



Национальный исследовательский ядерный университет  
«МИФИ»

Кафедра физики элементарных частиц №40



Научная исследовательская работа студента на тему:

# Распространение антиядер в межзвёздном пространстве

Студентка гр. Б18-102:

А. В. Кравцова

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

М. Ю. Хлопов

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

А. Г. Майоров

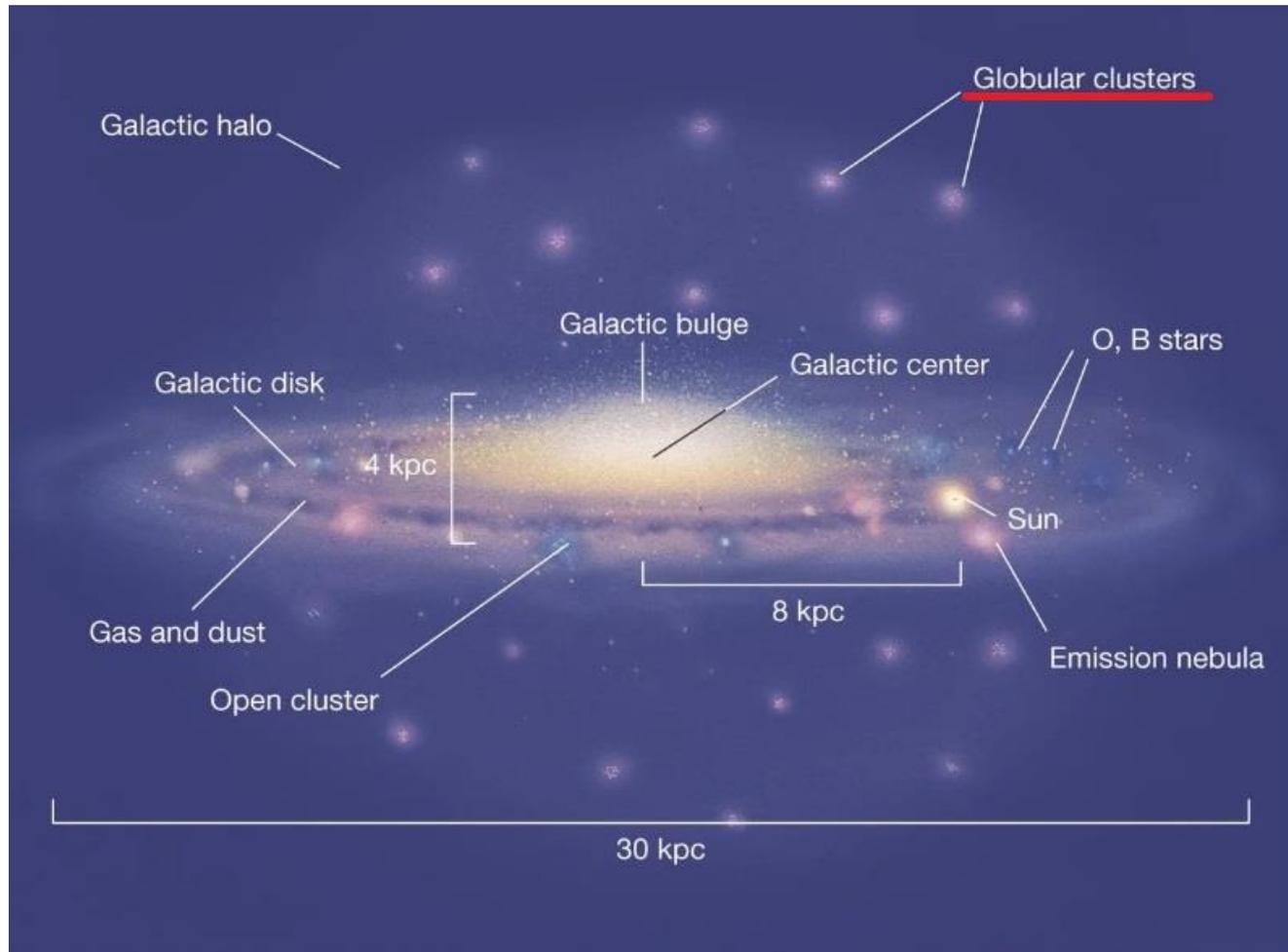
# Введение

Возможная природа антиматерии во Вселенной:

- ❖ Первичное антивещество (может существовать в виде шаровых скоплений антиматерии).
- ❖ Вторичное антивещество (нуклеосинтез космическими лучами)
- ❖ Антивещество от экзотических источников.

