

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.

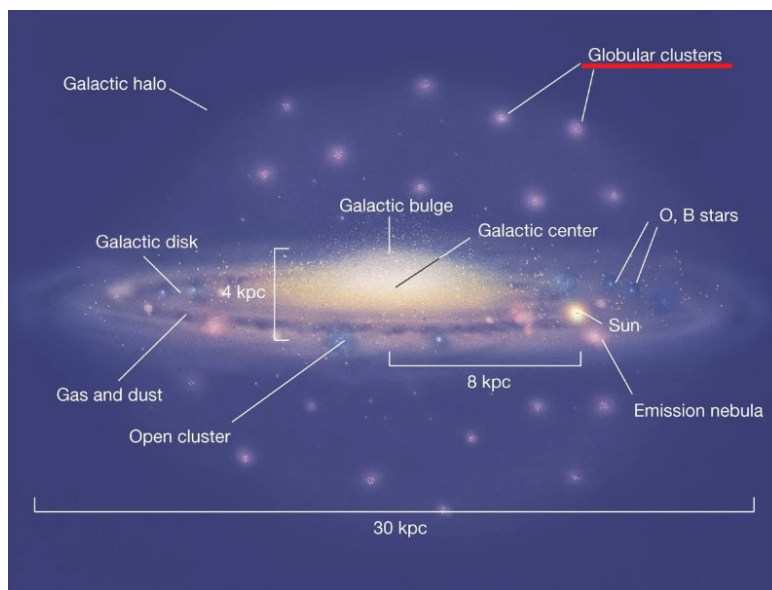


Рисунок 2.1 — Шаровые скопления звёзд в гало Галактики

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 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 $\epsilon_0(R)$ (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 см^{-2} $\text{К}^{-1} \text{ км}^{-1} \text{ сек}$ – конверсионный фактор.

Относительное распределение атомарного водорода H_I , 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} , 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)	$\epsilon_0(R)$ (^a)	$z_0(R)$ (пк)	$z_h(R)$ (пк)	R (кпк)	$\epsilon_0(R)$ (^a)	$z_0(R)$ (пк)	$z_h(R)$ (пк)	R (кпк)	n_{H} (см^{-3})
0.00	43.7	0	70	5.25	9.6 ± 0.6	-1 ± 4	82 ± 4	2.0–2.5....	0.13
0.10	24.5	0	70	5.75	8.6 ± 0.4	-4 ± 3	83 ± 4	2.5–3.0....	0.14
0.20	10.7	0	70	6.25	9.1 ± 0.5	-19 ± 3	73 ± 3	3.0–3.5....	0.16
0.30	1.6	0	70	6.75	7.9 ± 0.4	-22 ± 3	63 ± 4	3.5–4.0....	0.19
0.40	1.4	0	70	7.25	9.2 ± 0.5	-14 ± 3	58 ± 4	4.0–4.5....	0.25
0.50	1.5	0	70	7.75	7.7 ± 0.5	-9 ± 5	72 ± 7	4.5–5.0....	0.30
0.60	1.1	0	70	8.25	5.0 ± 0.3	-4 ± 5	80 ± 9	5.0–5.5....	0.33
0.70	0.9	0	70	8.75	3.6 ± 0.6	13 ± 6	66 ± 10	5.5–6.0....	0.32
0.80	0.8	0	70	9.25	4.8 ± 0.6	-4 ± 3	23 ± 5	6.0–6.5....	0.31
0.90	0.7	0	70	9.75	1.7 ± 0.5	-20 ± 77	147 ± 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 ± 0.4	39 ± 26	77 ± 30	16.0	0.09	0	220	10.0–10.5...	0.40
2.75	3.3 ± 0.5	36 ± 9	80 ± 10	17.0	0.07	0	200	10.5–11.0...	0.25
3.25	5.8 ± 0.5	0 ± 4	61 ± 4	18.0	0.05	0	188	11.0–11.5...	0.23
3.75	5.5 ± 0.5	-8 ± 4	65 ± 5	19.0	0.005	0	200	11.5–12.0...	0.32
4.25	8.4 ± 0.5	1 ± 3	71 ± 3	20.0	0.008	0	200	12.0–12.5...	0.36
4.75	9.0 ± 0.8	-10 ± 5	72 ± 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

^a $\epsilon_0(R)$ 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 $z = 0.1$ 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.

