

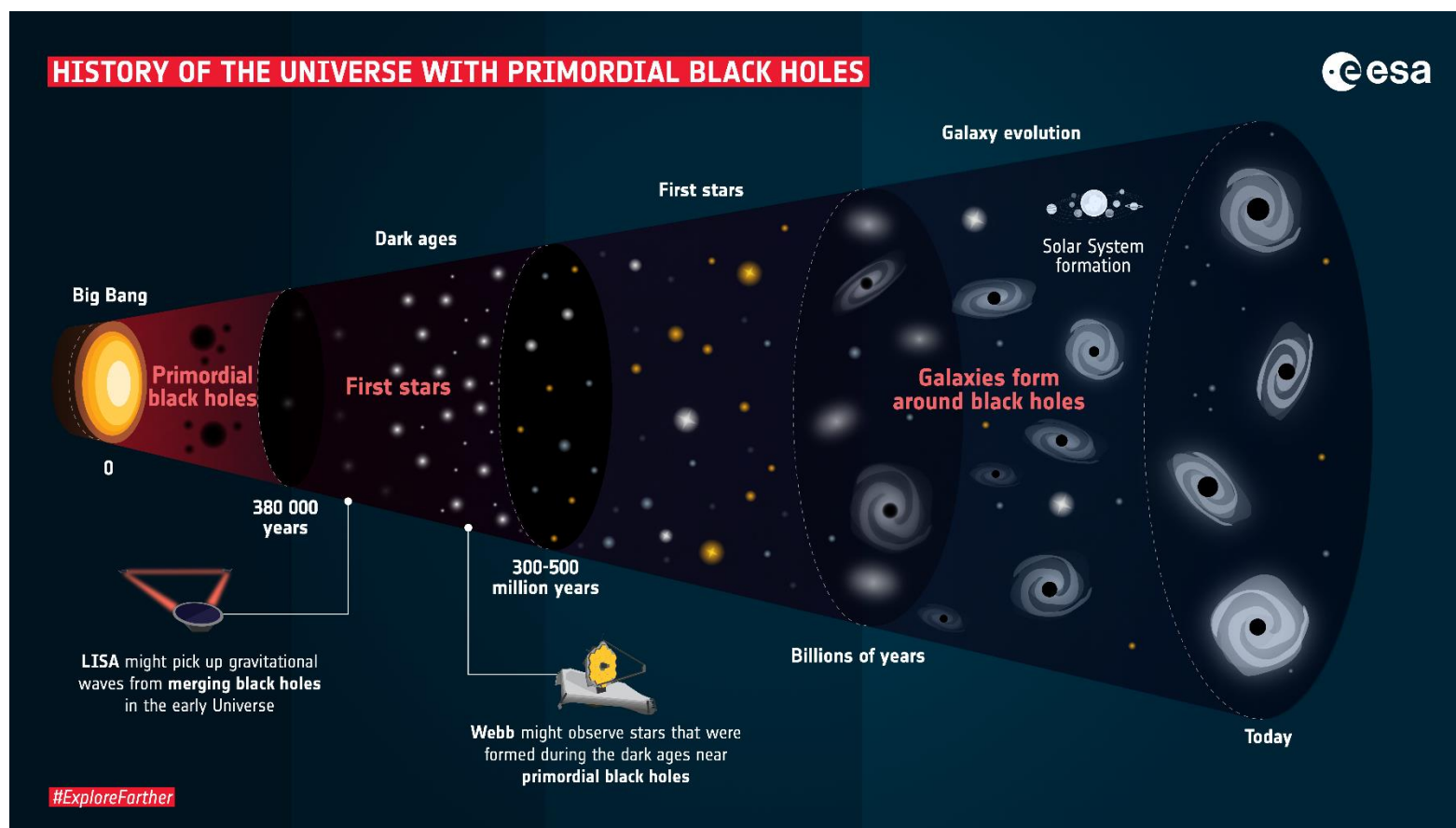
# ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТЕЙ ДВОЙНЫХ СОБЫТИЙ ГРАВИТАЦИОННОГО МИКРОЛИНЗИРОВАНИЯ

Мучкинова Б.Ю.

Научные руководители: Белоцкий К.М., Шлепкина Е.С.

