

# Динамическая эволюция скопления первичных черных дыр

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

2019

# 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

Кинетическое уравнение Больцмана:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \sum_{i=1}^3 v_i \frac{\partial f}{\partial x_i} - \sum_{i=1}^3 \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial v_i} = \Gamma(f),$$

Уравнение Пуассона:

$$\Delta \phi(\mathbf{x}, t) = 4\pi GM \int f(\mathbf{x}, \mathbf{v}, t) d^3\mathbf{v}.$$

## Приближение Фоккера-Планка

$$\frac{\partial f_a}{\partial t} \rho(E) = \Gamma \frac{\partial}{\partial E} \left[ \mu_a f_a D_E(E) + \frac{\partial f}{\partial E} D_{EE}(E) \right] = -\frac{\partial F_a}{\partial E},$$

$$\rho(r) = 4\pi\sqrt{2} \sum_a M_a \int_{\phi(r)}^{E_{max}} dE \sqrt{E - \phi(r)} f_a(E),$$

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

$$\Gamma = 16\pi^2 G^2 M_\odot^2 \ln \Lambda, \quad \mu_a = \frac{M_a}{M_\odot}.$$

# Параметры модели

Начальные условия:

$$f_a(E) = \frac{24\sqrt{2}N_a r_0^2 (-E)^{7/2}}{7\pi^3 G^5 M^5}, \rho_a(r) = \frac{3M_a}{4\pi r_0^3} \left(1 + \frac{r^2}{r_0^2}\right)^{-5/2}.$$

Граничные условия:

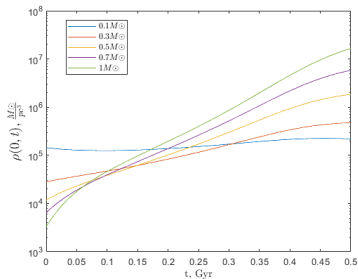
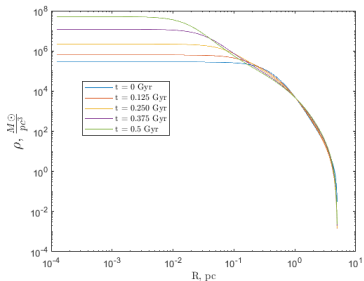
$$F_a(E_{min}) = f_a(E_{max}) = 0.$$

Спектр масс:

$$\frac{dN}{dM} \propto \frac{1}{M_\odot} \left(\frac{M}{M_\odot}\right)^\alpha.$$

$E_{min} = \phi(0)$ ,  $E_{max} = \phi(r_{max})$ ,  $N = 10^6$ ,  $r_0 = 0.5$  пк,  $r_{max} = 5$  пк,  
 $\alpha = -3$ ,  $M = 0.1M_\odot \div 1M_\odot$ .

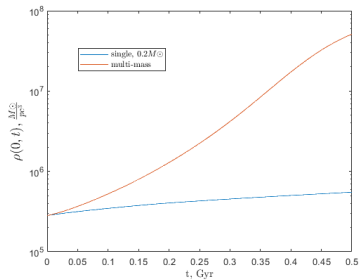
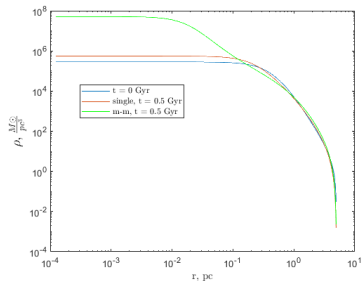
# Профиль плотности и в центральной области



- ▶ Сужение коры на 2 порядка.
- ▶ Увеличение плотности в центре на 2 порядка.
- ▶ Сегрегация масс.

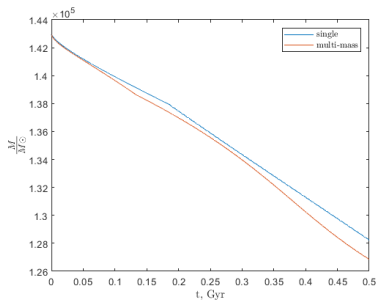
# Сравнение с однокомпонентным скоплением

$$M = 0.2M_{\odot}, N = 7.2 \cdot 10^5.$$



Существенно разные темпы эволюции.

# Изменение полной массы скопления



- ▶ Одинаковые темпы вылета ЧД.
- ▶ Уменьшение полной массы на  $\sim 10\%$ .



# Заключение

## Результаты:

- ▶ Увеличение плотности центральной области скопления и её сужение – коллапс.
- ▶ Различные темпы эволюции для скоплений с разным массовым диапазоном из-за эффекта динамического трения.

## Планы:

- ▶ Учет слияний ЧД.
- ▶ Учет центральной массивной ЧД и введение механизма падения на неё.
- ▶ Переход к условиям, соответствующих скоплениям ПЧД.

## Выражения для коэффициентов

$$D_E(E) = \sum_b \mu_b \int_{E_{min}}^E \rho(E') f_b(E') dE',$$

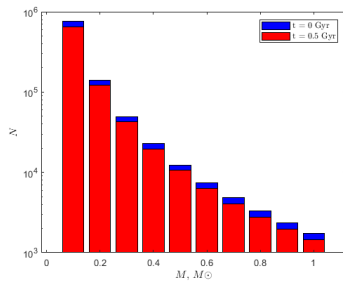
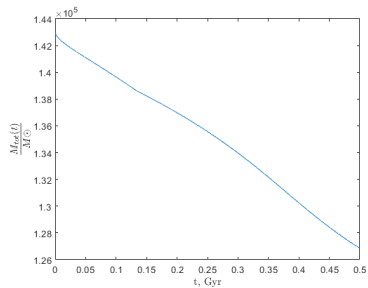
$$D_{EE}(E) = \sum_b \mu_b^2 \left( \int_{E_{min}}^E q(E') f_b(E') dE' + q(E) \int_E^{E_{max}} f_b(E') dE' \right),$$

$$q(E) = \frac{2\sqrt{2}}{3} \int_0^{r_m(E)} dr r^2 (E - \phi(r))^{3/2},$$

$$\rho(E) = \sqrt{2} \int_0^{r_m(E)} dr r^2 \sqrt{E - \phi(r)}.$$

$$r_m(E) : \phi(r_m) = E, \mu_b = \frac{M_b}{M_\odot}.$$

# Изменение полной массы многокомпонентного скопления



Примерно одинаковый темп вылета для разных компонент.