



Национальный исследовательский ядерный университет
«МИФИ»

Институт ядерной физики и технологий
Кафедра физики элементарных частиц №40



Выпускная квалификационная работа студента на тему:

Численный расчёт распространения антиядер в межзвёздном пространстве

Студентка гр. Б18-102:

А. В. Кравцова

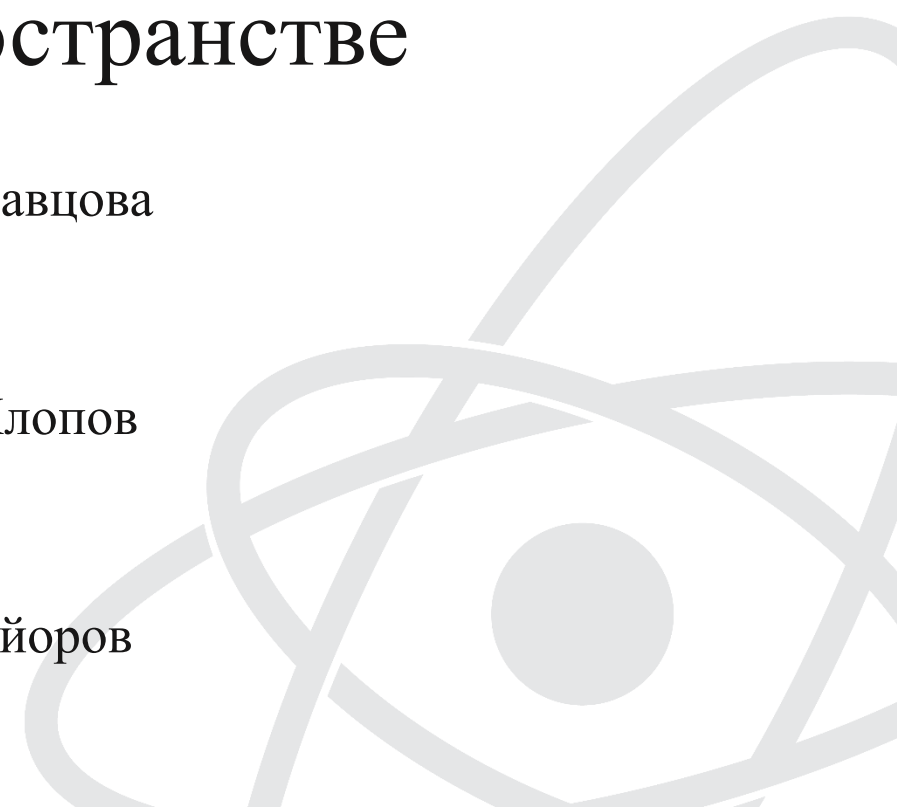
Научный руководитель,
д.ф.-м.н., проф.:

М. Ю. Хлопов

Научный консультант,
к.ф.-м.н., доцент:

А. Г. Майоров

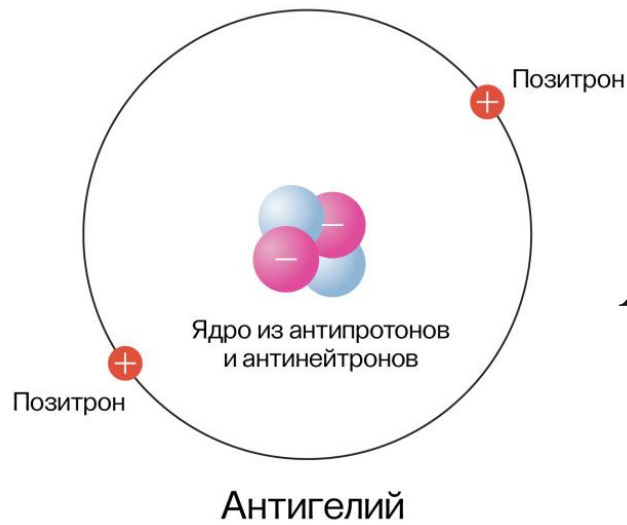
г. Москва, 2022



Актуальность работы: в эру современных прецизионных экспериментов, таких как BESS, PAMELA и AMS-02 шаровые скопления антизвёзд предлагают новый интересный взгляд на происхождение космических античастиц и интерпретацию их измерений.

Целью работы является проверка гипотезы существования шарового скопления антизвезд в гало Галактики, которое может являться источником антиядер в потоке космических лучей, посредством оценки доли долетающих до Солнечной системы антиядер гелия от общего потока антигелия в Галактических космических лучах.

Введение



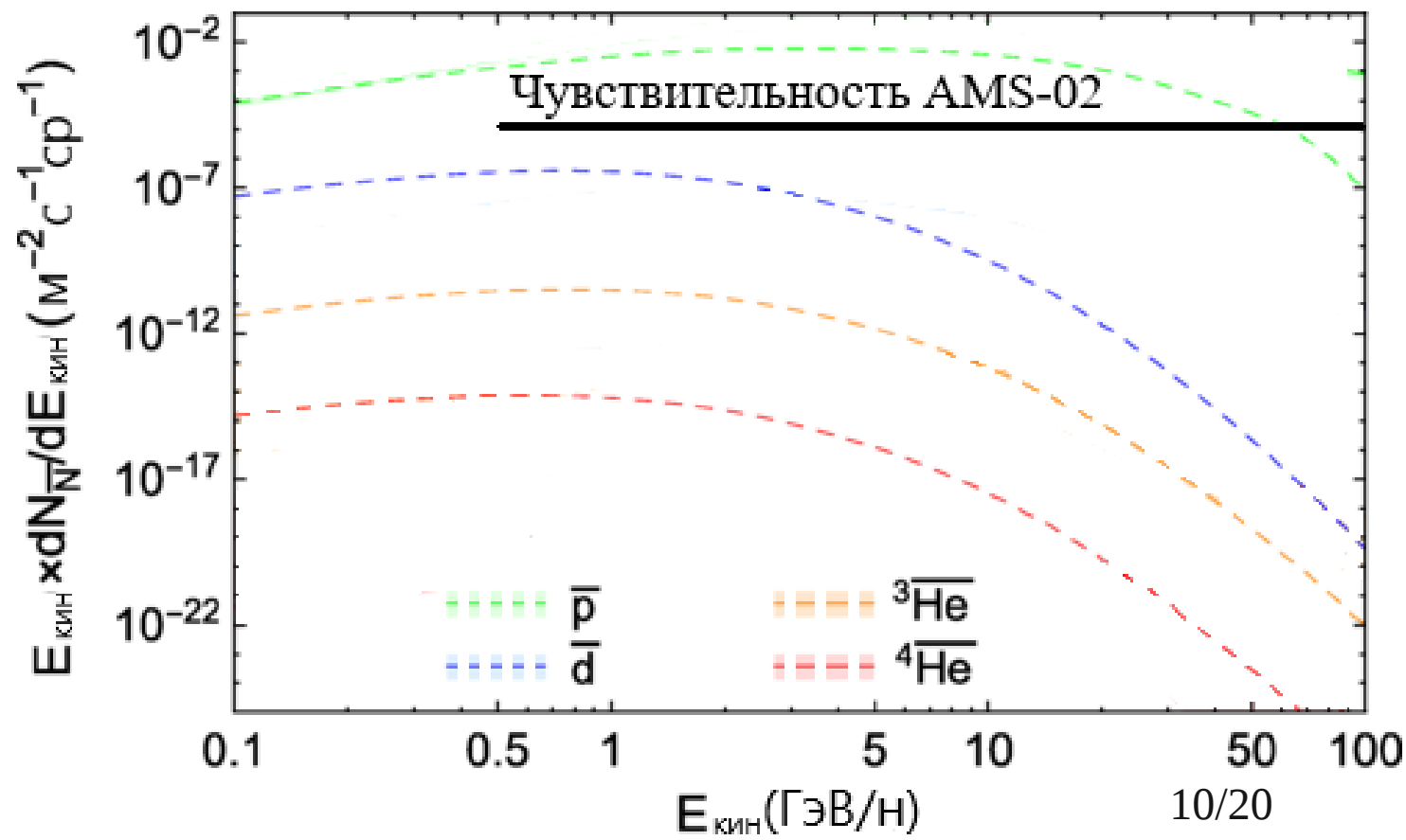
Антиматерия в космическом пространстве может быть следующего происхождения:

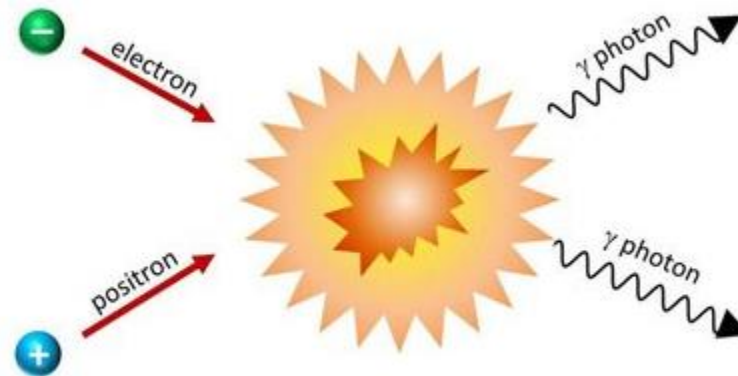
- ❖ Первичное антивещество (может существовать в виде макроскопических объектов антиматерии).
- ❖ Вторичное антивещество (столкновение высокоэнергетичной ядерной составляющей космических лучей с межзвездным газом или с остатком оболочки сверхновой)
- ❖ Антивещество от гипотетических источников (испарение первичных чёрных дыр или распад/аннигиляция предполагаемых частиц скрытой массы)

Теоретический спектр космических лучей вторичного происхождения для $\bar{p}$ (зеленый), $\bar{d}$ (синий), ${}^3\overline{\text{He}}$ (оранжевый) и ${}^4\overline{\text{He}}$ (красный)



В настоящее время на Международной космической станции проводится эксперимент AMS-02 по изучению характеристик КЛ. Одна из его задач – поиск антиядер тяжелее антипротона, включая антигелий. Его регистрация выше приведённых значений указала бы на существование дополнительного источника первичного антивещества, поскольку значение теоретического расчёта спектра для вторичного антигелия мало и не превосходит $10^{-16} - 10^{-12}$.

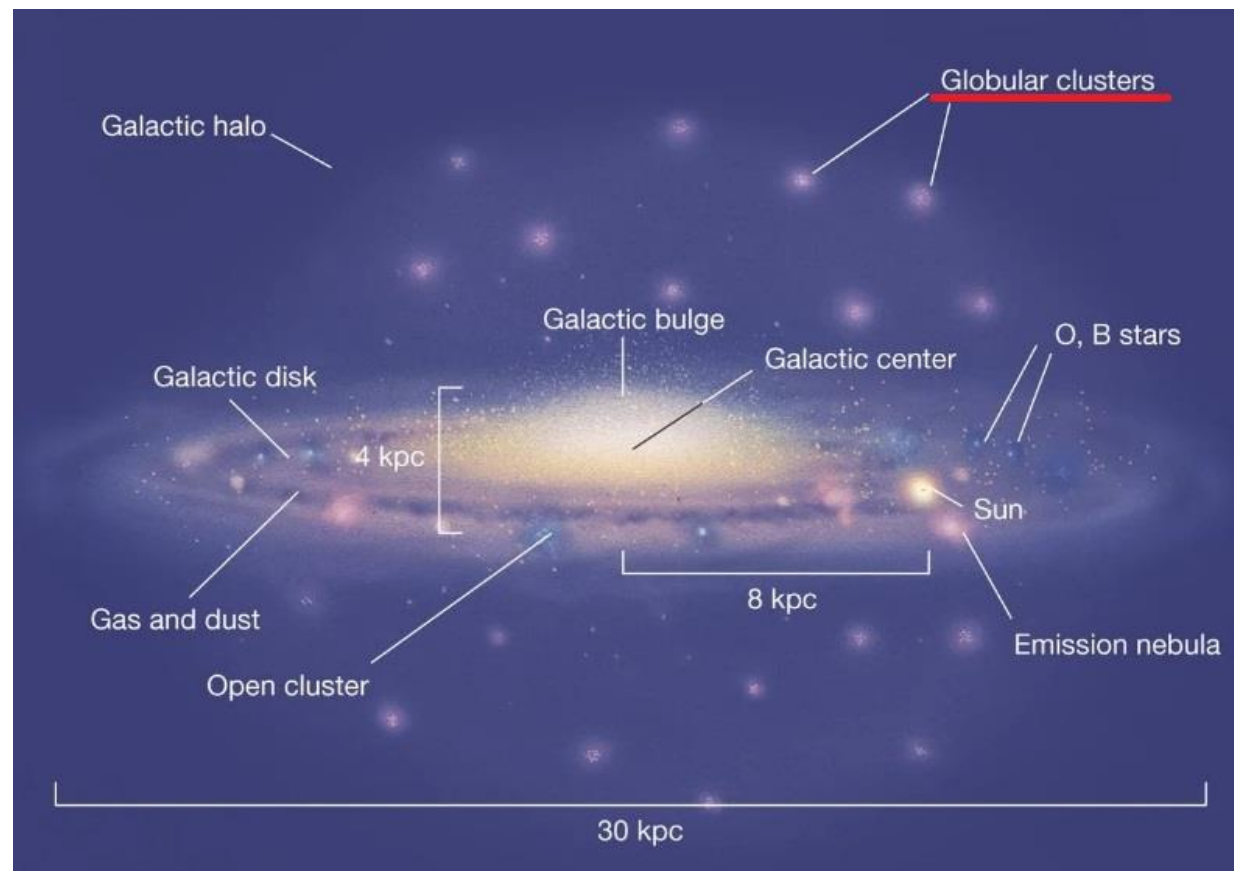




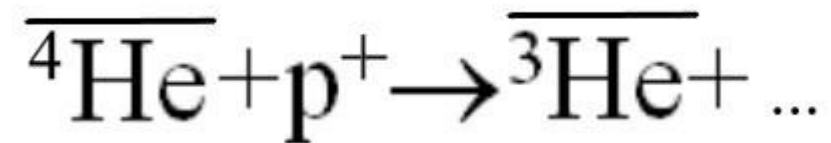
Антизвезда сможет образоваться только в окружении антиматерии масштаба по крайней мере шарового скопления, иначе окружающее барионное вещество проаннигилирует с антивеществом звезды. В то время как большой размер доменов ограничен наблюдаемыми потоками γ -излучения.

Шаровые скопления

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



Доля различных компонент космических лучей (КЛ) при распространении в межзвёздной среде меняется в результате реакций с межзвёздным газом. Кроме того, рождаются вторичные частицы или античастицы, первоначально отсутствующие в источниках.



Для решения этой задачи требуется знание структуры и размеров Галактики, расположения и мощности источников, местоположения Солнечной системы и свойств межзвёздной среды.

Аналитическая модель межзвёздной среды

Концентрация молекулярного водорода H_2 в молекулах/ см^3 :

$$n_{\text{H}_2}(R, z) = 3.24 \times 10^{-22} X_{\text{CO}} \epsilon_0(R) e^{-\ln 2 (z - z_0)^2 / z_h^2}$$

Здесь $\epsilon_0(R)$ (K 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 (даются в приложении в таблице 1), и $X_{\text{CO}} = N_{\text{H}_2} / W_{\text{CO}} = 1.9 \times 10^{20}$ (молекул $\text{см}^{-2} \text{K}^{-1} \text{км}^{-1} \text{сек}$) – фактор конверсии интенсивности излучения CO вдоль луча зрения в количество молекул молекулярного водорода.