26.12.2024

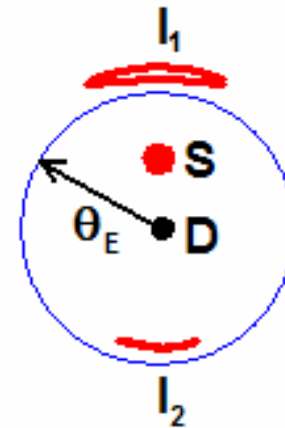
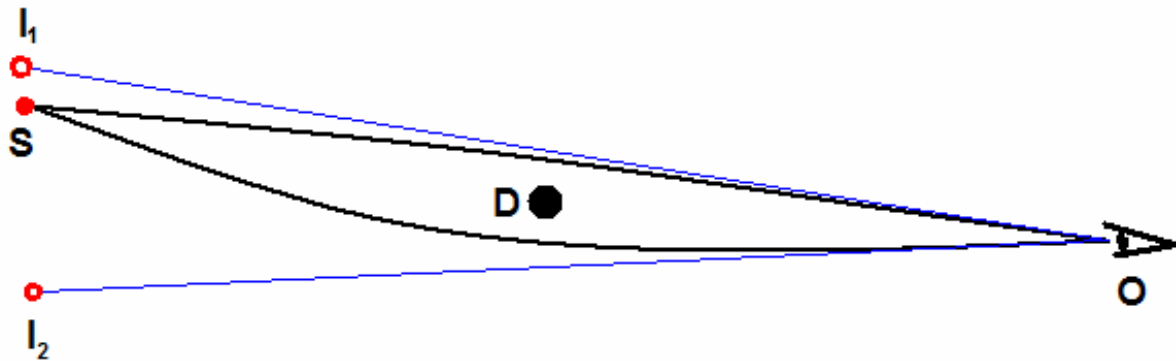
## Первичные черные дыры



**ПЧД могут объяснить:**

1. природу скрытой массы;
2. происхождение ранних квазаров,  $Z = 10$ ;
3. данные LIGO/Virgo.

## Гравитационное микролинзирование



$$\theta_E^2 = \frac{4GM_D}{c^2} \frac{l_{SD}}{l_{DO}l_{SO}} = 2r_{gD} \left( \frac{1}{l_{DO}} - \frac{1}{l_{SO}} \right)$$

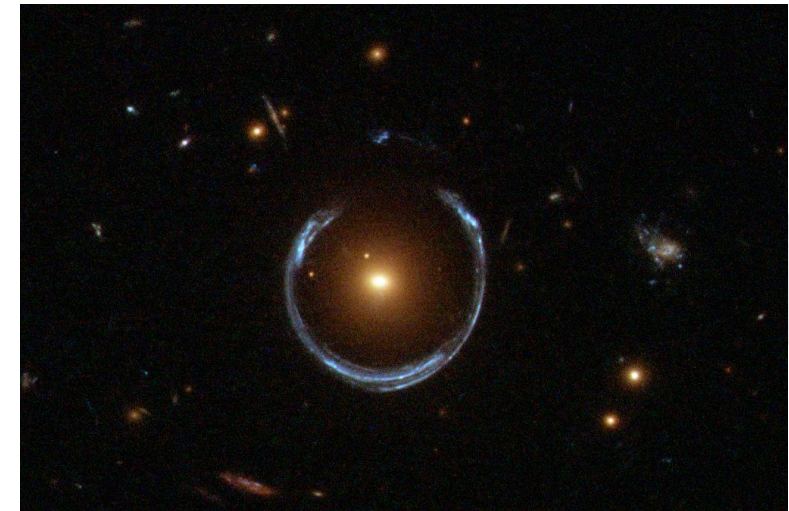
угол Хвольсона-Эйнштейна

$$\mu = \frac{\theta_I d\theta_I}{\theta_S d\theta_S} = \frac{1}{2} \left( \frac{\Delta\theta}{\theta_S} + \frac{\theta_S}{\Delta\theta} \right)$$