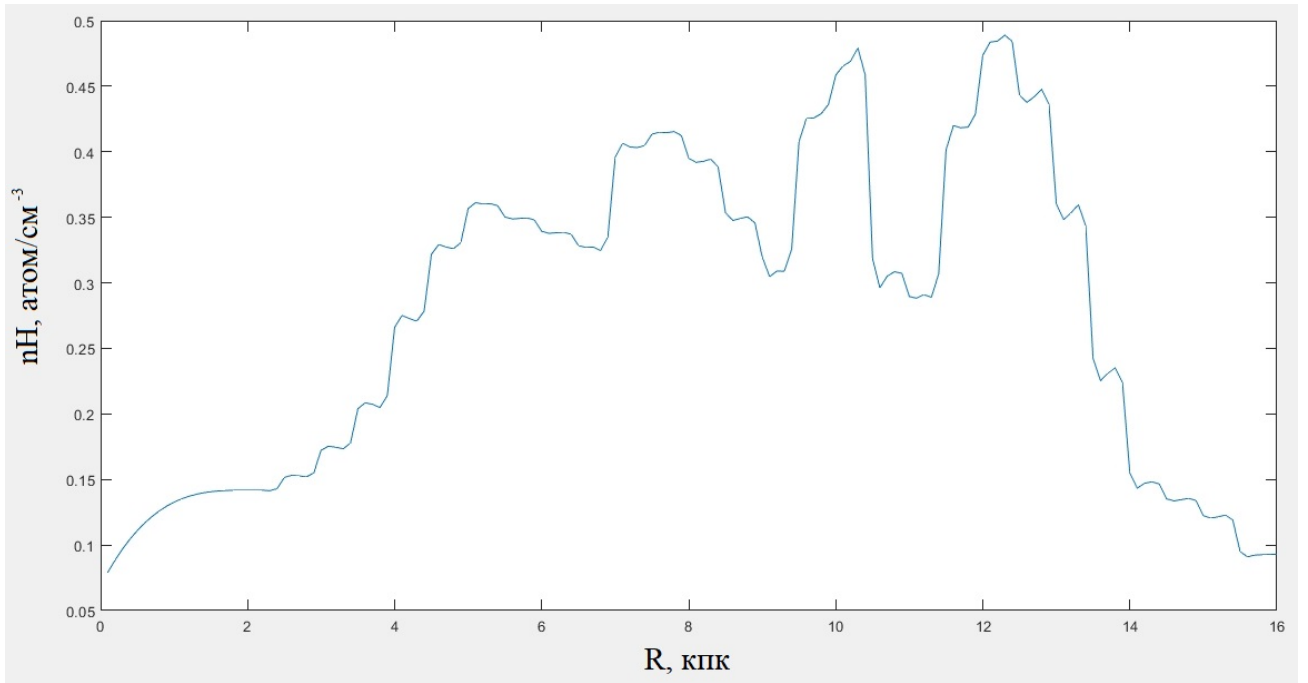


Рисунок 4.2 — Концентрация атомов атомарного водорода

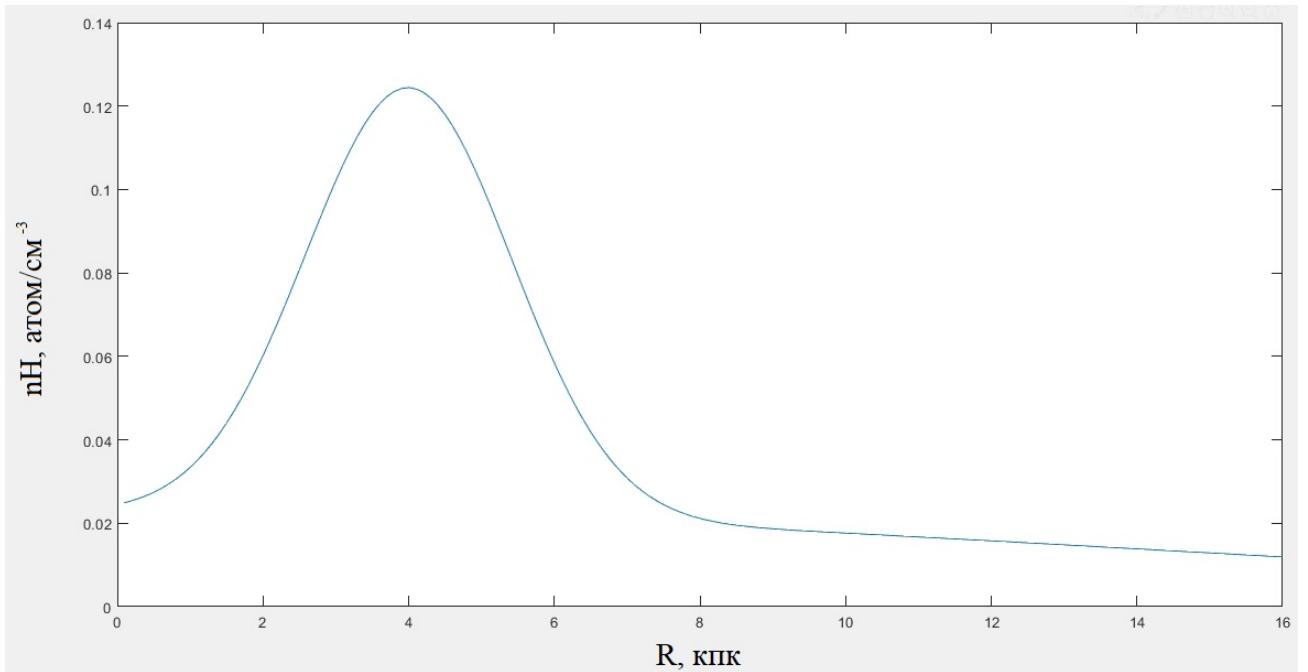


Рисунок 4.3 — Концентрация атомов ионизованного водорода