Относительное распределение атомарного водорода H_I (см^{-3}):



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

Здесь $Y(R)$ - радиальное распределение объёмной плотности из приложения, таблица 2 ($R < 16$ кпк), $n_{\text{GB}} = 0.33 \text{ см}^{-3}$ и $n_{\text{DL}} = 0.57 \text{ см}^{-3}$ - концентрации атомов H_I в диске на расстоянии $4 \text{ кпк} < R < 8 \text{ кпк}$. Распределение по z интерполируется между 8 кпк 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 $R > 16 \text{ кпк}$ используется экспоненциальное затухание.

Распределение ионизованного водорода H_II (см^{-3}):

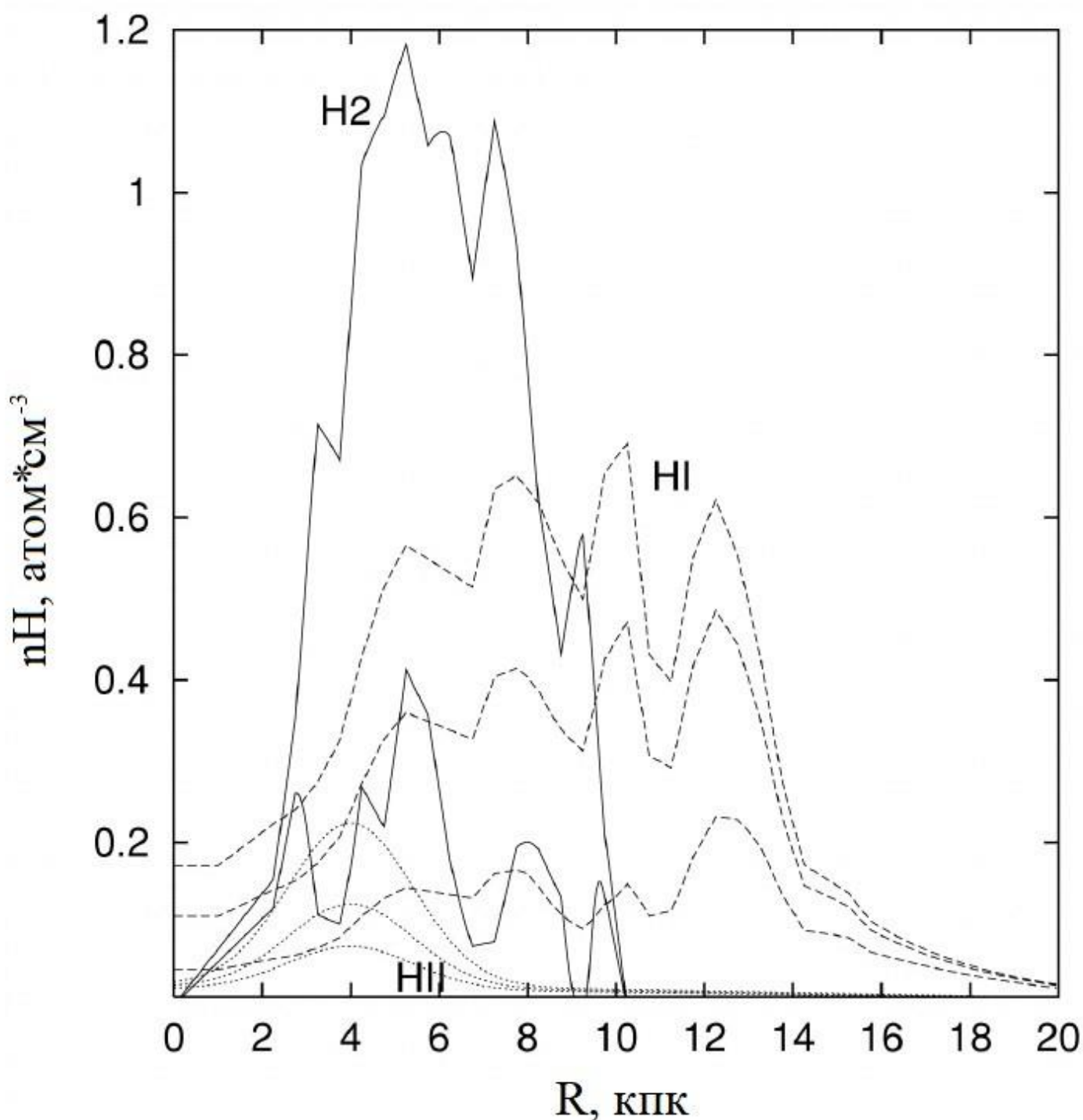
$$n_{\text{HII}}(R, z) = \sum_{i=1,2} n_i e^{-|z|/h_i - (R - R_i)^2 / a_i^2}$$

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

Межзвёздная среда в Галактике

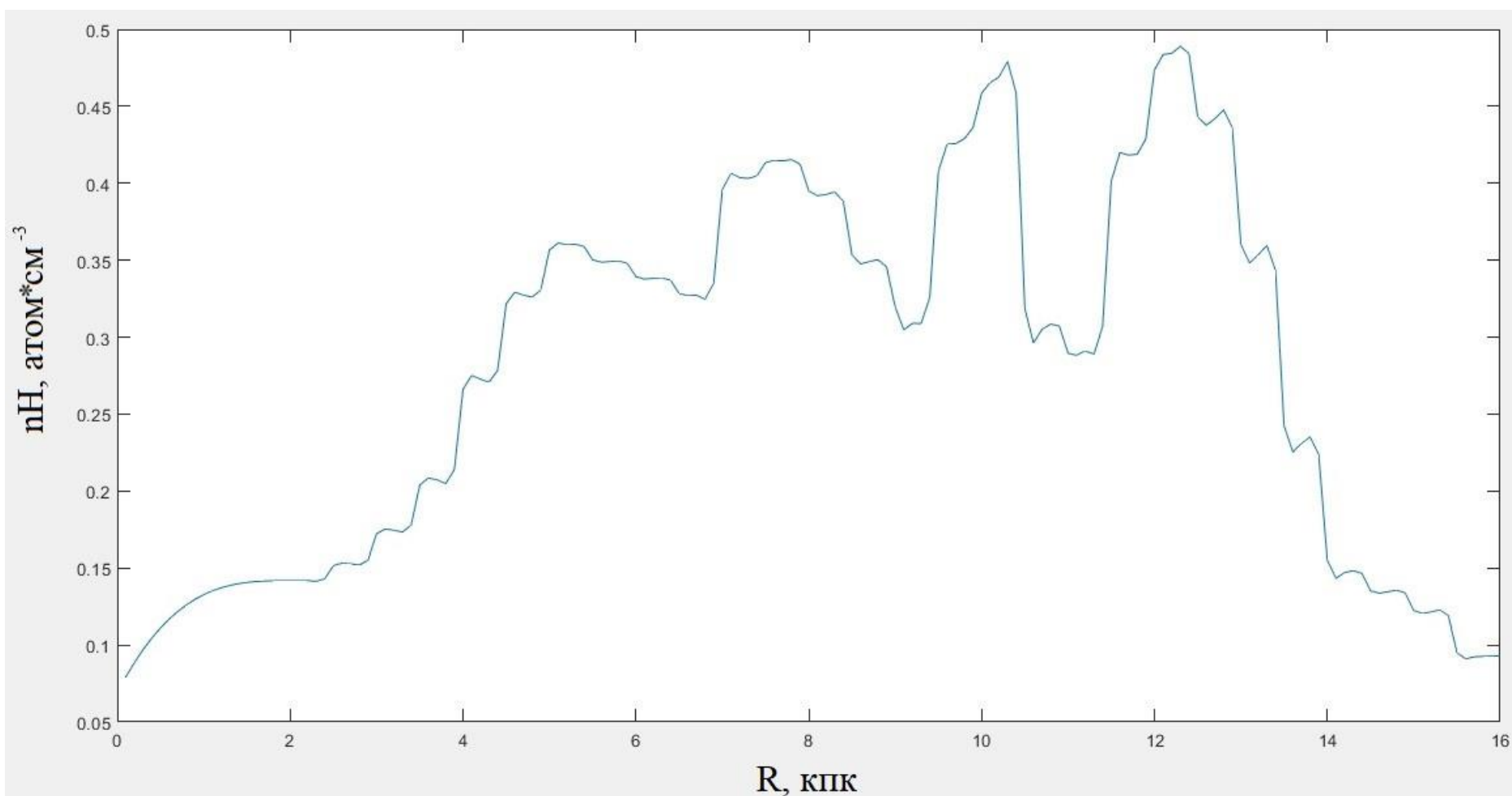
Распределения различных компонент газа:

