

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	Распространение частиц в межзвёздном пространстве	6
4	Расчёт траекторий заряженных частиц в электромагнитных полях	8
4.1	Функция распределения межзвёздного вещества	9
5	Постановка задачи	13
6	Результаты	14
7	Заключение	15
	Список литературы	16

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.

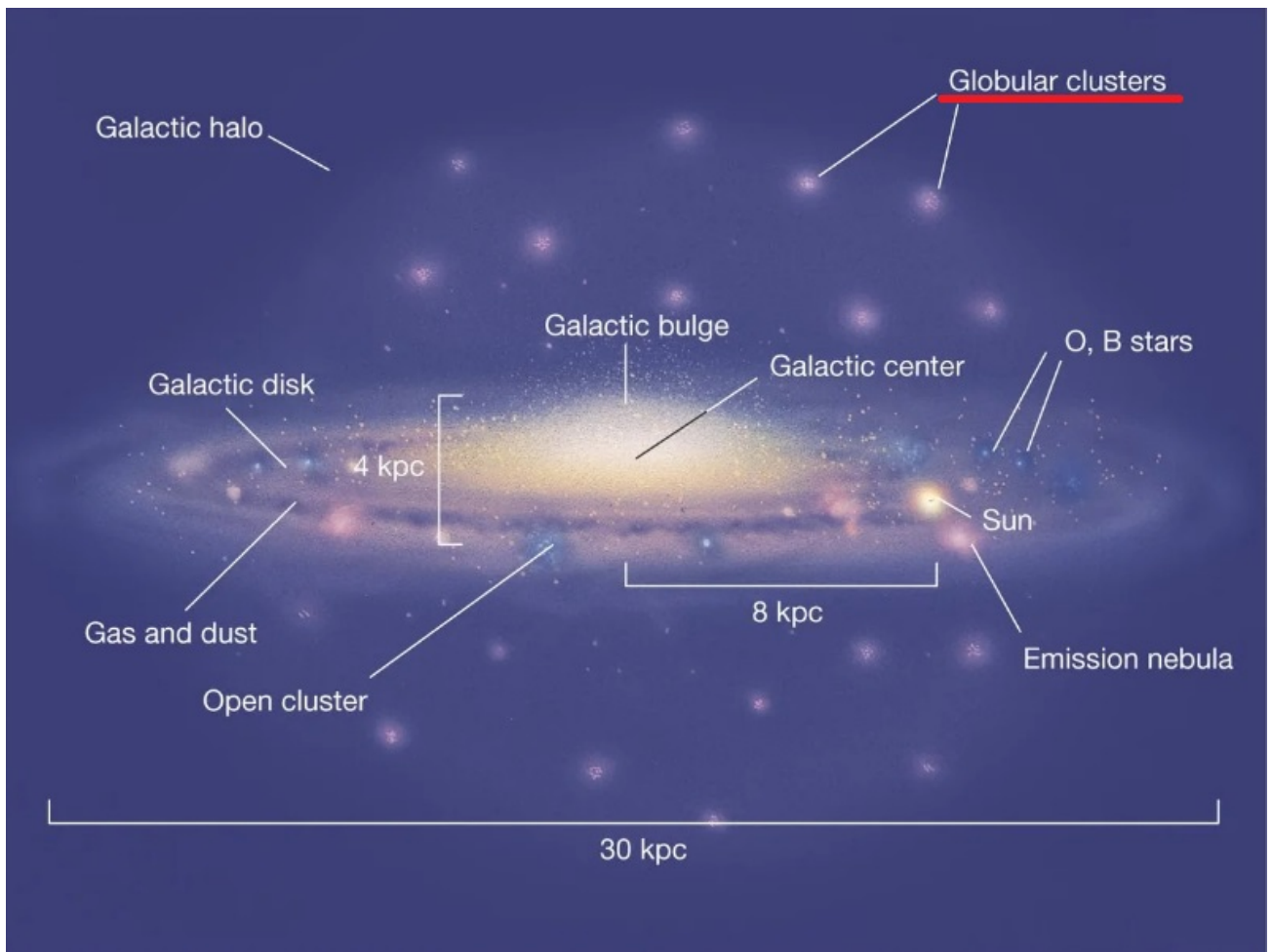


Рисунок 2.1 — Шаровые скопления звёзд в гало Галактики

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 согласуется 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. РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЧАСТИЦ В МЕЖЗВЁЗДНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

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.

