

# Динамическая эволюция скопления первичных черных дыр

Выполнил: Стасенко В.Д.  
Научный руководитель: Кириллов А.А.

2020

# Введение

- ▶ Наблюдение квазаров на красных смещениях  $z > 6$ .
- ▶ Кластеры ПЧД могут составлять долю скрытой массы.
- ▶ Данные по слиянию ЧД с LIGO.
- ▶ Реионизация Вселенной.

# Основные уравнения

Уравнение Фоккера-Планка:

$$\rho(E) \frac{\partial f_a}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial E} \left[ m_a f_a B(E, t) + \frac{\partial f}{\partial E} C(E, t) \right] - \nu(E, t) f_a,$$

Уравнение Пуассона:

$$\phi(r) = -4\pi G \left[ \frac{1}{r} \int_0^r dr' r'^2 \rho(r') + \int_r^{r_{max}} dr' r' \rho(r') \right],$$

где

$$\rho(r) = 4\pi \sum_a m_a \int_{\phi(r)}^0 dE \sqrt{2(E - \phi(r))} f_a(E).$$

# Параметры модели

Профиль плотности:

$$\rho(r) = \rho_0 \left( \frac{r}{r_0} \right)^{-\gamma} \left[ 1 + \left( \frac{r}{r_0} \right)^\alpha \right]^{(\gamma-\beta)/\alpha},$$

$\gamma = 1$ ,  $\alpha = 2$ ,  $\beta = 5$ ,  $r_0 = 1$  пк.

Функция распределения:

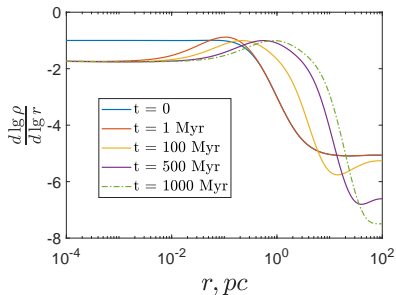
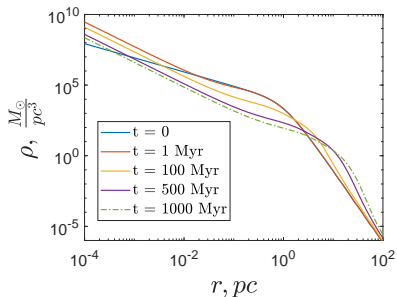
$$f(E) = \frac{\sqrt{2}}{4\pi^2 m} \frac{d}{dE} \int_E^0 \frac{d\phi}{\sqrt{\phi - E}} \frac{d\rho}{d\phi}.$$

Спектр масс:

$$\frac{dN}{dM} \propto \frac{1}{M_\odot} \left( \frac{M}{M_\odot} \right)^s \Big|_{10^{-4} M_\odot}^{10 M_\odot}, \quad (1)$$

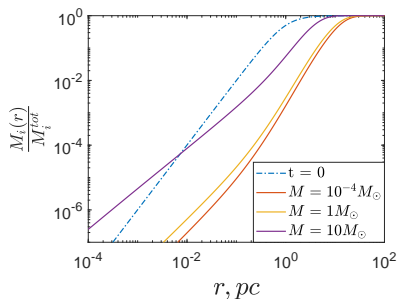
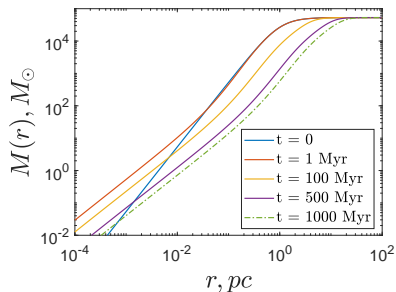
$s = -2$ ,  $N_{tot} = 10^8$ ,  $M_{tot} = 5.4 \cdot 10^4 M_\odot$ ,  $M_{cbh} = 10^3 M_\odot$ .