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



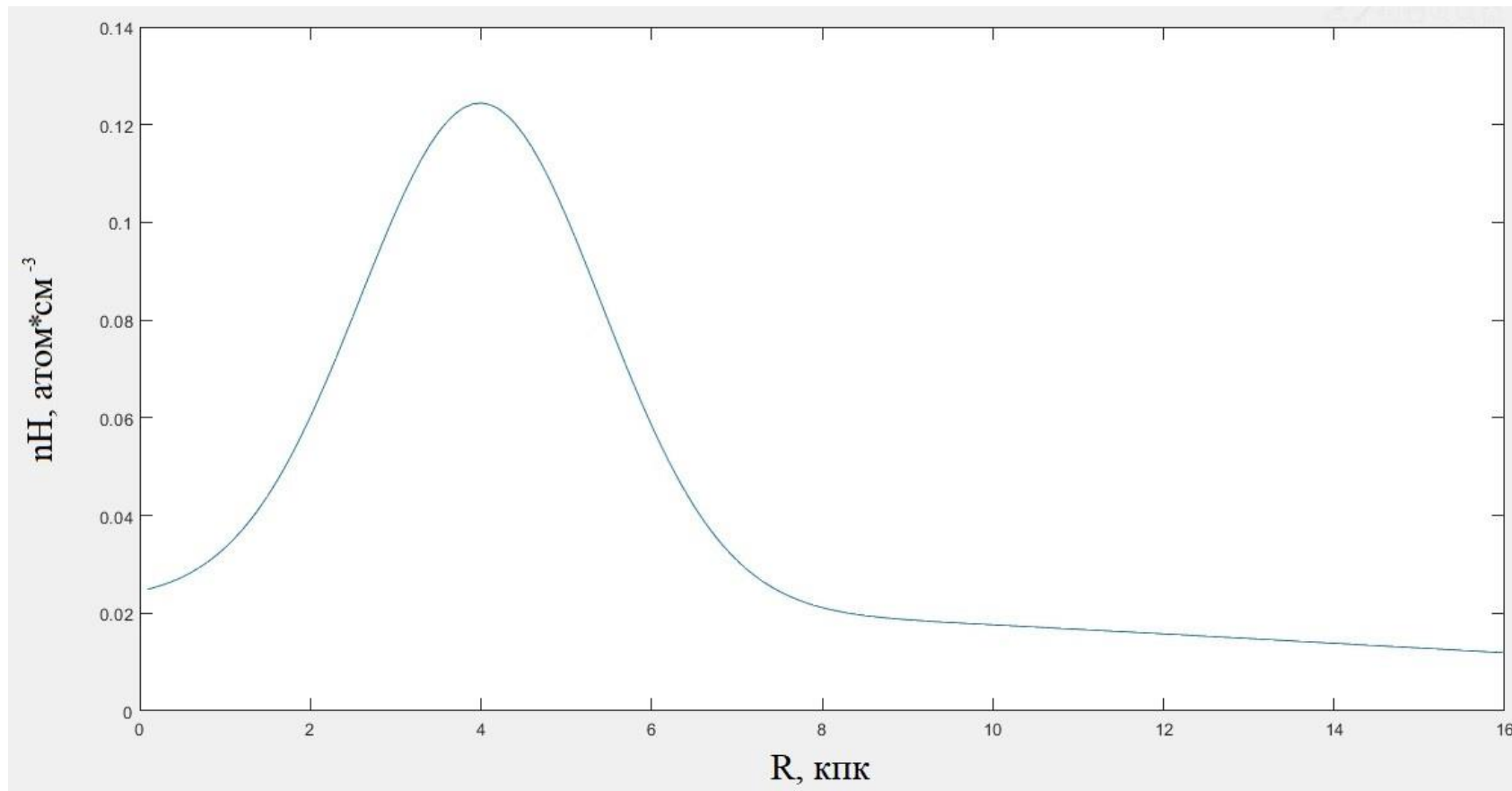
Концентрация атомов атомарного водорода для высоты над плоскостью галактического диска $Z = 0.1$ кпк

Атомарный водород распределяется по всей Галактике. Он может быть везде, кроме центра, в том числе и на периферии, где нет звёзд и излучений



Концентрация атомов ионизованного водорода для высоты над плоскостью галактического диска $Z = 0.1$ кпк

Ионизованный водород в основном концентрируется ближе к центру Галактики (но не в самом центре). 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.



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



Молекулярный водород также в основном концентрируется ближе к центру Галактики (но не в самом центре). Это объясняется тем, что H_2 образуется там, где есть микрочастицы для его образования и меньший уровень излучения. Это области, где звёзды проэволюционировали, взорвались, а новые рождаются не так быстро.