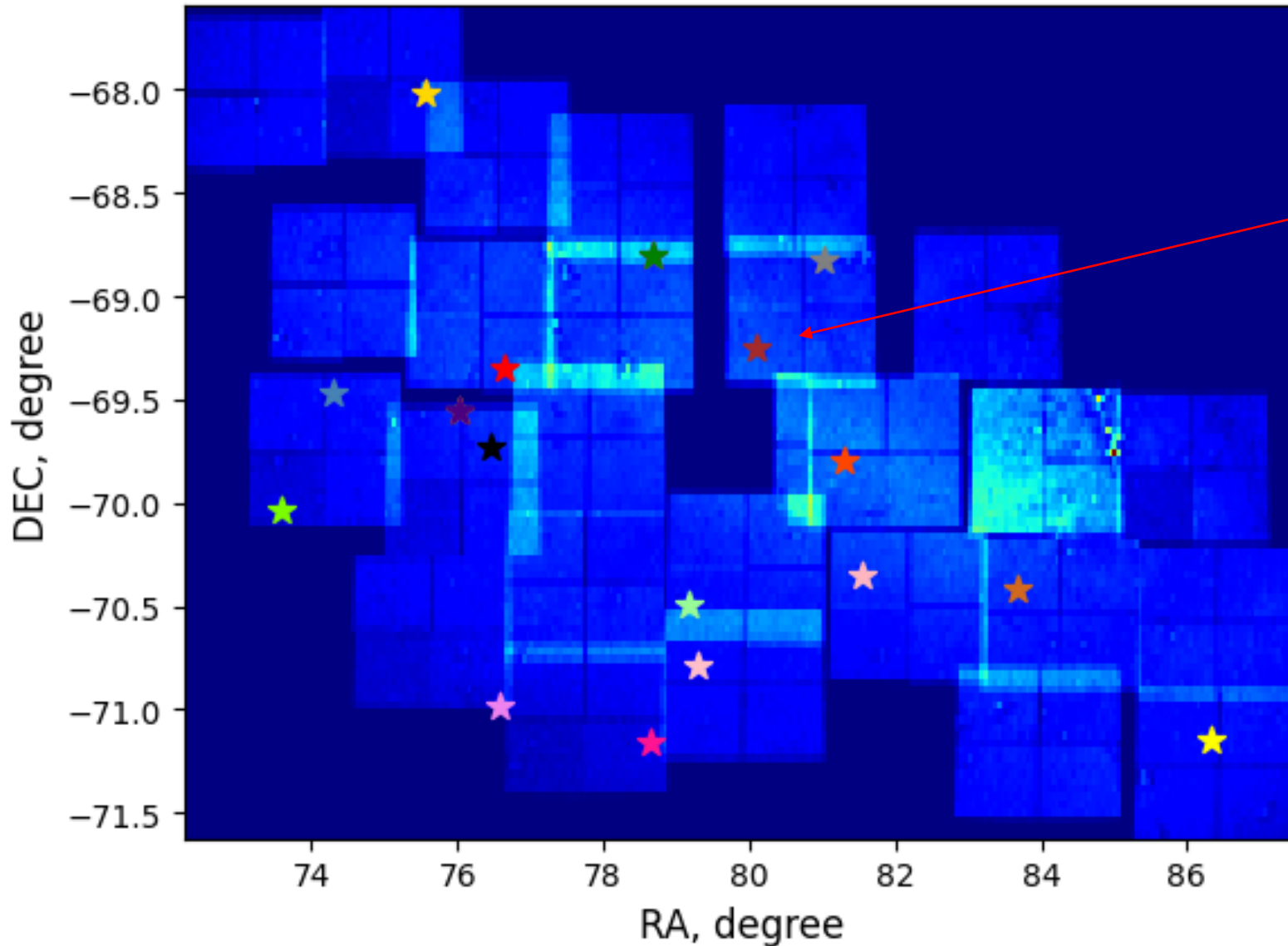
усиление интенсивности

$$\Delta\theta = \sqrt{\theta_S^2 + 4\theta_E^2}$$

круг Хвольсона-Эйнштейна (конус)