# Шаровые скопления

Шаровое звёздное скопление – совокупность звёзд, тесно связанных гравитацией и вращающихся вокруг галактического центра

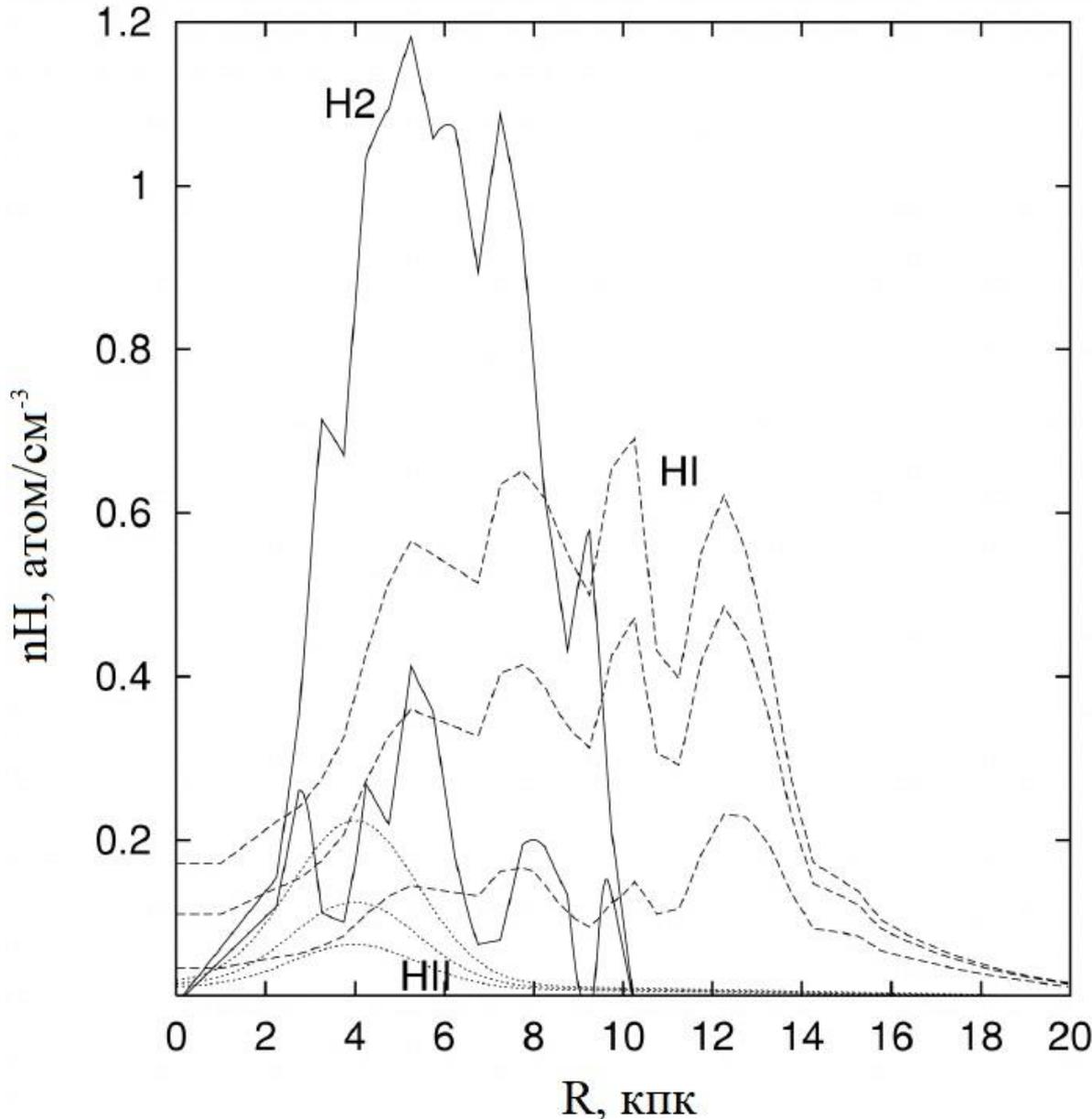


# Постановка задачи

Для моделирования движения частиц с учётом влияния межзвёздного вещества необходимо