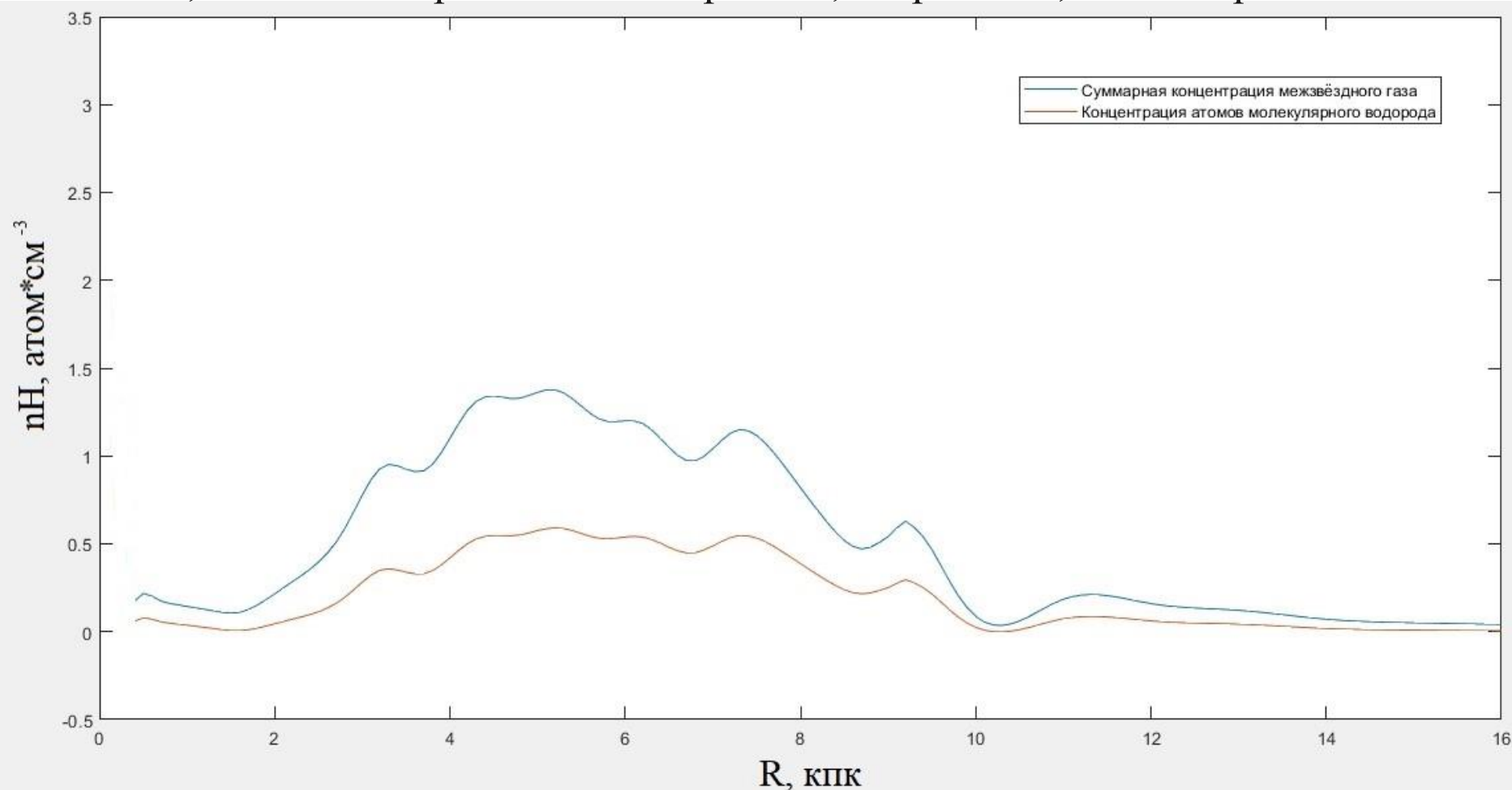
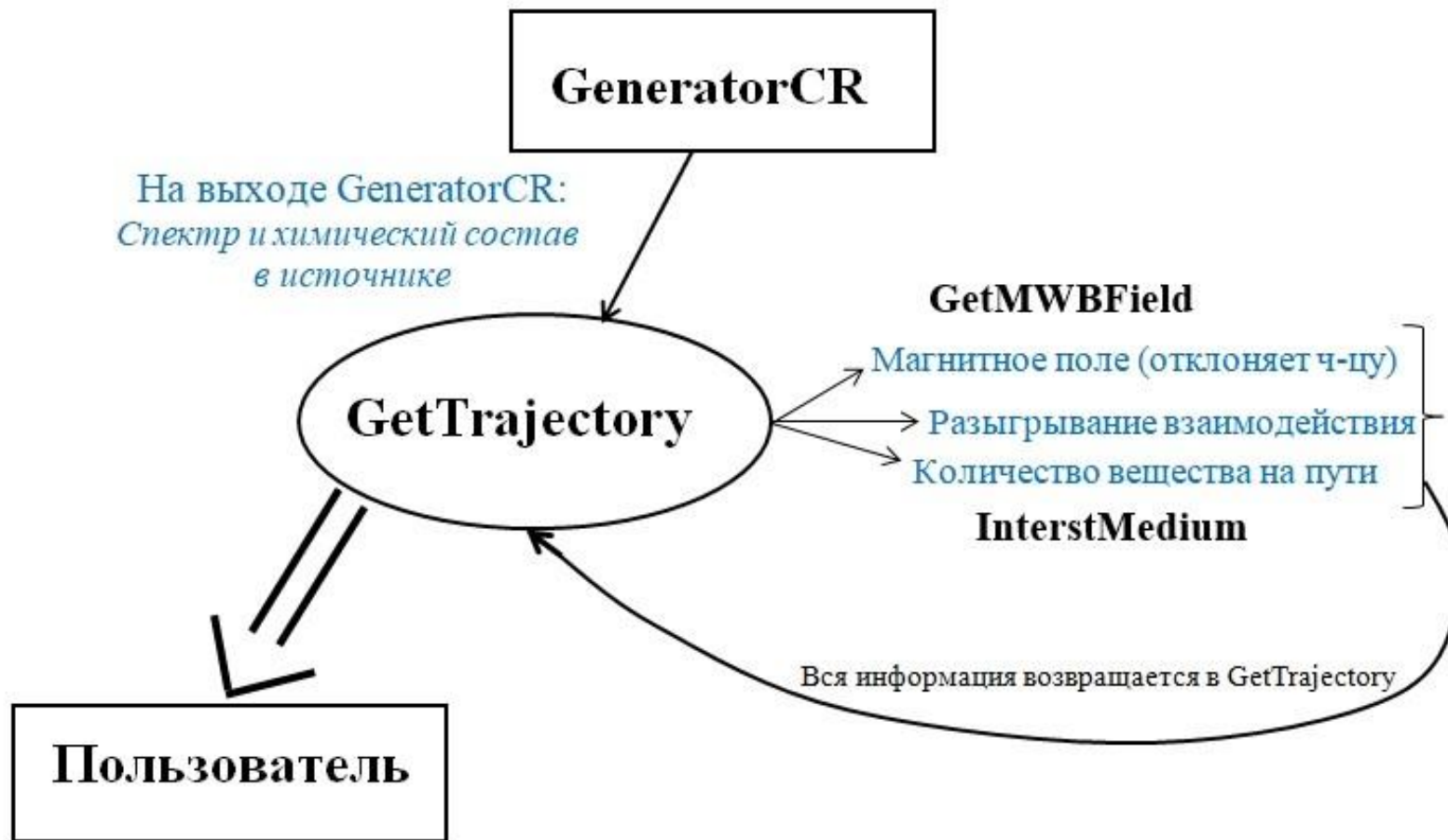


Схема работы пакета программ GetTrajectoryInEMField по моделированию траекторий космических частиц



GeneratorCR — функция источника КЛ, генерирующая изотропный поток частиц из заданной точки Галактики.

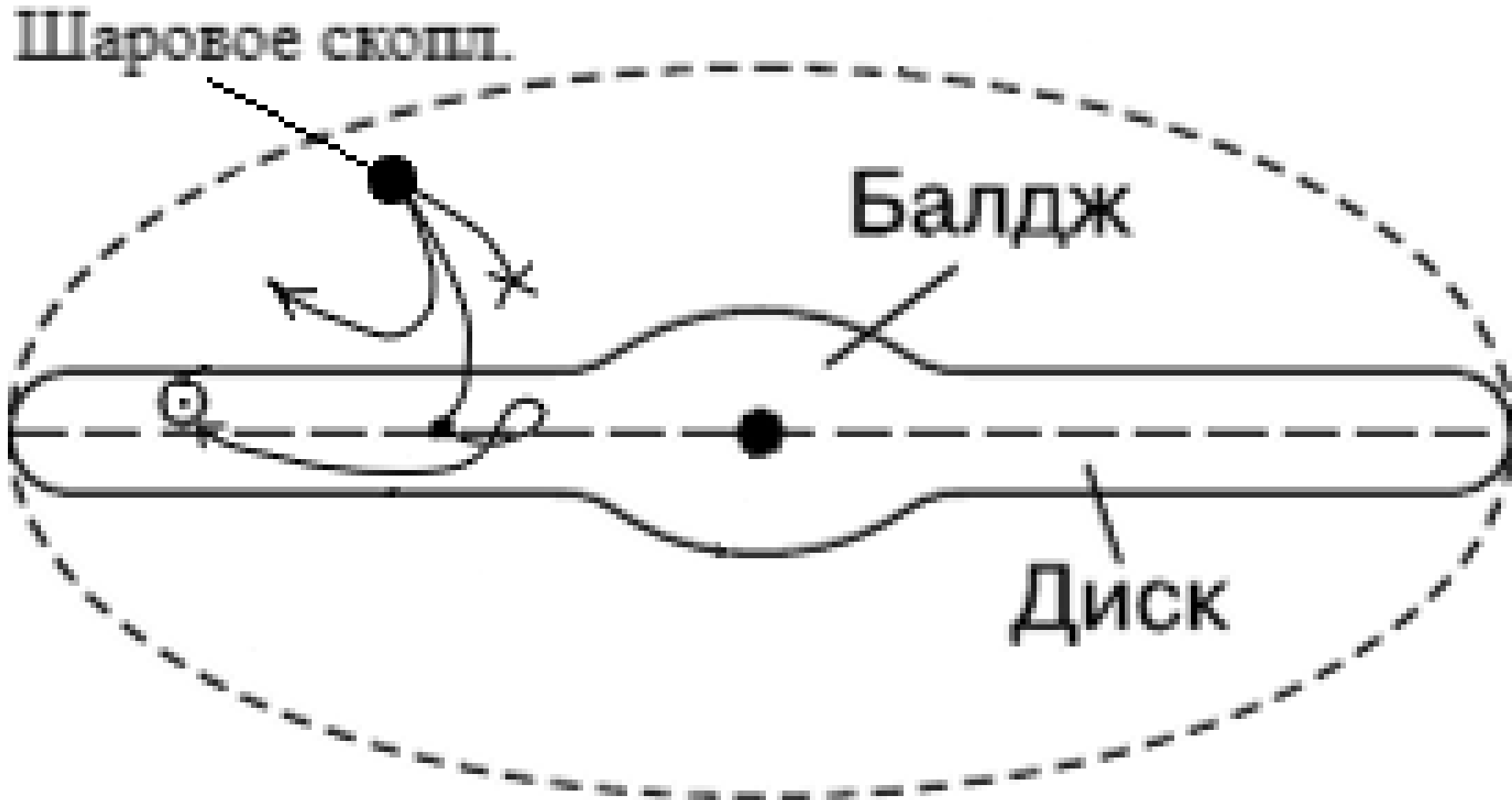
GetTrajectory на вход принимает следующие начальные условия:

- координаты источника
- тип частиц
- импульс частиц
- временной шаг

В программу заложен также учёт эффектов аннигиляции, например, антигелия от источника с протонами межзвёздной среды.

Варианты траекторий частиц из шарового скопления:

- Слева направо: 1) частица отклонилась магнитным полем Галактики;
2) частица проникла в диск и долетела до Солнечной системы;
3) частица неупруго провзаимодействовала с межзвёздной средой



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

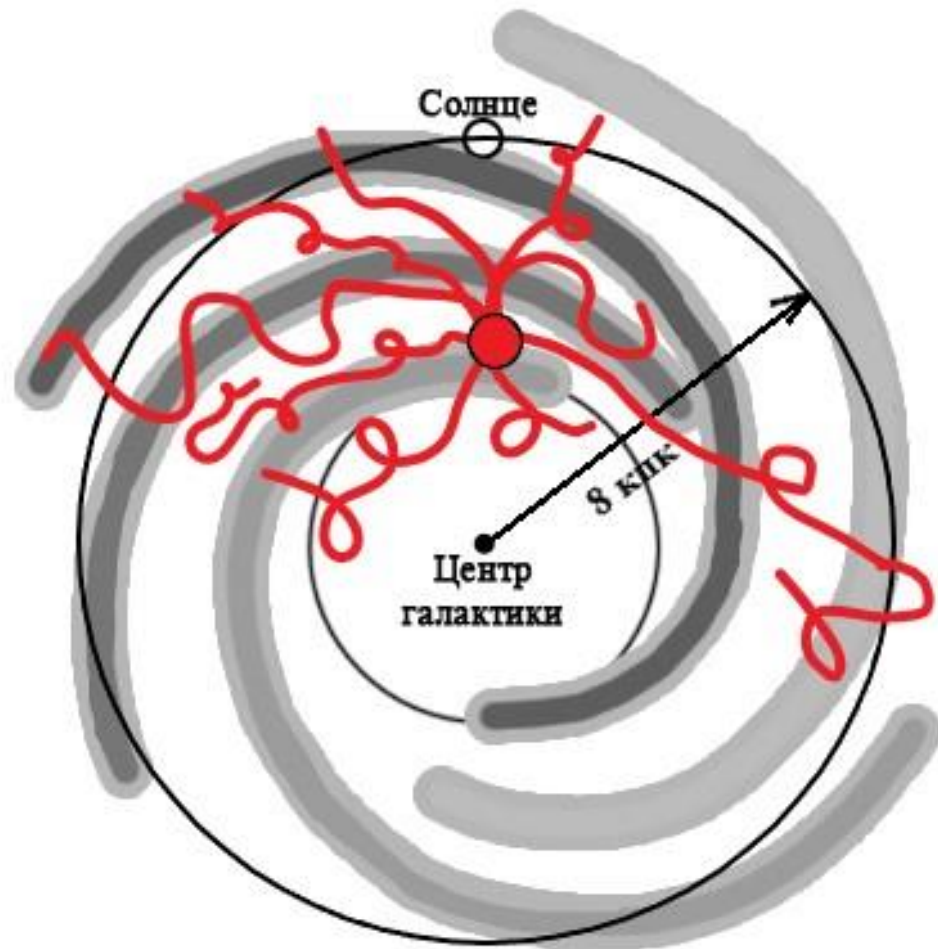


```

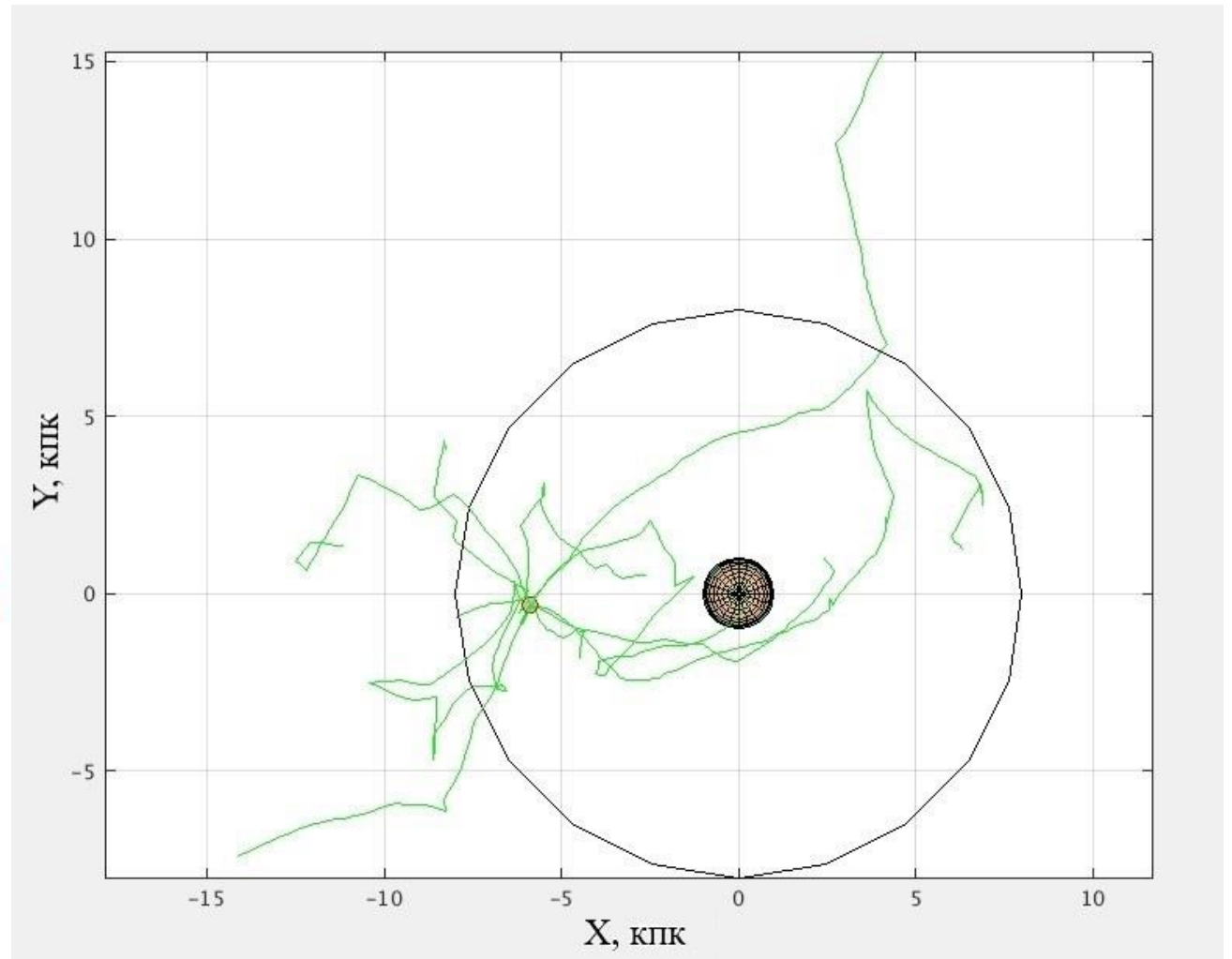
Progress: I I I I I I I I I I I I S ~ anti_protonInelastic ~ 10 (9.548 GeV)
Gen: 1 (1 of 10) = mu+ (0.272 GeV) = D ~ GTDecay ~ 3 (0.374 GeV)
Gen: 2 (1 of 3) = e+ (0.024 GeV) = S ~ annihil ~ 2 (0.001 GeV)
Gen: 3 (1 of 2) = gamma (0.001 GeV) =
Gen: 3 (2 of 2) = gamma (0.001 GeV) =
Gen: 2 (2 of 3) = nu_e (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)
    
```