# Профиль плотности и наклон профиля



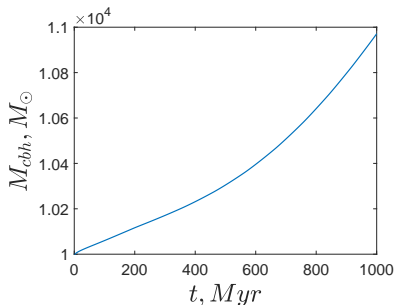
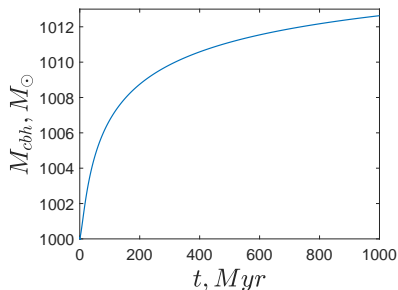
- ▶  $\rho \propto r^{-7/4}$  спустя 1 млн. лет в центральной области.
- ▶ Медленная эволюция в сторону расширения.
- ▶  $\rho \propto r^{-7.5}$  спустя 1 млрд. лет на периферии кластера.

# Зависимость массы от радиуса



- ▶ Начальный радиус кластера  $R \sim 3$  пк, конечный —  $R \sim 23$  пк.
- ▶ Сегрегация масс. Компонента с массой  $10 M_{\odot}$  под  $R \sim 7$  пк, а  $10^{-4} M_{\odot}$  под  $R \sim 25$  пк.

# Масса центральной черной дыры



На графике справа параметры кластера:  $M_{tot} = 5.4 \cdot 10^6 M_{\odot}$ ,  
 $M_{cbh} = 10^4 M_{\odot}$ ,  $r_0 = 5$  пк.

- ▶ Пренебрегается аккрецией обычного вещества.
- ▶ Зависит от начальных параметров.

# Заключение

Изучена динамическая эволюция скопления ПЧД в приближении Фоккера-Планка. В результате получено, что:

- ▶ В центральной области устанавливается касп  $\rho \propto r^{-7/4}$ .
- ▶ Размер кластера увеличивается примерно в 10 раз.
- ▶ Происходит заметная сегрегация масс.
- ▶ Незначительный рост массы центральной черной дыры.



## Выражения для коэффициентов

$$B(E) = \Gamma \sum_b m_b \int_{E_{crit}}^E \rho(E') f_b(E') dE',$$

$$C(E) = \Gamma \sum_b m_b^2 \left( \int_{E_{crit}}^E q(E') f_b(E') dE' + q(E) \int_E^0 f_b(E') dE' \right),$$

$$q(E) = \frac{4}{3} \int_0^{\phi^{-1}(E)} dr r^2 [2(E - \phi(r))]^{3/2},$$

$$\rho(E) = 4 \int_0^{\phi^{-1}(E)} dr r^2 \sqrt{2(E - \phi(r))},$$

$$\Gamma = 16\pi^2 G^2 \ln \Lambda, \quad \Lambda = N.$$

## Конус потерь

$$\nu(E) = \frac{\rho(E)\mathcal{D}(E)}{\alpha + \ln(1/\mathcal{R}_{lc})}, \quad \alpha = (\xi^2 + \xi^4)^{1/4},$$

$$\xi(E) = \frac{\mathcal{D}(E)P(E)}{\mathcal{R}_{lc}},$$

$$\mathcal{D}(E) = \frac{2}{\rho(E)} \int_0^{\phi^{-1}(E)} \frac{\langle \Delta v_{\perp}^2 \rangle r^2 dr}{\sqrt{2(E - \phi(r))}},$$

$$\langle \Delta v_{\perp}^2 \rangle = \Gamma \sum_i m_i^2 \left( \frac{4}{3} l_{0,i} + 2J_{1/2,i} - \frac{2}{3} J_{3/2,i} \right),$$

$$l_{0,i}(E) = \int_E^0 f_i(E') dE',$$

$$J_{n,i}(E, r) = \int_{\phi(r)}^E dE' f_i(E') \left( \frac{E' - \phi(r)}{E - \phi(r)} \right)^n.$$