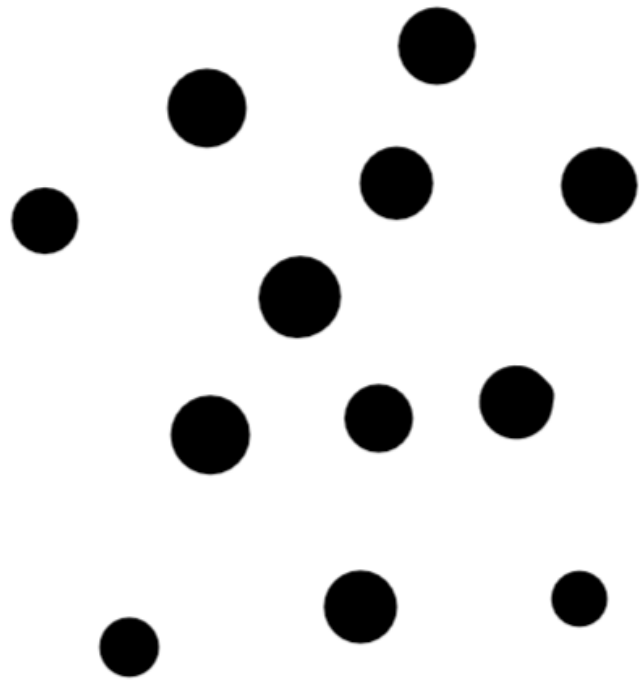
# Данные МАСНО



Двойное событие

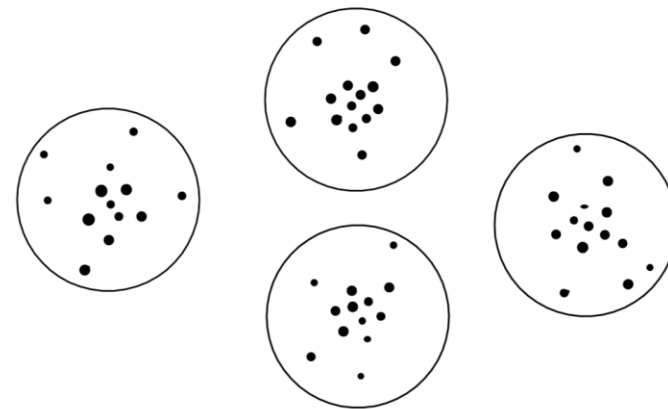
# Гипотезы

Гипотеза  $H_0$ : одиночные ПЧД



- $m_{\text{ПЧД}} = m_{\odot}$  – масса ПЧД;

Гипотеза  $H_1$ : кластеры ПЧД



- $R = 1$  пк – радиус кластера;
- $M = 10^4 M_{\odot}$  – масса кластера;
- $r_0 = 0.1R$  – радиус ядра кластера («кора»);
- $m_{\text{ПЧД}} = m_{\odot}$  – масса ПЧД;