- разработать программу функции среды
- проверить корректность её работы
- включить функцию в программу, строящую траектории частиц Галактики
- проверить результаты вычисления количества вещества на пути частицы

# 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

# Аналитическая модель

Концентрация молекулярного водорода  $\text{H}_2$  в молекулах на см<sup>-3</sup>:

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

$R$ (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)
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

Здесь  $\epsilon_0(R)$  (К км сек<sup>-1</sup>) – объёмная светимость CO,  $z_0(R)$  и  $z_h(R)$  – характерная шкала высоты и ширина распределения как функции расстояния от центра Галактики  $R$  (даются в таблице 1), и  $X_{\text{CO}} = N_{\text{H}_2} / W_{\text{CO}} = 1.9 \times 10^{20}$  (молекул см<sup>-2</sup> К<sup>-1</sup> км<sup>-1</sup> сек) – конверсионный фактор.

## Относительное распределение атомарного водорода HI (см<sup>-3</sup>):

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

Здесь  $Y(R)$  - радиальное распределение объёмной плотности из таблицы справа ( $R < 16$  кпк),  $n_{\text{GB}} = 0.33 \text{ см}^{-3}$  и  $n_{\text{DL}} = 0.57 \text{ см}^{-3}$  - концентрации атомов HI 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.

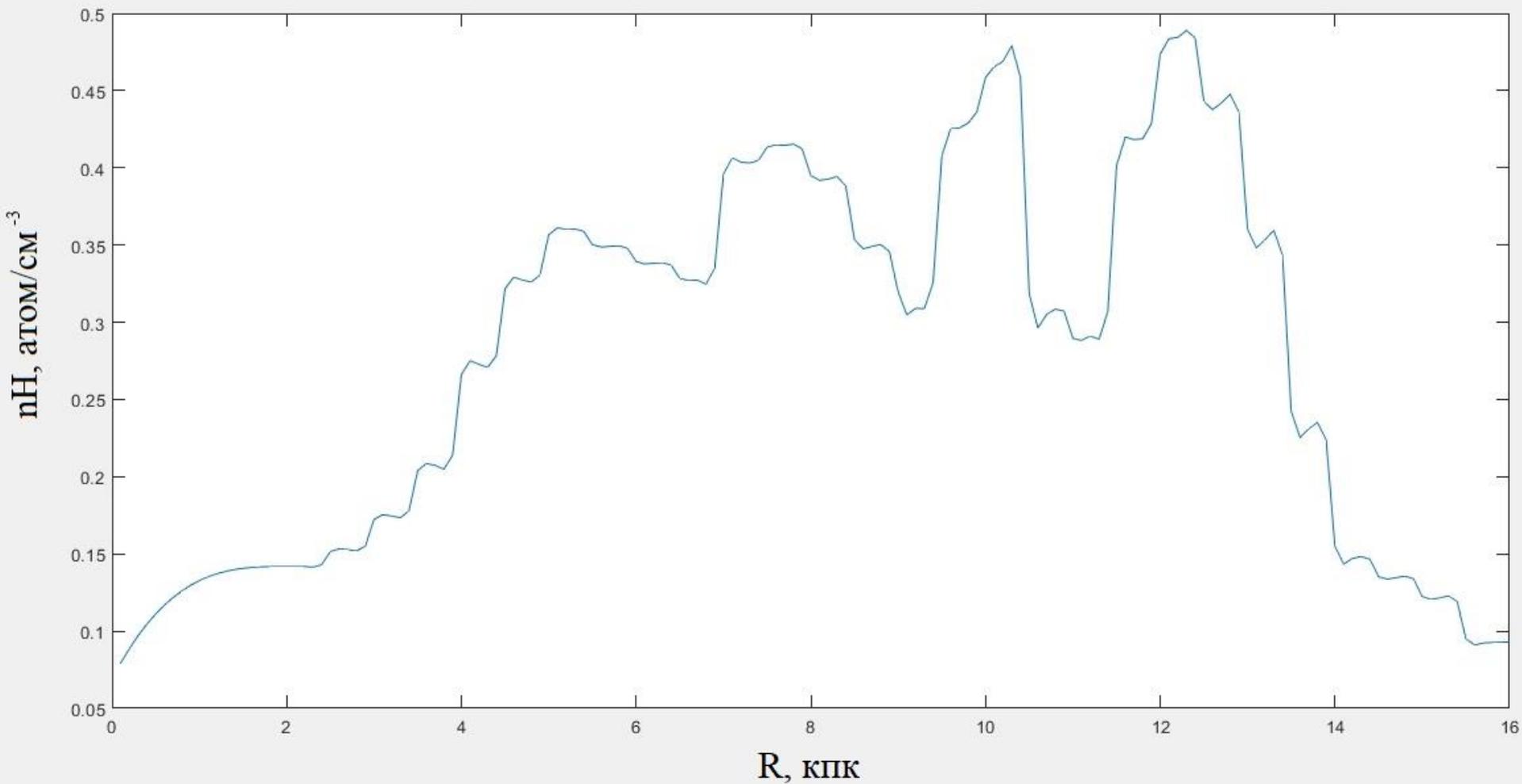
## Распределение ионизованного водорода HII (см<sup>-3</sup>):