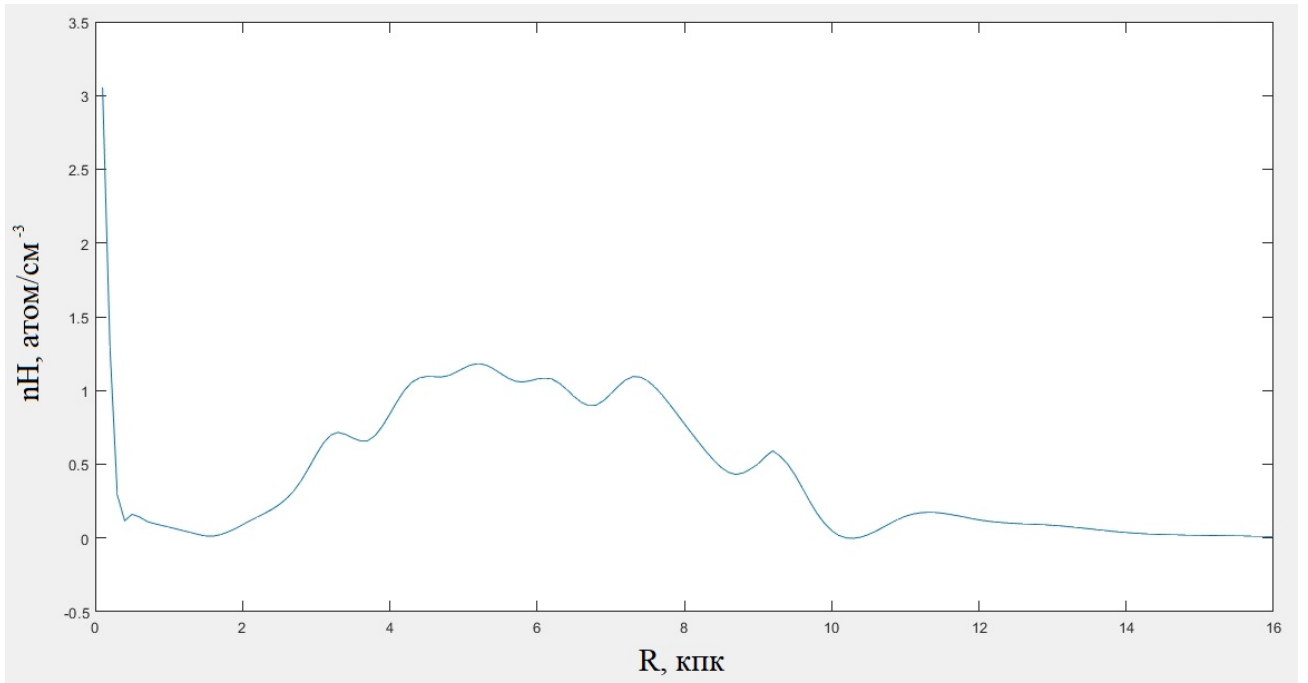


Рисунок 4.4 — Концентрация атомов молекулярного водорода

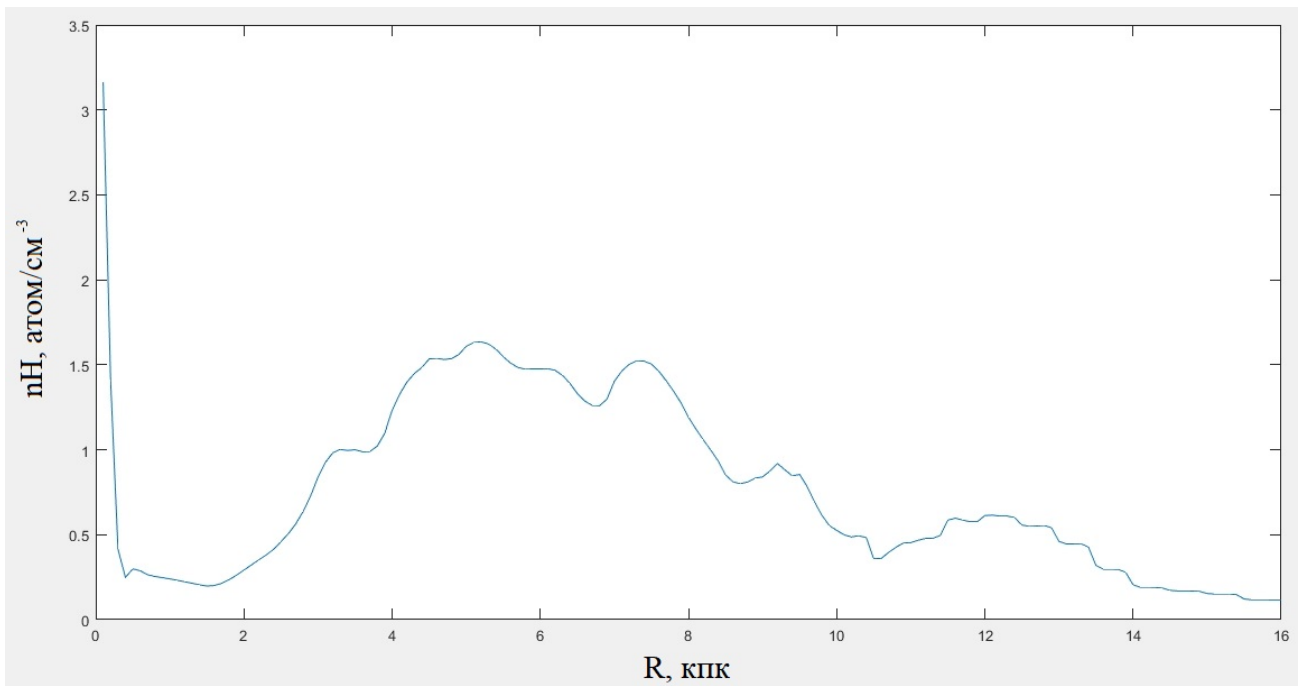


Рисунок 4.5 — Суммарная концентрация межзвёздного газа