# Гипотеза $H_0$ : одиночные ПЧД (по времени)

Ожидаемое количество двойных событий на БМО

$$N_2^t = \frac{\Delta t}{\tau_N} = 16$$

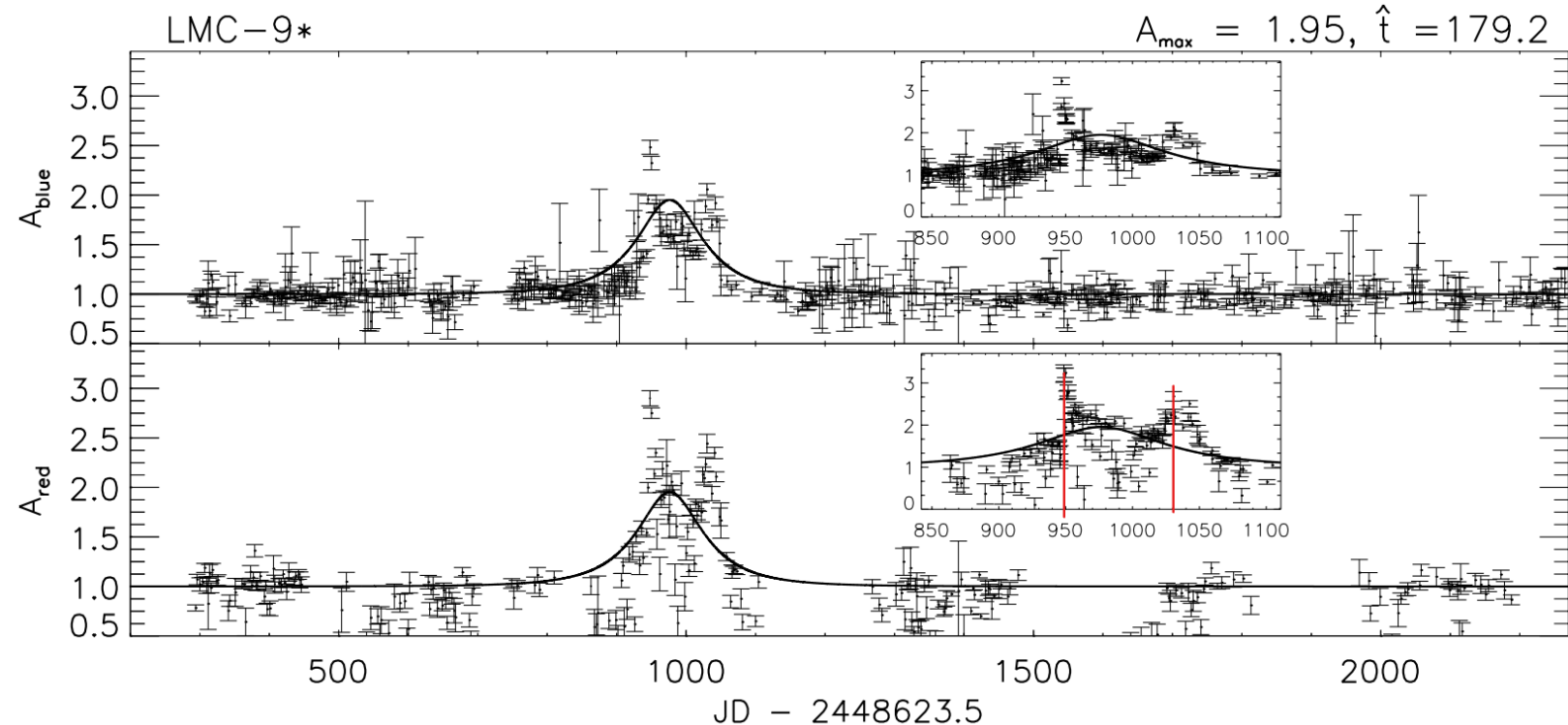
с нормировкой на данные МАСНО

$$N_2^t = \frac{\Delta t}{\tau_N^M} = 0.4$$

Наблюдалось одно двойное событие



**Гипотеза  $H_0$  НЕ отвергается**



# Гипотеза $H_0$ : одиночные ПЧД (по расстоянию)

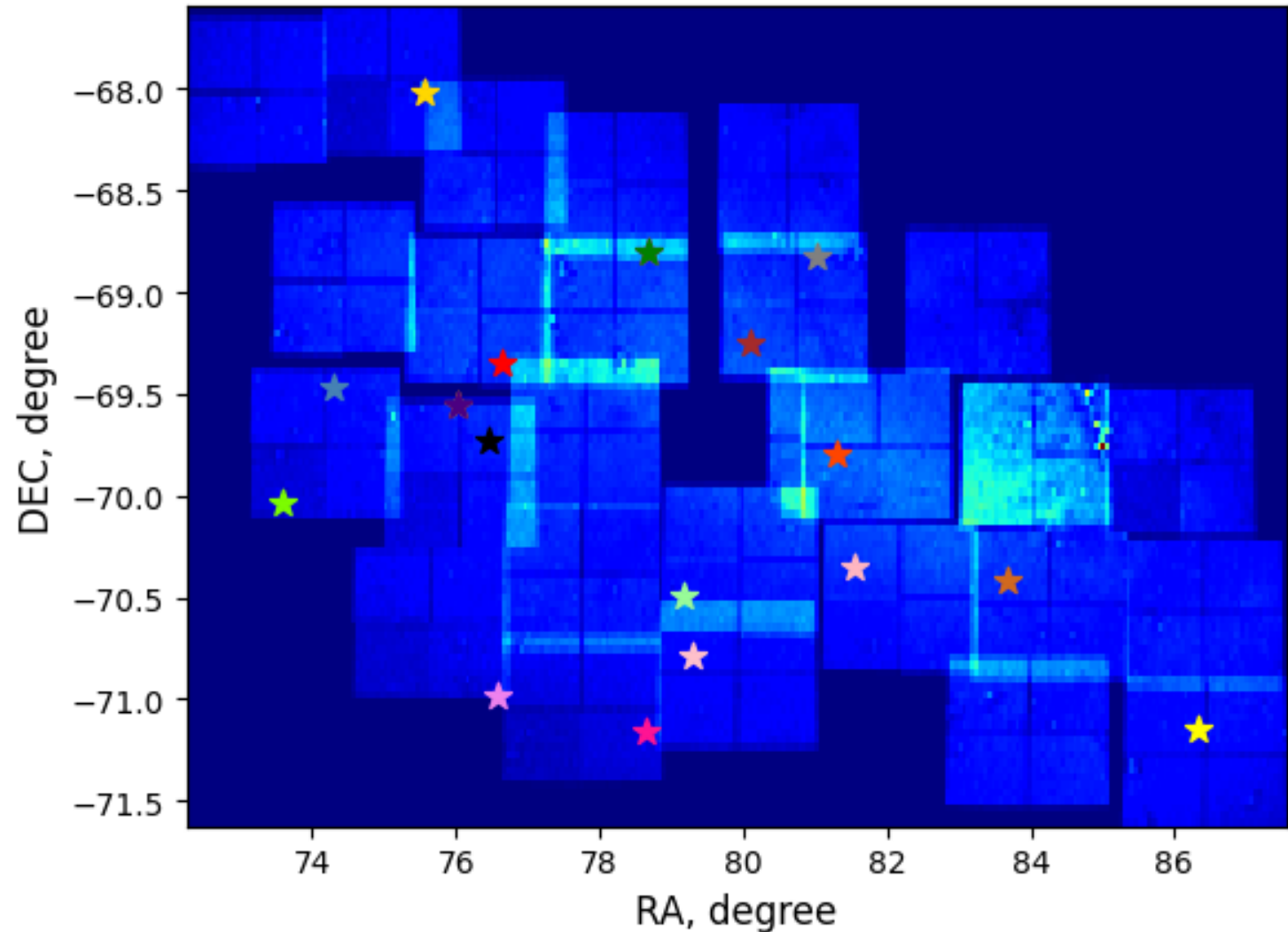
Вероятность двойного события на БМО (грубо)