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

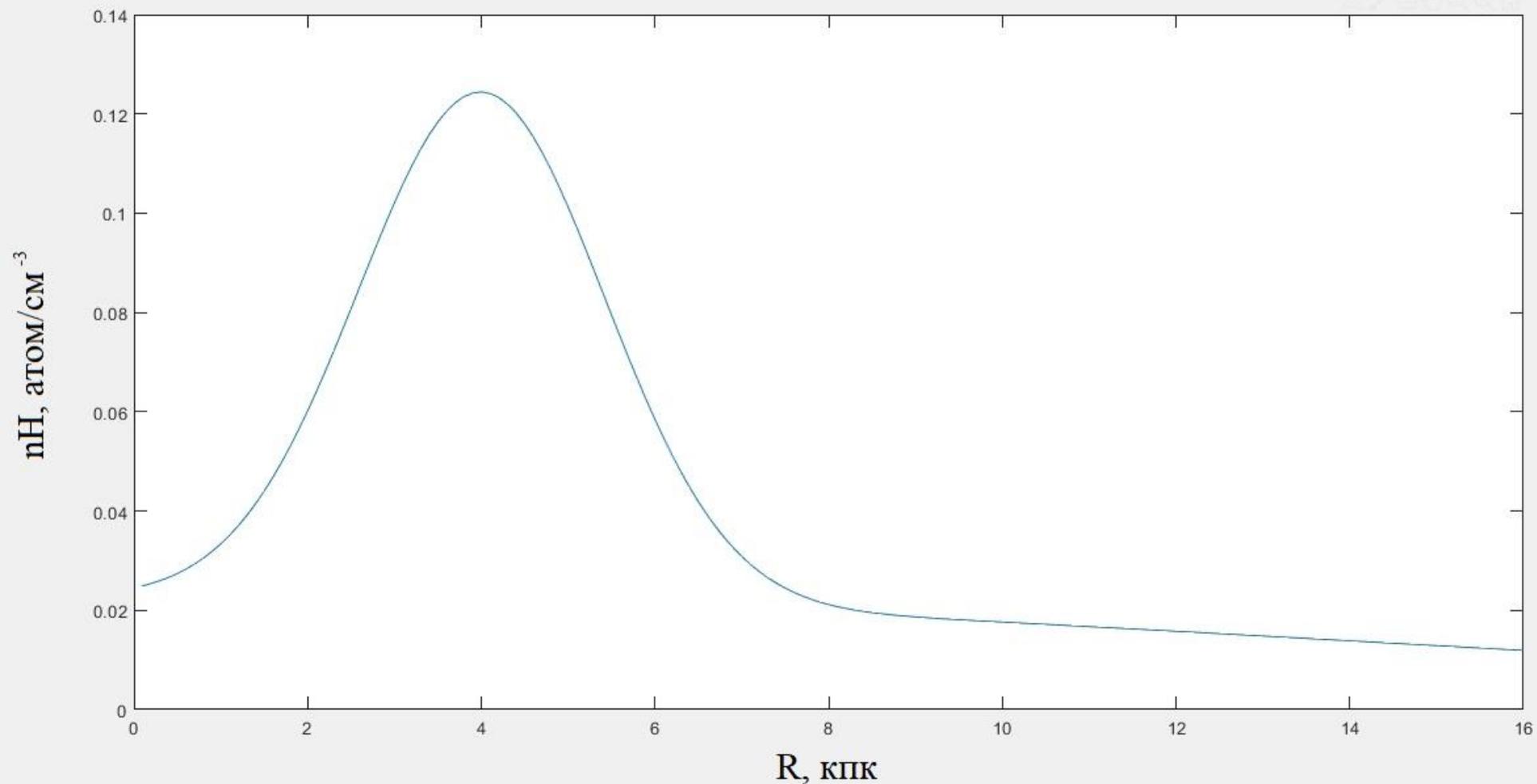
Здесь  $n_1 = 0.025$ ,  $n_2 = 0.200$ ,  $h_1 = 1$  кпк,  $h_2 = 0.15$  кпк,  $R_1 = 0$ ,  $R_2 = 4$  кпк,  $a_1 = 20$  кпк,  $a_2 = 2$  кпк.