Наиболее вероятным источником антиядер в галактических космических лучах считаются сверхновые антизвёзды. Взрывы сверхновых являются результатом эволюции звезд, сопровождающейся выделением высокой энергии 10^{51} эрг. Вещество от взорвавшейся антизвезды распространяется с большой скоростью. Частицы, ускоряющиеся на оболочке сверхновой, могут приобретать энергию 10^{15} эВ. По аналогии с тем фактом, что звёзды являются источником частиц в космических лучах, антизвезды должны быть основным источником античастиц. 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 таких антизвезд и является источником \overline{He}^4 в галактических космических лучах.

После рождения и ускорения в источнике, частицы космических лучей попадают в межзвездную среду, где меняют свою первоначальную траекторию, «запутываясь» в магнитных полях Галактики, и, дойдя до края, могут её покинуть. Распространение космических лучей в современном представлении носит диффузионный характер. Время удержания ГКЛ до выхода за границы Галактики обратно пропорционально коэффициенту диффузии, т.е. уменьшается с ростом энергии. Для частиц с энергией 1-2 ГэВ оно составляет $4 \cdot 10^7$ лет. За это время они успевают заполнить гало Галактики и, хотя

вещество в Галактике в основном очень разрежено, успевают пройти толщ
вещества около 10 г/см^2 . Для частиц больших энергий пройденный путь рез-
ко уменьшается и, например, при энергии 10 ТэВ составляет $0.1 - 0.4 \text{ г/см}^2$,
а время жизни $4 \cdot 10^6$ лет.

4. РАСЧЁТ ТРАЕКТОРИЙ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЯХ

В настоящее время предпринимаются попытки численно определить потоки галактических КЛ. Для решения этой задачи требуется знание структуры и размеров Галактики, расположения и мощности источников, местоположения Солнечной системы и свойств межзвездной среды. Распространение КЛ в Галактике серьезным образом определяется структурой магнитных полей. Силовые линии регулярного поля лежат в галактической плоскости и приблизительно идут вдоль спиральных рукавов. Магнитное поле существует также и в гало, но его структура точно не известна.

Пакет программ [Голубков В.С. и др.] для расчёта траекторий заряженных частиц в электромагнитных полях, включая его адаптацию для использования при трассировке частиц в магнитном поле Галактики, позволяет использовать реализованный и адаптированный метод для расчёта траекторий галактических и внегалактических космических лучей в Галактике, включая область гало. Для удобства использования реализованного метода создан программный пакет с возможностью гибкой настройки различных параметров частиц, магнитного поля, а также предусмотрена возможность задания среды, с которой возможно взаимодействие космических лучей. 4.1. На вход `GetTrajectoryInEMField` 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 [7] описана используемая функция `GetMWBfield`, которая задаёт топологию магнитного поля Галактики. С помощью этой функции моделируются траектории частиц с учётом влияния магнитного поля и оценивается доля частиц от первоначального потока, способная проникнуть в диск Галактики.