$$N_2^\theta = \frac{\theta_{cl}}{\langle \theta \rangle} = 0.5 \cdot 10^{-2}$$

Наблюдалось одно двойное событие



**Гипотеза  $H_0$  отвергается**







# Гипотеза $H_1$ : кластеры ПЧД

Вероятность одиночного события и двойного события на кластере

$$P_1 = 2.49 \cdot 10^{-2}$$

$$P_2 = P_1^2$$

Доля двойных событий среди одиночных

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = 2.49 \cdot 10^{-2}$$

Ожидаемое количество  
событий на БМО  
(относительная оценка)

$$N_2 = 0.49 \sim 1$$

(подобрать область параметров кластера)

**Гипотеза  $H_1$   
НЕ отвергается**

# Заключение

В ходе данной работы были рассмотрены две гипотезы:

$H_0$  – ПЧД распределены равномерно на сфере радиусом 10 кпк (отвергается)

$H_1$  – ПЧД собраны в кластеры, которые равномерно распределены на сфере радиусом 10 кпк (частично принимается)

Необходимо рассмотреть гипотезу  $H_2$  – часть одиночных ПЧД будет кластеризована.

$$f_{\text{РВН}} \left( 1 - \tilde{f}_{\text{cl}} \right) \text{ (одиночные ПЧД)} + f_{\text{РВН}} \cdot \tilde{f}_{\text{cl}} \text{ (кластеры)}$$

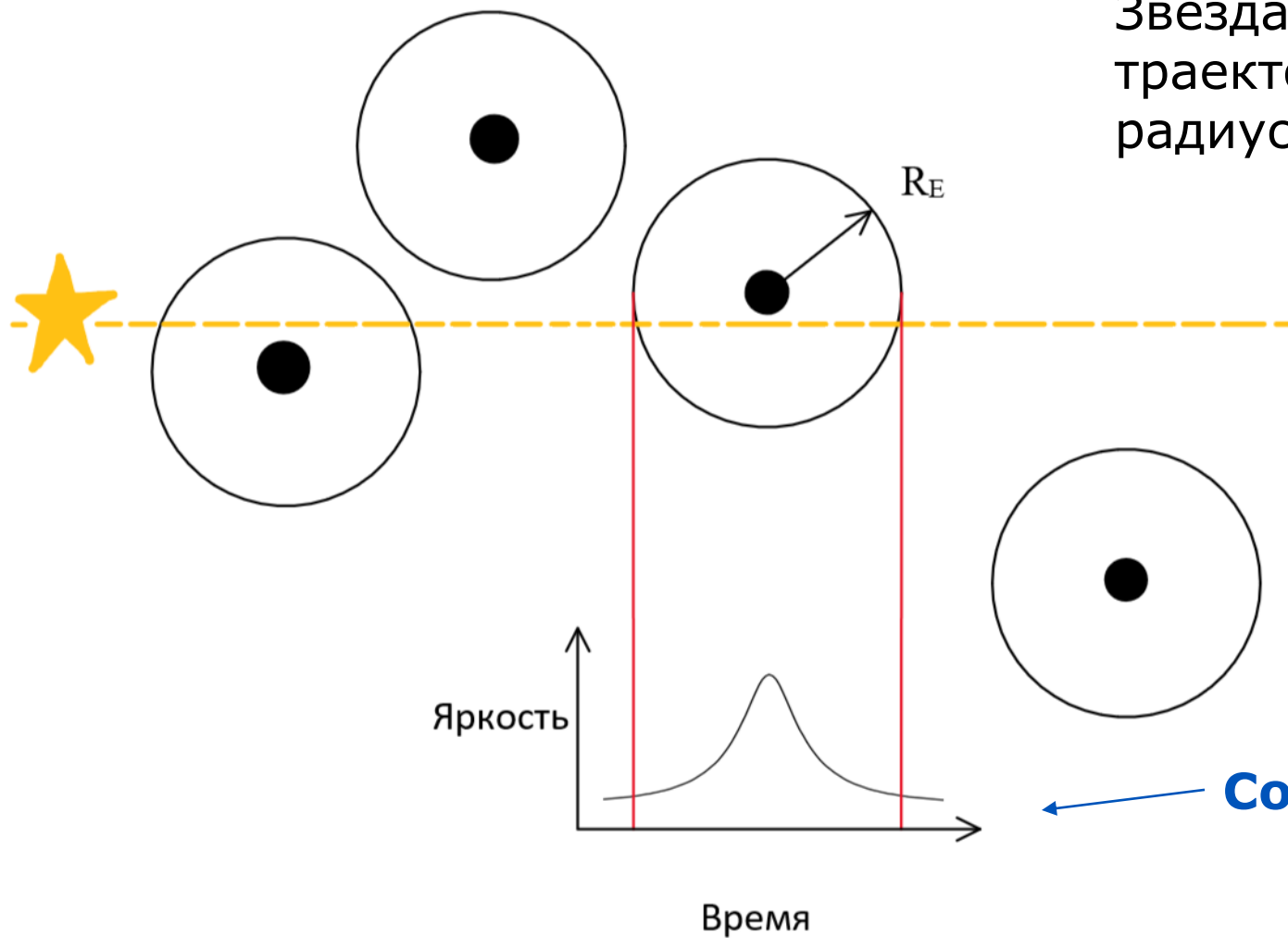
Дальнейшей целью будет являться оценка доли ПЧД, входящих в кластер.