Radius Interval (кпк)	$n(\text{HI})$ (см <sup>-3</sup> )
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

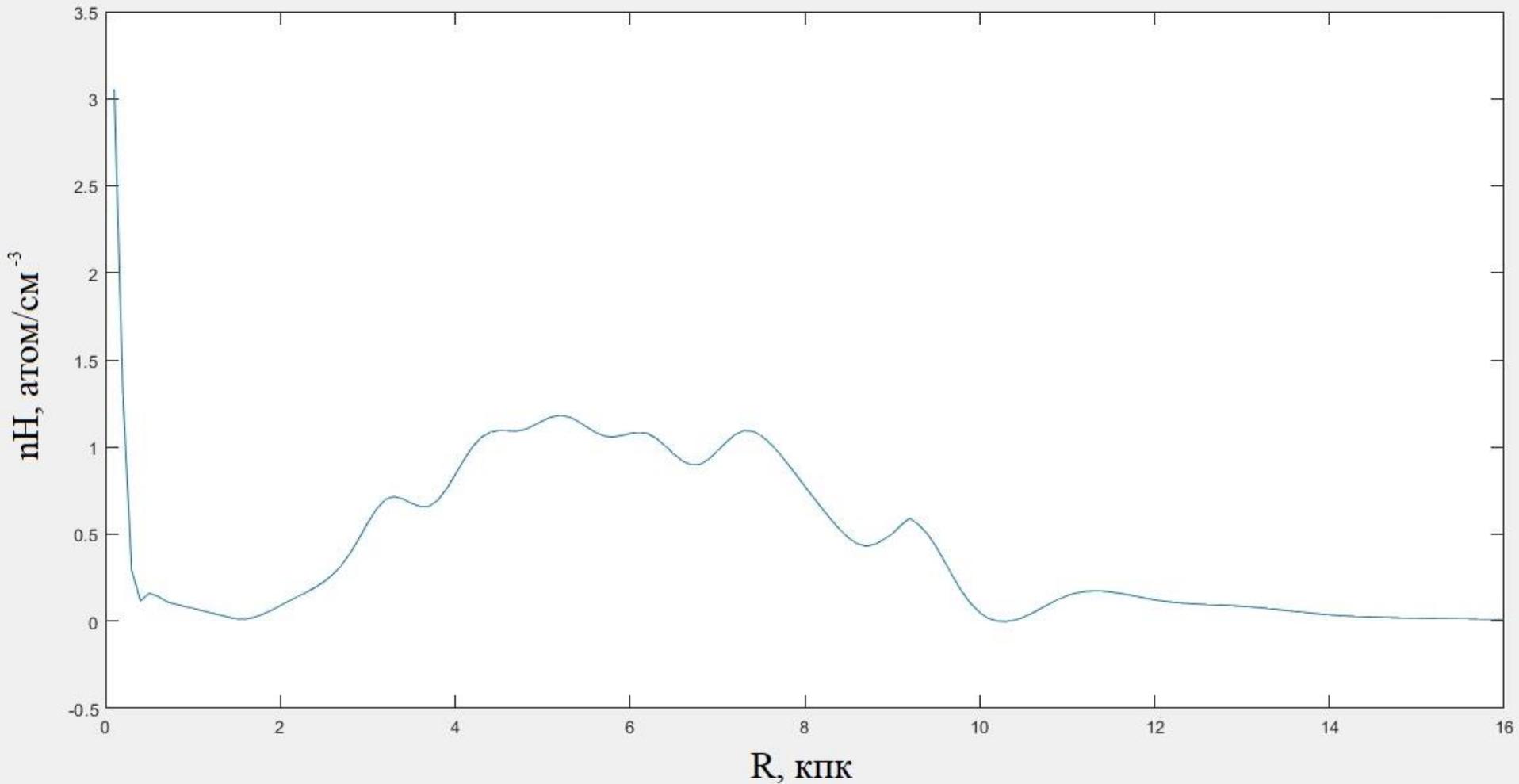
# Концентрация атомов атомарного водорода