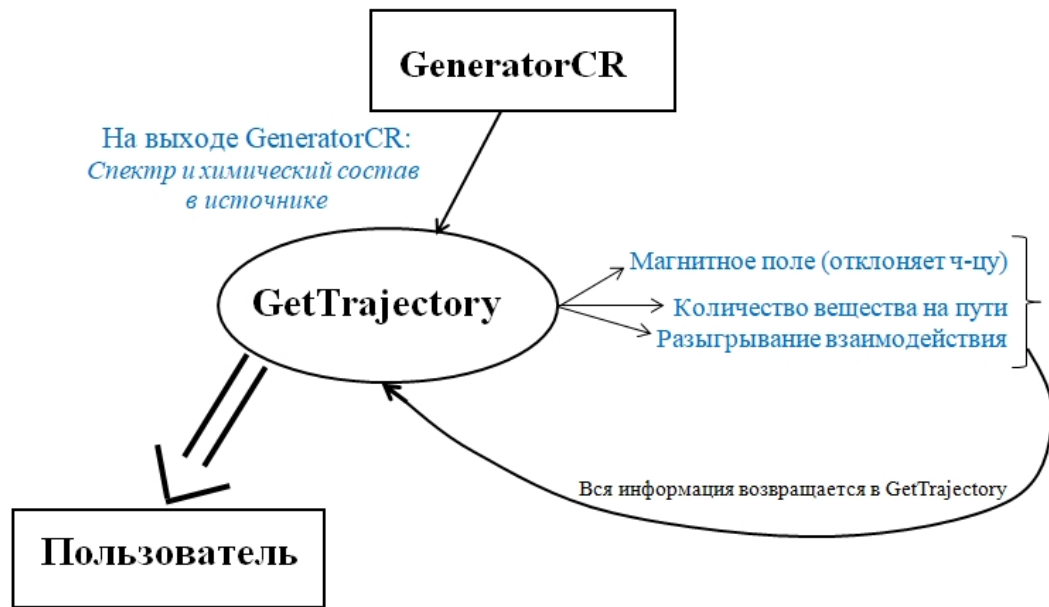


Рисунок 4.1 — Схема работы пакета программ по моделированию траекторий заряженных частиц

4.1. ФУНКЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МЕЖЗВЁЗДНОГО ВЕЩЕСТВА

Доля различных компонент космических лучей, образованных и ускоренных на ударных волнах после вспышек сверхновых, при распространении в межзвездной среде меняется в результате ядерных реакций с межзвездным газом. Кроме того, рождаются вторичные частицы или античастицы, первоначально отсутствующие в источниках, например, позитроны, антипротоны, антидейтроны или антигелий. Чтобы учитывать такое влияние среды на движение частиц в Галактике, в вышеупомянутом программном пакете необходимо использовать функцию распределения плотности вещества. Для её построения была взята аналитическая модель распределения межзвёздного вещества в Галактике [8]. Распределения этой модели можно увидеть на 4.2. Входными параметрами функциональной программы являются координаты в Галактике, а выходными - суммарная концентрация ионизованного, атомарного и молекулярного водорода в декартовой системе координат.