Back-Up



# Событие линзирования



Звезда будет линзироваться, если ее траектория проходит в пределах радиуса Хвольсона-Эйнштейна

← Событие линзирования

# Оптическая толщина неба с различным пространственным распределением кластеров

1. Кластеры ПЧД равномерно распределены в **объеме сферы** радиуса  $D_s = 50$  кпк:

$$\mathcal{T} = \int_0^{D_s} \frac{4\pi G \rho}{c^2} \frac{D_d(D_s - D_d)}{D_s} dD_d = \frac{4\pi G \rho}{c^2} D_s^2 \int_0^1 x(1-x) dx = 4.94 \cdot 10^{-7}.$$

2. Кластеры ПЧД равномерно распределены **на поверхности сферы** радиуса  $D_d = 10$  кпк:

$$\mathcal{T} = \int_0^{D_s} \frac{4\pi G \rho}{c^2} \frac{D_d(D_s - D_d)}{D_s} dD_d = \frac{4\pi G}{c^2} D_s^2 \int_0^1 \rho(x)x(1-x) dx = 3.95 \cdot 10^{-6}.$$

3. Кластеры ПЧД равномерно распределены в **объеме сферы** радиуса  $D_d = 10$  кпк:

$$\mathcal{T} = \frac{4\pi G \rho}{c^2} D_s^2 \int_0^1 x(1-x) dx = \frac{4\pi G}{c^2} D_s^2 \frac{M_{Gal}}{\frac{4\pi}{3} D_d^3} \frac{1}{6} = \frac{GM_{Gal} D_s^2}{2c^2 D_d^3} = 6.18 \cdot 10^{-5}.$$

Оптическая толщина кластеров (одиночных ПЧД) **сильно зависит** от их распределения по расстоянию до них

4. Кластеры ПЧД распределены по профилю Наварро-Френка-Уайта:

$$\mathcal{T} = \int_0^{D_s} \frac{4\pi G \rho_{NFW}}{c^2} \frac{D_d(D_s - D_d)}{D_s} dD_d = 0.45 \cdot 10^{-6}.$$

$$\rho_{NFW} = \frac{\rho_0}{\frac{R(D_d)}{R_c} \left(1 + \frac{R(D_d)}{R_c}\right)^2}$$

