космических лучах и изучения механизма возникновения барионной асимметрии Вселенной.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *M.Yu.Khlopov*: Fundamentals of Cosmoparticle Physics CISP-Springer. — UK : Cambridge, 2012.
2. *A.D.Dolgov*: Matter and antimatter in the universe // Nucl. Phys. Proc. Suppl. — 2002. — Vol. 113. — P. 40.
3. *M.Yu.Khlopov*: An antimatter globular cluster in our Galaxy - a probe for the origin of the matter // Gravitation and Cosmology. — 1998. — Vol. 4. — P. 69–72.
4. *M.Yu.Khlopov* [et al.]. Evolution and observational signature of diffused antiworld // Astroparticle Phys. — 2000. — Vol. 12. — P. 367–372.
5. <http://gclusters.altervista.org/>. —
6. *M.Paul*: Star Clusters. Encyclopedia of Astronomy and Astrophysics. — 2014.
7. *M.Yu.Khlopov, A.O.Kirichenko, A.G.Mayorov*: Antihelium flux from antimatter globular cluster // Bled Workshops in Physics. — 2020. — Vol. 21. — P. 118–127.
8. *И.В.Москаленко*: Галактические космические лучи и диффузное излучение: дис. ... д-ра физ.-мат. наук. — Стэнфордский Университет, 2016. — с. 108–113.