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

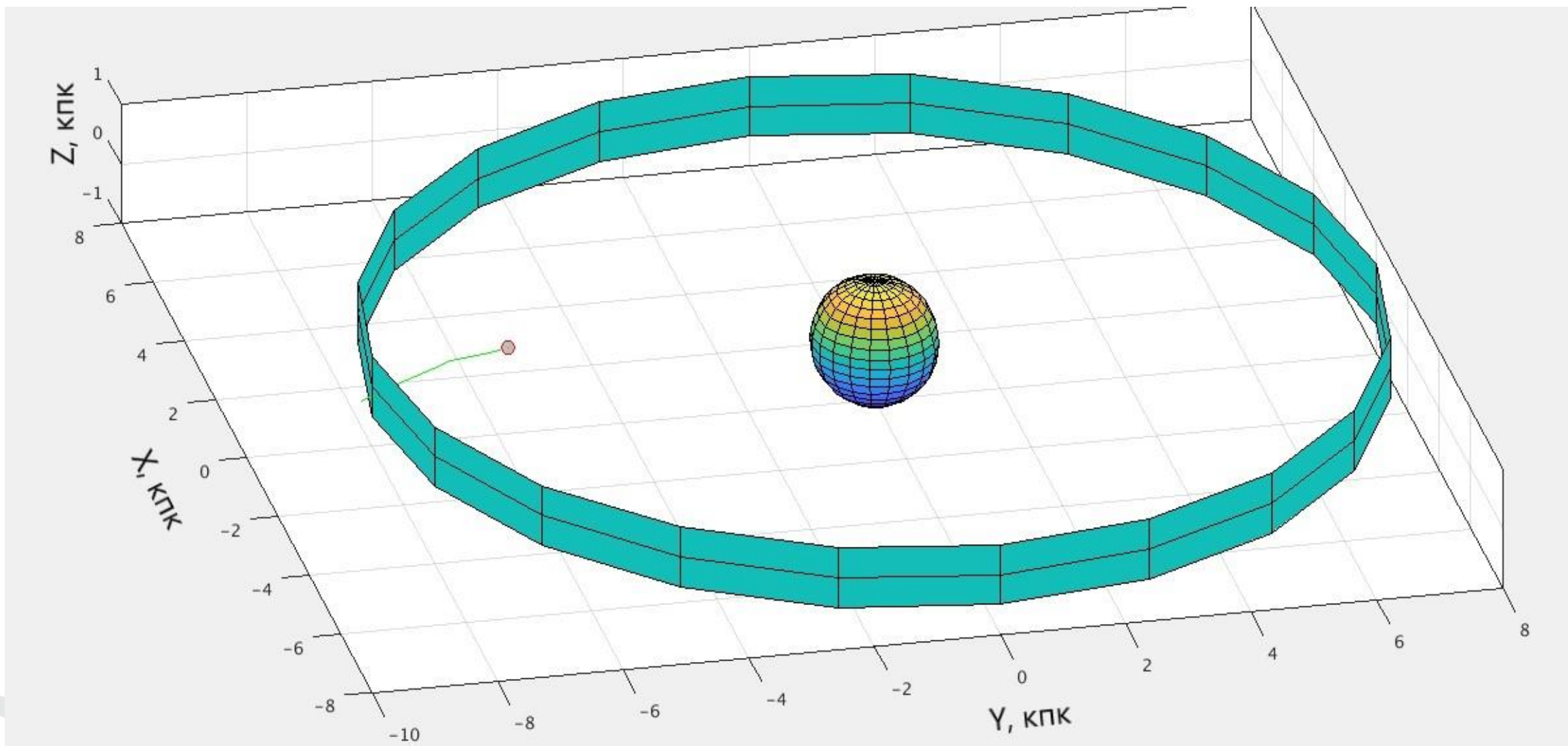
(а) Схематичное изображение траекторий в Галактике