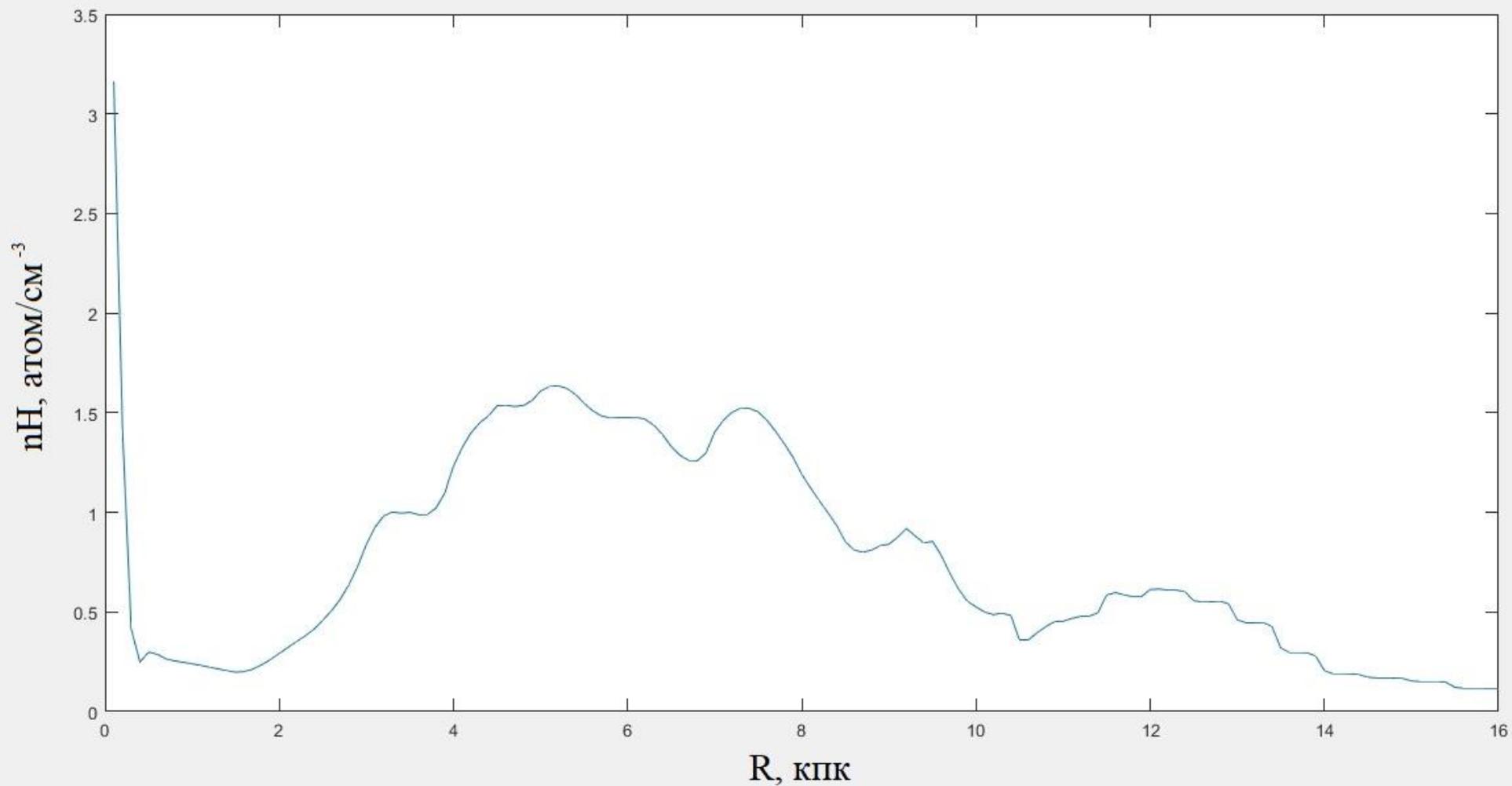
# Концентрация атомов ионизованного водорода