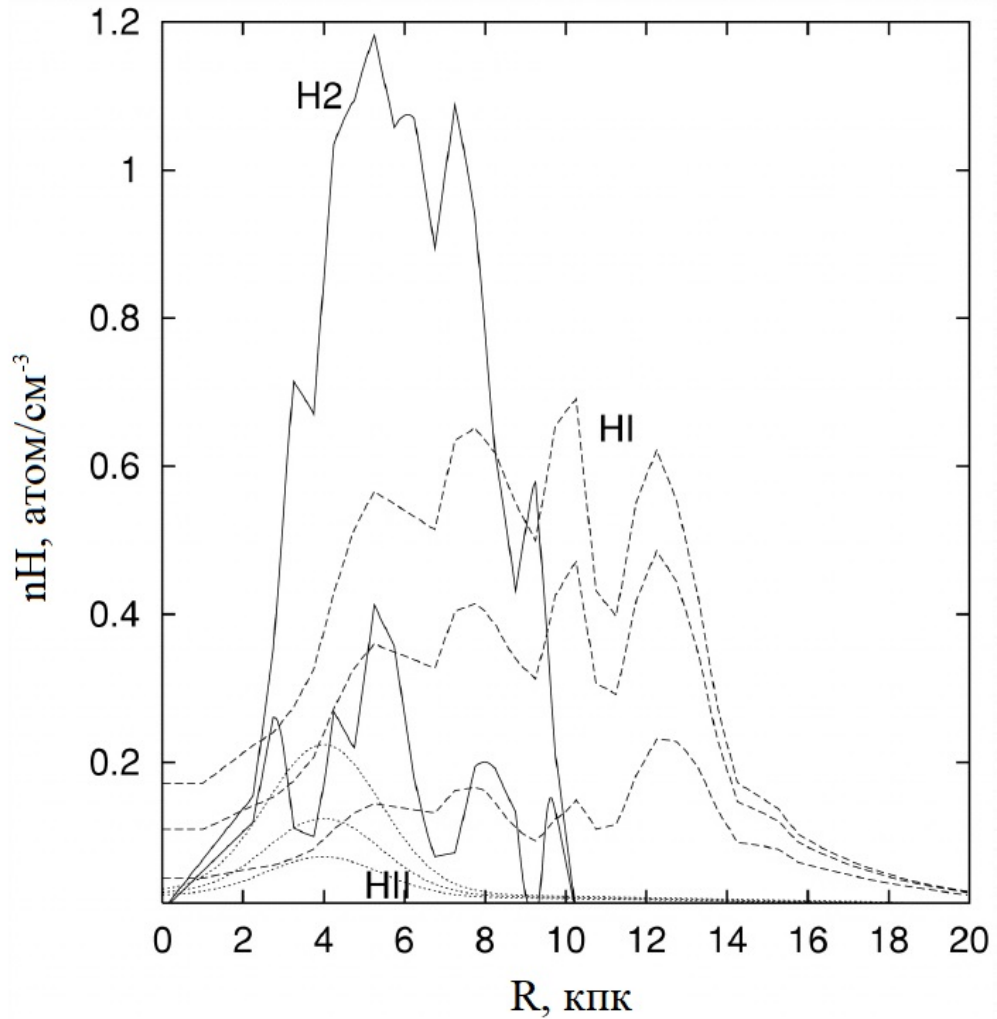


Рисунок 4.2 — Концентрации атомов молекулярного водорода H_2 ($2 \times n_{H_2}$, сплошные линии), атомарного H_I (пунктир) и ионизованного H_{II} (точечные линии) газа в Галактике. Линии показаны для расстояний $z = 0, 0.1, 0.2$ кпк от Галактической плоскости (с увеличением z концентрация уменьшается). На расстоянии $z = 0.2$ кпк концентрация молекулярного водорода очень мала и поэтому не показана

Распределения различных компонент газа, полученные с помощью составленной функции для плоскости $z = 0.1$ изображены на [4.3](#), [4.4](#), [4.5](#), [4.6](#).

На основе полученных графиков можно сделать вывод, что составленная программа работает верно, так как распределение концентрации совпадает с данными [8]. Таким образом, функциональная программа эффективна при её использовании для моделирования траекторий частиц с учётом влияния межзвёздной среды.