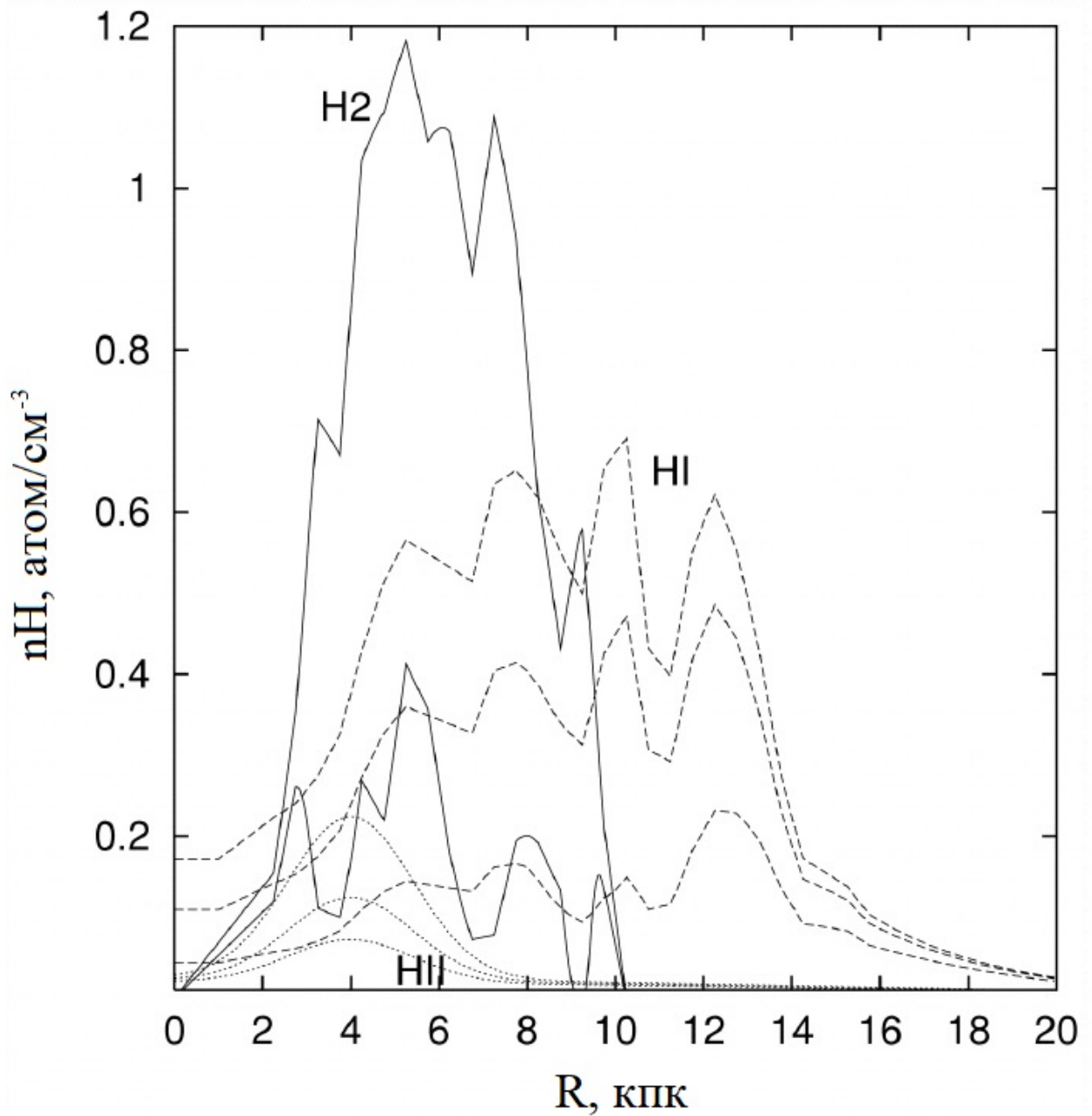


Рисунок 4.6 — Концентрации атомов молекулярного водорода H_2 ($2 \times n_{H_2}$, сплошные линии), атомарного H_I (пунктир) и ионизованного H_{II} (точечные линии) газа в Галактике. Линии показаны для расстояний $z = 0, 0.1, 0.2$ кпк от Галактической плоскости (с увеличением z концентрация уменьшается).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