(б) Изображение траекторий, полученное в результате моделирования



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



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

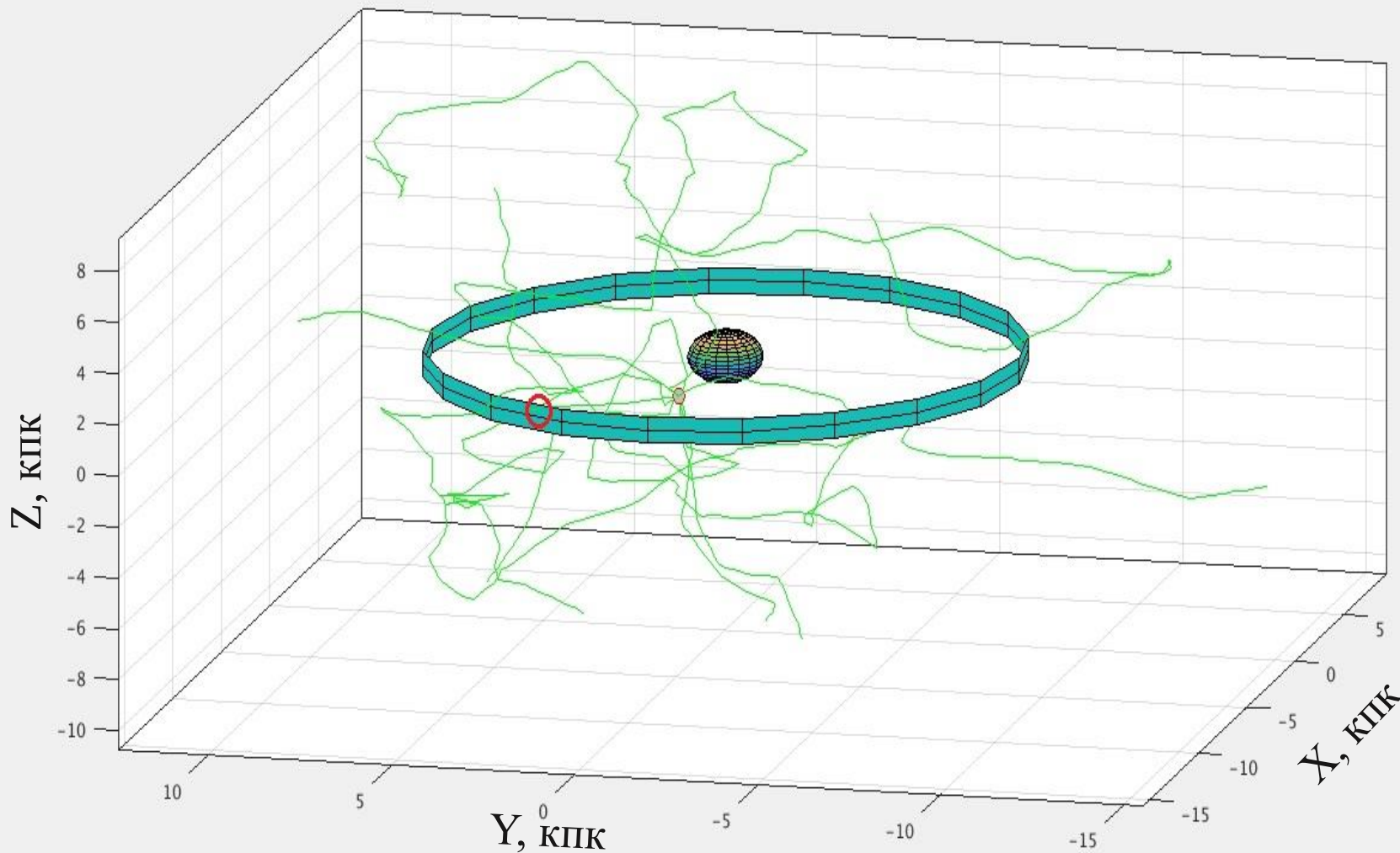
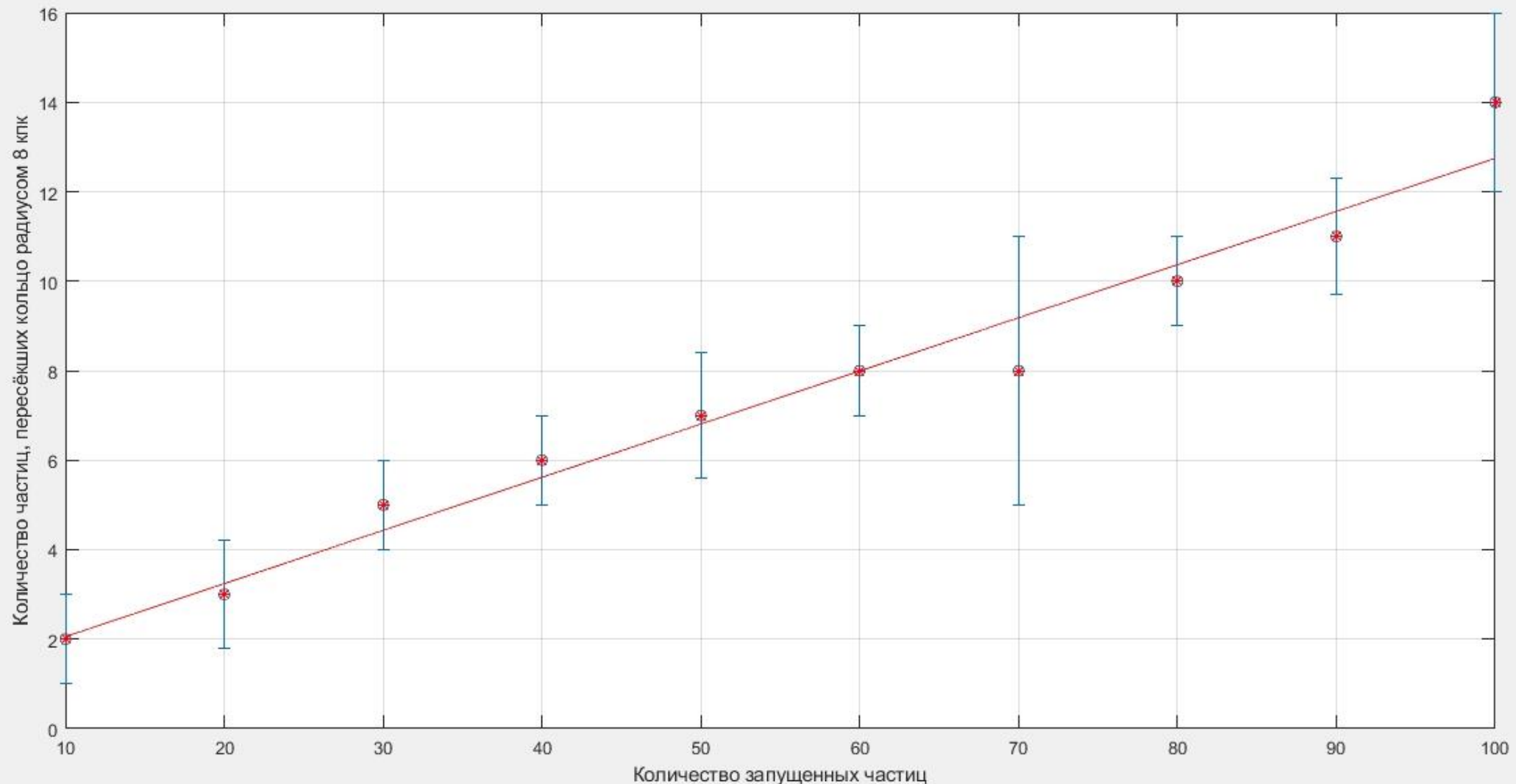


График зависимости числа частиц, долетевших до Солнечной системы, от общего числа частиц из источника.

Доля долетающих до Земной орбиты частиц составила 12%



Заключение

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.

Полученные данные будут использованы для интерпретации результатов экспериментальных поисков антиядер в космических лучах и изучения механизма возникновения барионной асимметрии Вселенной.

Спасибо за внимание!

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)
0.00	43.7	0	70	5.25	9.6 ± 0.6	-1 ± 4	82 ± 4
0.10	24.5	0	70	5.75	8.6 ± 0.4	-4 ± 3	83 ± 4
0.20	10.7	0	70	6.25	9.1 ± 0.5	-19 ± 3	73 ± 3
0.30	1.6	0	70	6.75	7.9 ± 0.4	-22 ± 3	63 ± 4
0.40	1.4	0	70	7.25	9.2 ± 0.5	-14 ± 3	58 ± 4
0.50	1.5	0	70	7.75	7.7 ± 0.5	-9 ± 5	72 ± 7
0.60	1.1	0	70	8.25	5.0 ± 0.3	-4 ± 5	80 ± 9
0.70	0.9	0	70	8.75	3.6 ± 0.6	13 ± 6	66 ± 10
0.80	0.8	0	70	9.25	4.8 ± 0.6	-4 ± 3	23 ± 5
0.90	0.7	0	70	9.75	1.7 ± 0.5	-20 ± 77	147 ± 139
1.00	0.6	0	70	10.0	0.4	0	111
1.10	0.5	0	70	11.0	1.2	0	136
1.20	0.4	0	70	12.0	1.0	0	147
1.30	0.3	0	70	13.0	0.7	0	160
1.40	0.2	0	70	14.0	0.3	0	223
1.50	0.1	0	70	15.0	0.15	0	257
2.25	1.5 ± 0.4	39 ± 26	77 ± 30	16.0	0.09	0	220
2.75	3.3 ± 0.5	36 ± 9	80 ± 10	17.0	0.07	0	200
3.25	5.8 ± 0.5	0 ± 4	61 ± 4	18.0	0.05	0	188
3.75	5.5 ± 0.5	-8 ± 4	65 ± 5	19.0	0.005	0	200
4.25	8.4 ± 0.5	1 ± 3	71 ± 3	20.0	0.008	0	200
4.75	9.0 ± 0.8	-10 ± 5	72 ± 5	21.0	0.004	0	200

Таблица 1. Параметры распределения молекулярного водорода H₂

Radius Interval (kpc)	$n(\text{H I})$ (cm ⁻³)
2.0–2.5....	0.13
2.5–3.0....	0.14
3.0–3.5....	0.16
3.5–4.0....	0.19
4.0–4.5....	0.25
4.5–5.0....	0.30
5.0–5.5....	0.33
5.5–6.0....	0.32
6.0–6.5....	0.31
6.5–7.0....	0.30
7.0–7.5....	0.37
7.5–8.0....	0.38
8.0–8.5....	0.36
8.5–9.0....	0.32
9.0–9.5....	0.29
9.5–10.0...	0.38
10.0–10.5...	0.40
10.5–11.0...	0.25
11.0–11.5...	0.23
11.5–12.0...	0.32
12.0–12.5...	0.36
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

Таблица 2. Радиальное распределение объёмной плотности

Пример построенной траектории частицы из шарового скопления. Здесь сферой радиусом 1 кпк обозначен центр Галактики, а крестом – источник.