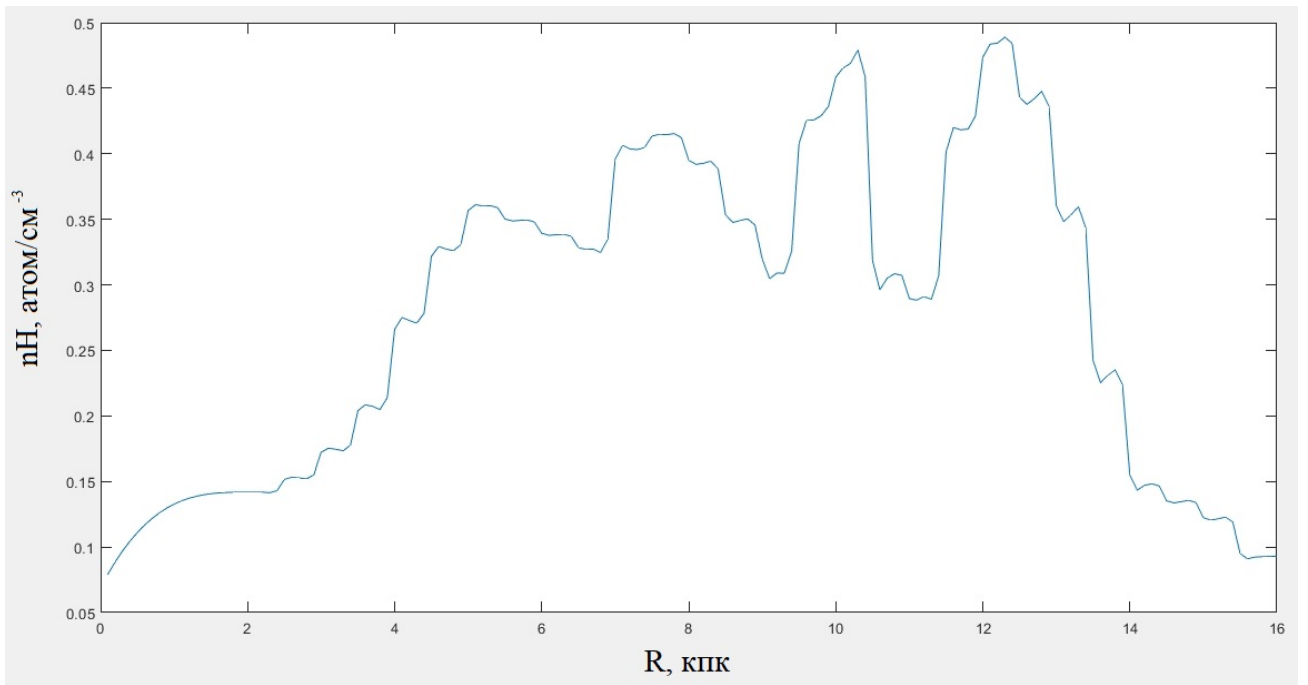


Рисунок 4.3 — Концентрация атомов атомарного водорода

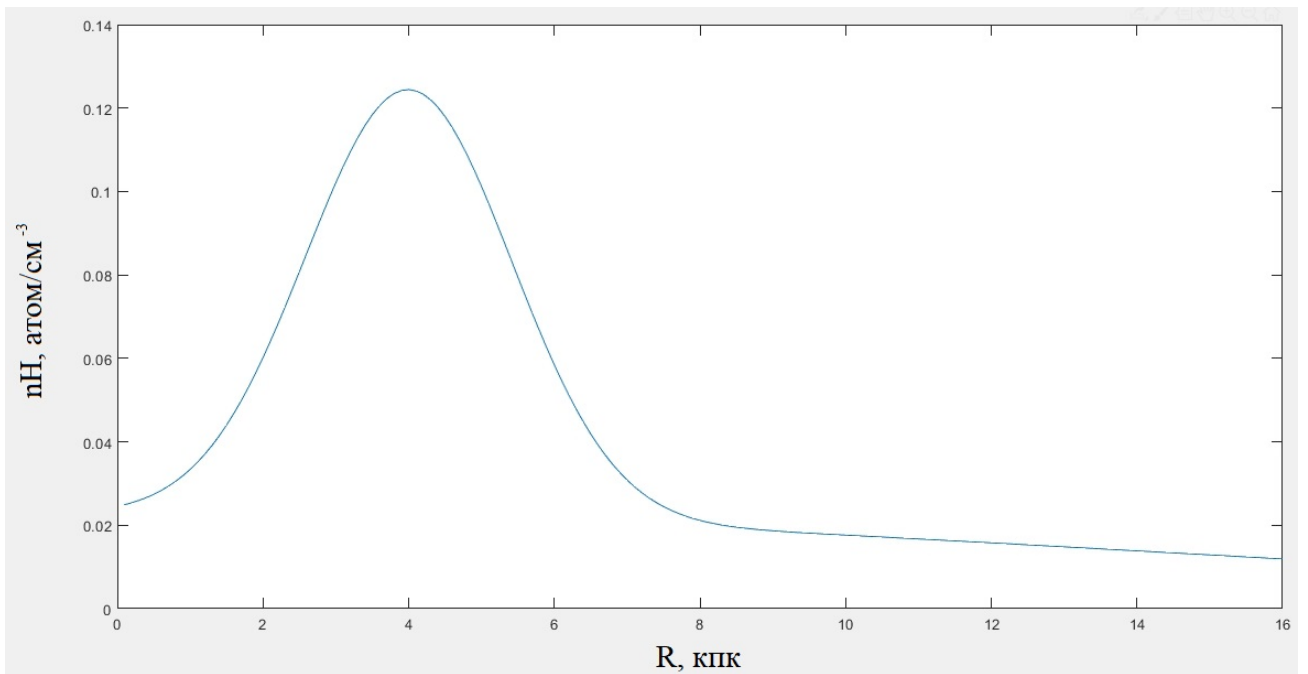


Рисунок 4.4 — Концентрация атомов ионизованного водорода

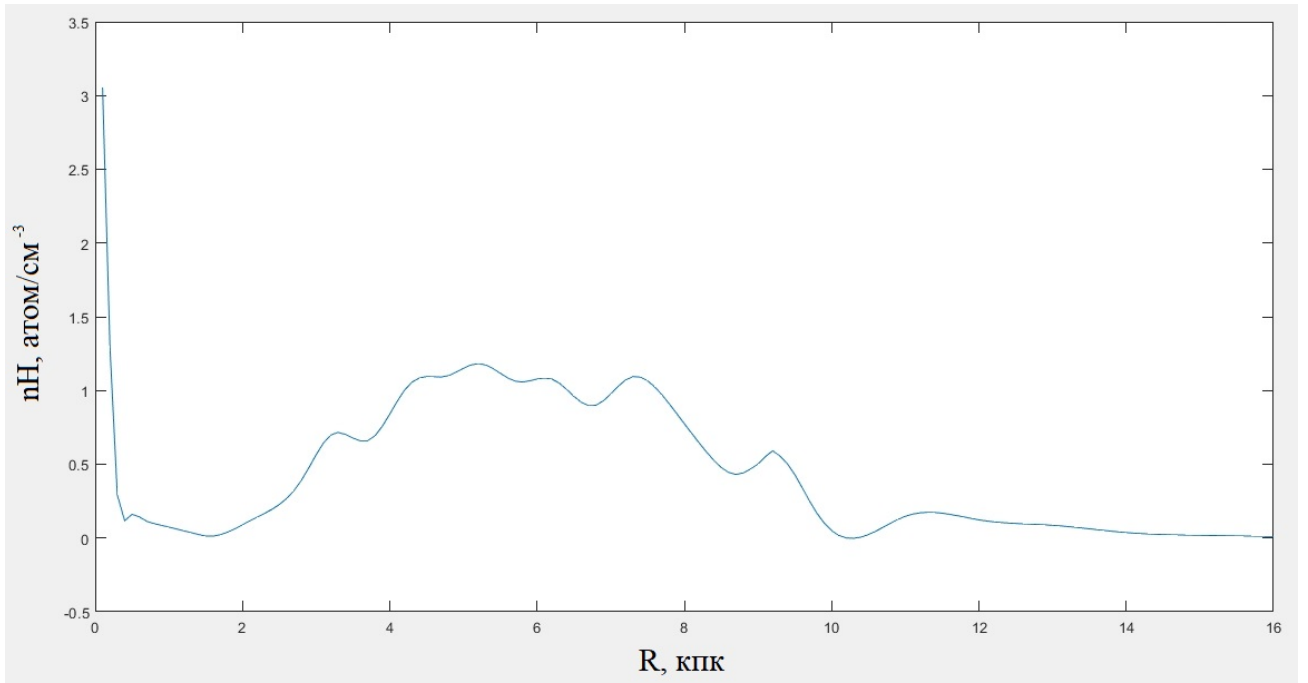


Рисунок 4.5 — Концентрация атомов молекулярного водорода

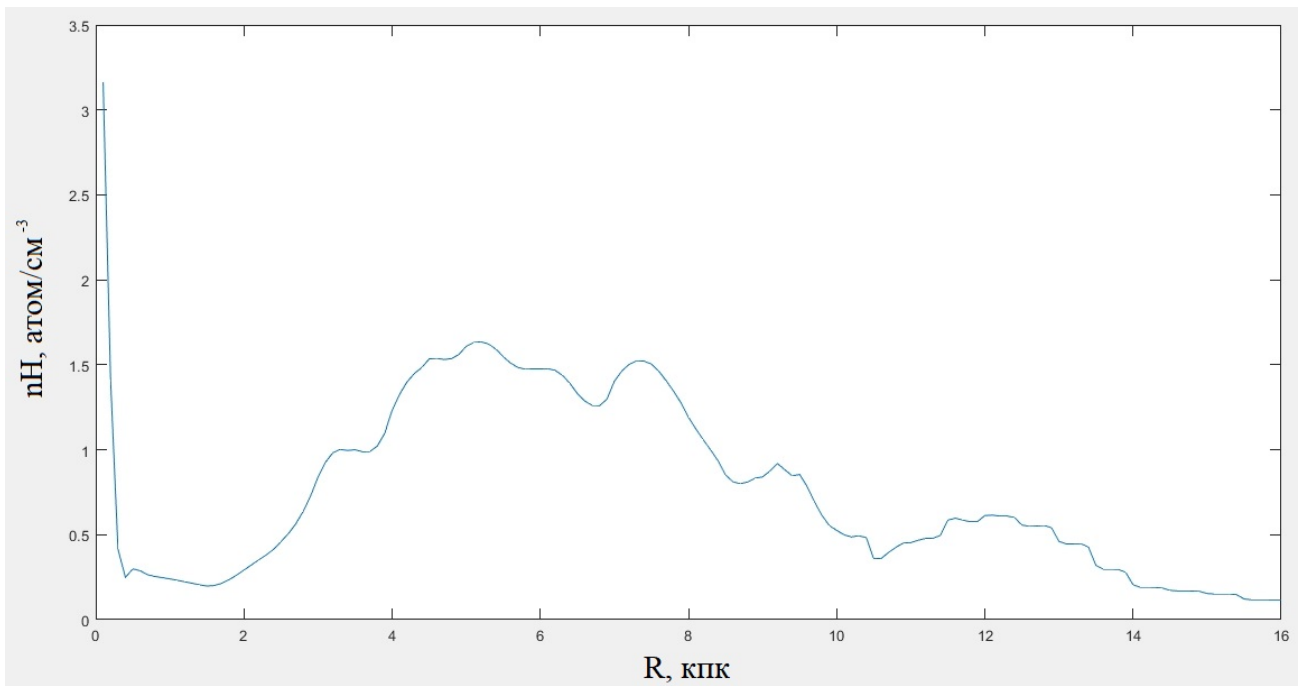


Рисунок 4.6 — Суммарная концентрация межзвёздного газа

5. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В программном пакете для моделирования шарового скопления используется `GeneratorCR` (4.1) - 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 (5.1) (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 