# Количество кластеров на фоне БМО

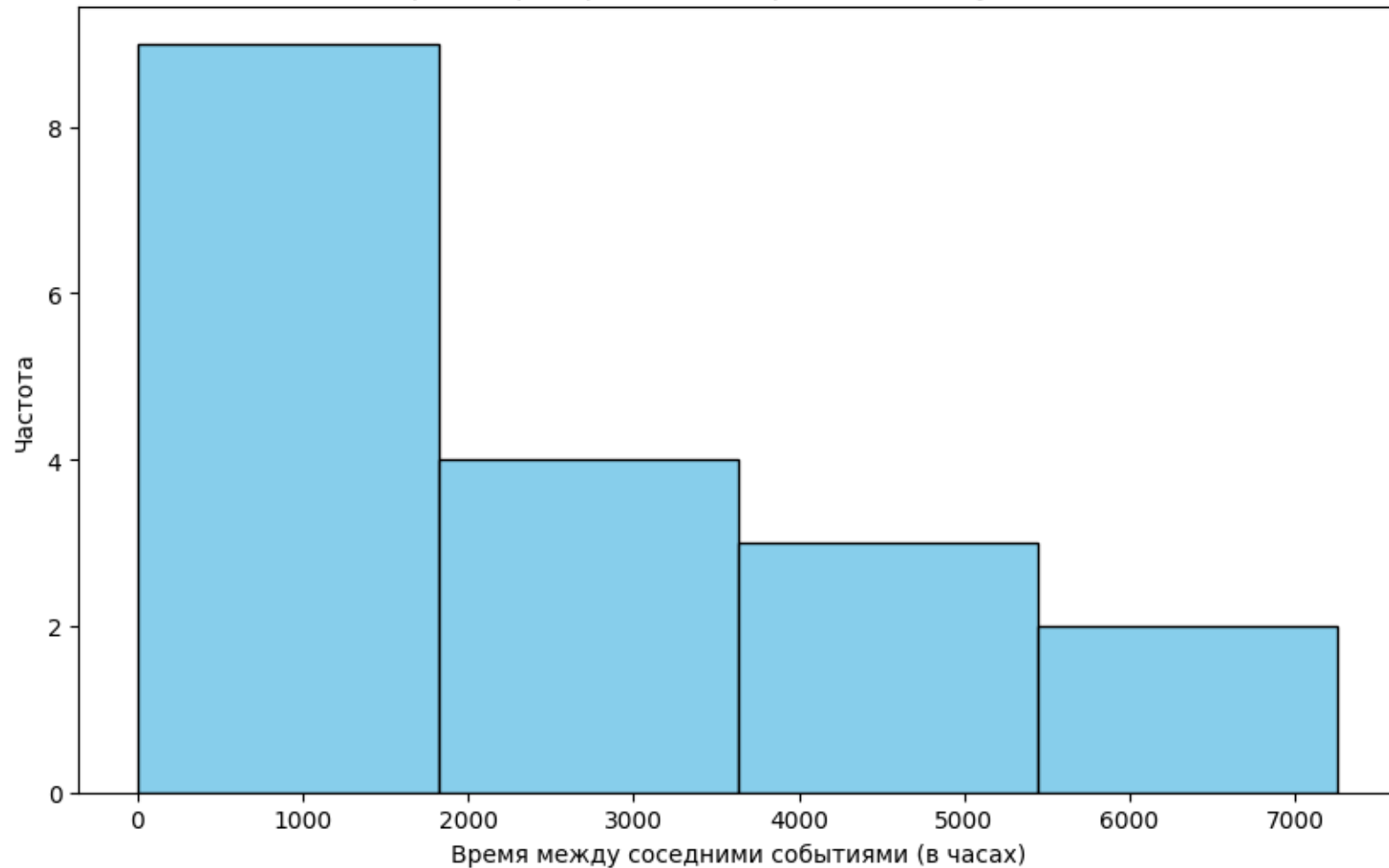
Считая, что вся скрытая масса сосредоточена в кластерах ПЧД, найдем количество кластеров на небе:

$$N_{cl} = \frac{M_{Gal}}{M} = \frac{10^{12} M_{\odot}}{10^4 M_{\odot}} = 10^8.$$

Угловые размеры БМО следующие:  $10.75^{\circ} \times 9.17^{\circ}$ . Таким образом, БМО занимает  $\frac{S_{LMC}}{S_{sky}} = \frac{98.3025}{41252.96125} = 2.38 \cdot 10^{-3}$  долю неба. Тогда количество кластеров на фоне БМО составит

$$N_{cl LMC} = N_{cl} \frac{S_{LMC}}{S_{sky}} = 2.38 \cdot 10^5.$$

# Гистограмма распределения событий по времени



# Оценка доли кластеров в СМ

Количество событий на кластере с учетом доли кластеров в СМ

$$N_{\text{tot}} = f_{\text{cl}} \cdot N_{\text{cl}} \cdot N_1 = f_{\text{cl}} \cdot 2.49 \cdot 10^{-2} \cdot 2.38 \cdot 10^5 = 6 \cdot 10^3 \cdot f_{\text{cl}} = 20$$

Таким образом

$$f_{\text{cl}} = \frac{20}{6 \cdot 10^3} = 0.003$$