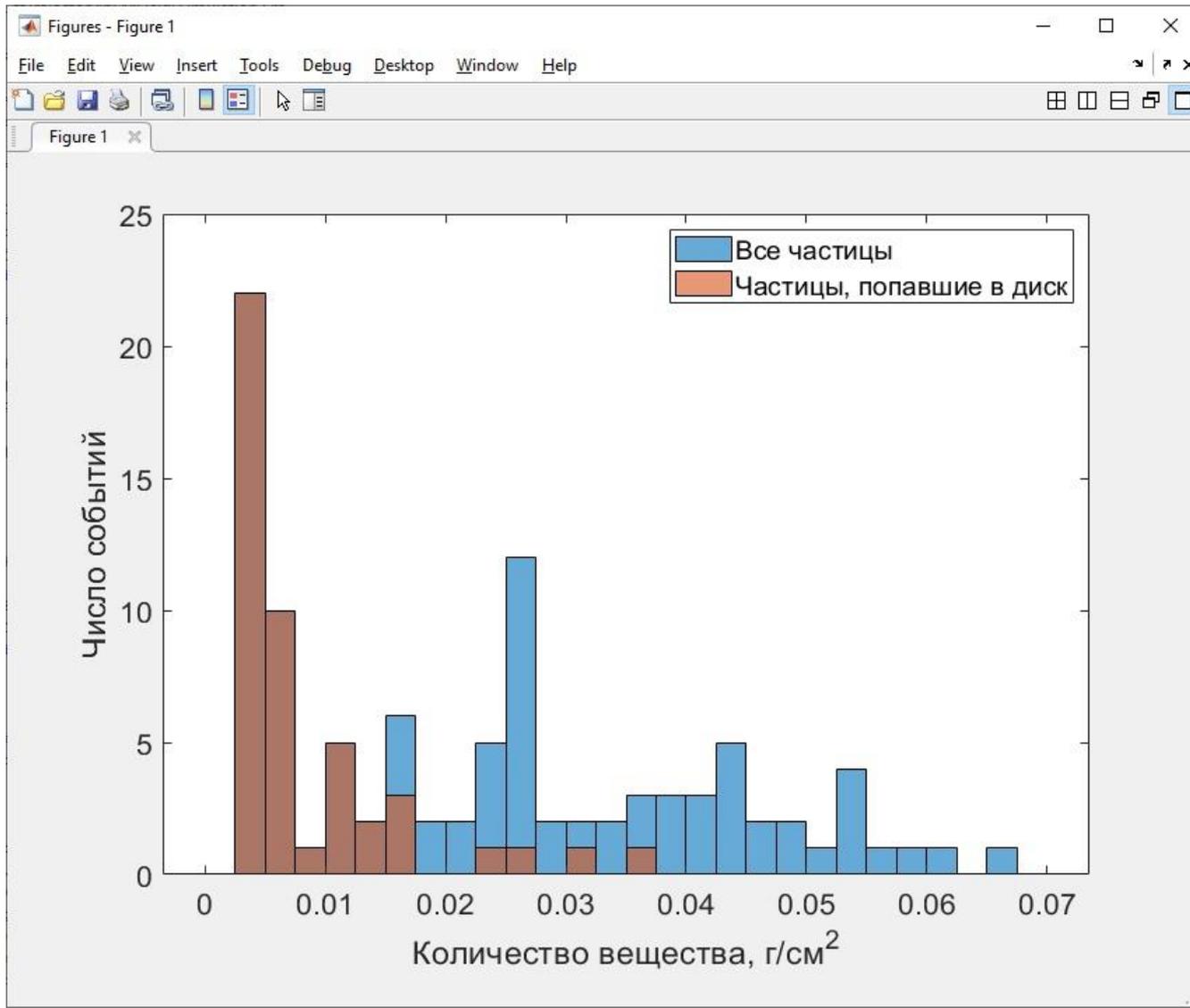
# Концентрация атомов молекулярного водорода



# Суммарная концентрация межзвёздного газа



Результаты трассировки частиц из шарового скопления М4 скоординатами [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).



# 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.

***Спасибо за внимание!***