траекторий заряженных частиц, необходимо сократить выборку - знать 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. Таким образом, необходимо было создать базу данных, к которой можно обращаться при запуске заданного количества частиц.

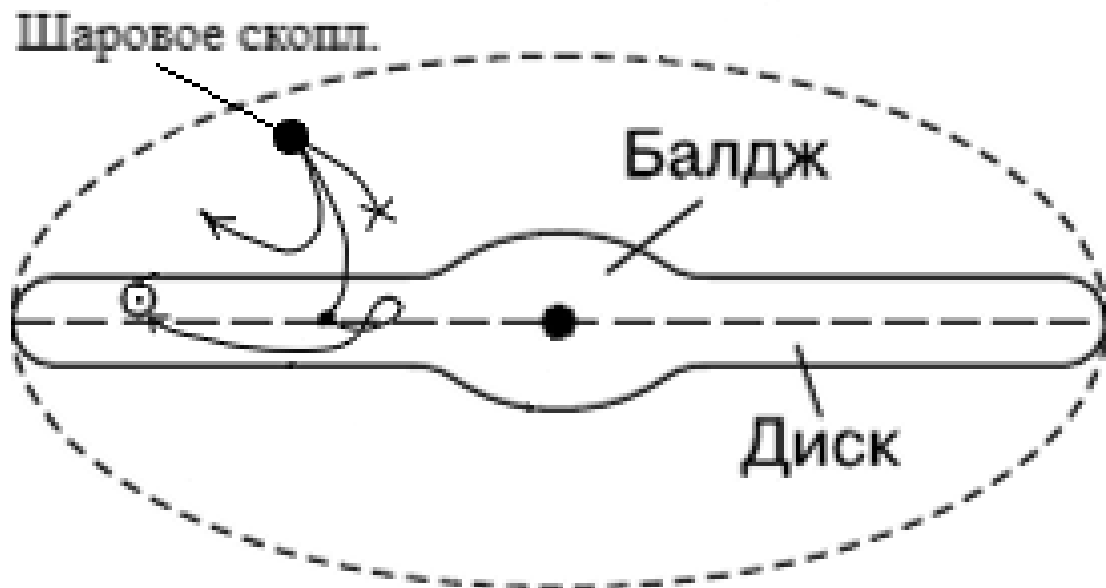


Рисунок 5.1 — Варианты траекторий частиц из шарового скопления

6. РЕЗУЛЬТАТЫ

В рамках научно-исследовательской работы была проведена трассировка антиядер гелия от скопления М4, гипотетически состоящего из антизвёзд, к плоскости галактического диска. Была создана соответствующая база данных с приемлемыми диапазонами значений временного и пространственного шагов при различных количествах частиц. Полученный результат будет использован для трассировки частиц в новом магнитном поле, учитывающим неоднородности, а в дальнейшем и для интерпретации экспериментальных данных о потоках антиядер, полученных приборами PAMELA и AMS-02 на околоземной орбите.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Используя полученные данные и произведя трассировку частиц с обновлёнными функциями, в скором времени мы сможем узнать, 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. — 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. — 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.