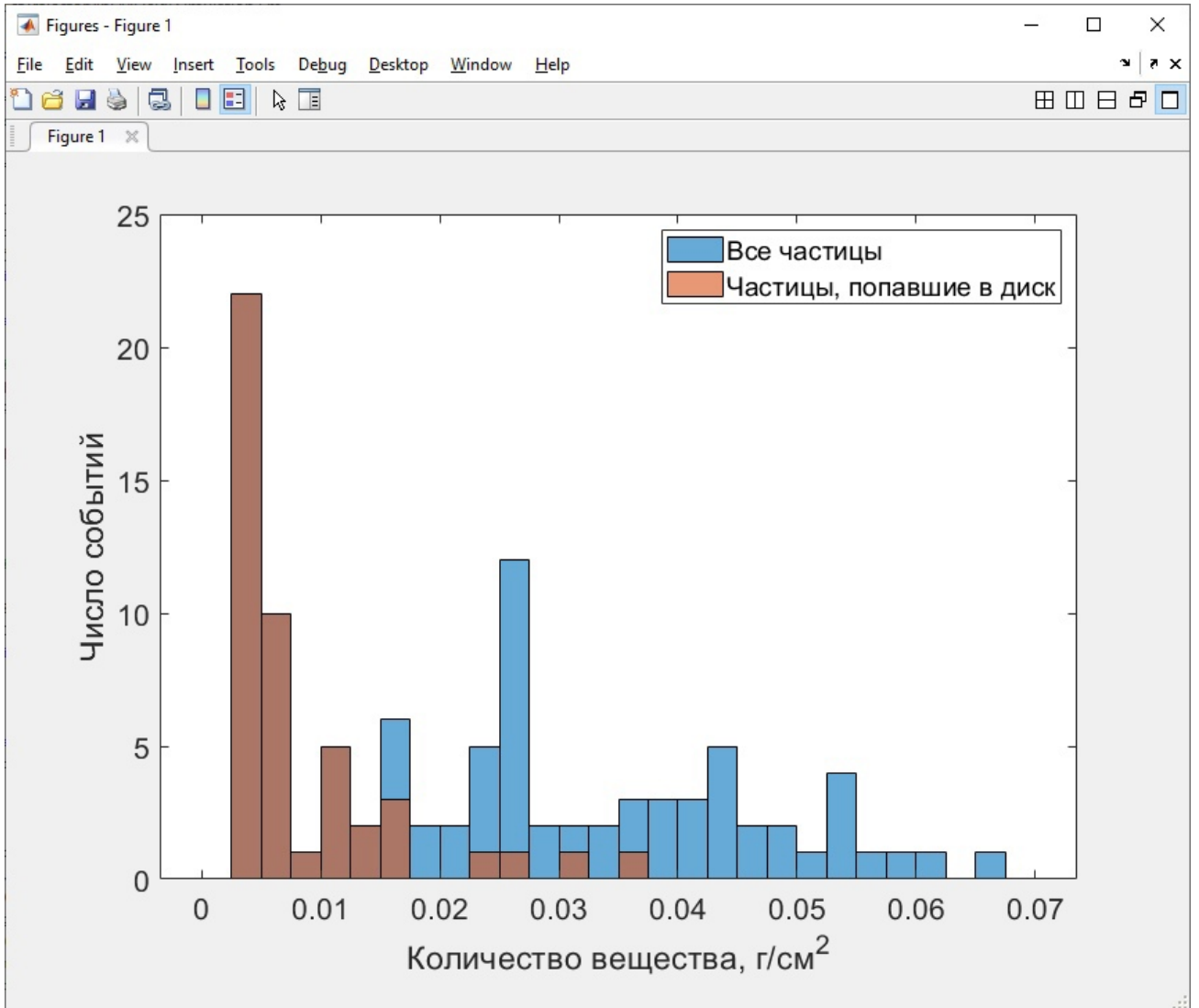


Рисунок 4.7 — Результаты трассировки частиц из шарового скопления М4 с координатами [5.9 0.3 -0.6] кпк до выполнения двух условий: 1) частица улетает за пределы галактики, координата $Z > 8$ кпк и 2) частица попадает в диск, координата $Z < 0.15$ кпк = 150 пк. Разброс в бинах обусловлен статистикой (всего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