

# Динамическая эволюция скопления первичных черных дыр

Выполнил: Стасенко В.Д.

Научный руководитель: Кириллов А.А.

2020

# Введение

В результате квантовых флуктуаций на инфляционной стадии могут возникать скопления ПЧД<sup>1</sup>

Возможные проявления ПЧД:

- ▶ Составляют долю скрытой массы<sup>2</sup>
- ▶ Участвуют в формировании структур<sup>3</sup>
- ▶ Сверхмассивные черные дыры на больших красных смещениях<sup>4</sup>  $z > 6$
- ▶ Источники гравитационных волн<sup>5</sup>

---

<sup>1</sup>J.Exp.Theor.Phys. 92 (2001) 921-929

<sup>2</sup>Phys. Rev. D 94 (2016) 083504

<sup>3</sup>Astron. Rep. 52 (2008) 779-789

<sup>4</sup>Astrophys. J. 849 (2017) 91

<sup>5</sup>Phys. Rev. Lett. 116 (2016) 201301

# Уравнения

Уравнение Фоккера-Планка<sup>6</sup>:

$$\rho(E) \frac{\partial f_i}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial E} \left[ m_i f_i B(E, f) + \frac{\partial f_i}{\partial E} C(E, f) \right] - \nu_{lc}(E, f) f_i, \quad (1)$$

$\nu_{lc} f$  — конус потерь<sup>7</sup>

Гравитационный потенциал:

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

$$\rho(r) = 4\pi \sum_i m_i \int_{\phi(r)}^0 dE \sqrt{2(E - \phi(r))} f_i(E). \quad (3)$$

---

<sup>6</sup>Astrophys. J. 848 (2017) 10

<sup>7</sup>Class. Quantum Grav. 30 (2013) 244005

## Слияния черных дыр

Сечение гравитационного захвата двух черных дыр<sup>8</sup>:

$$\sigma = 2\pi \left( \frac{85\pi}{6\sqrt{2}} \right)^{2/7} \frac{G^2 (m + m')^{10/7} m^{2/7} m'^{2/7}}{c^{10/7} |\mathbf{v} - \mathbf{v}'|^{18/7}}, \quad (4)$$

где  $m$  и  $m'$  — массы сливающихся черных дыр.

Скорость слияния черных дыр с массой  $m_j$  со всеми остальными:

$$\Gamma_j = \sum_i \int dV n_i n_j \langle \sigma_{i,j} v_{i,j} \rangle = 25 \frac{\pi^2 G^2}{c^{10/7}} \sum_i (m_j + m_i)^{10/7} m_i^{2/7} m_j^{2/7} \times \int dr r^2 \frac{n_j n_i}{\bar{v}_j \bar{v}_i} \left[ (\bar{v}_j + \bar{v}_i)^{3/7} - |\bar{v}_j - \bar{v}_i|^{3/7} \right], \quad (5)$$

где  $\bar{v}_i$  и  $n_i$  — среднеквадратичная скорость и концентрация  $i$ -го массового типа ПЧД в кластере.

<sup>8</sup>Astrophys J. Lett. 566 (2002) L17

# Начальные данные

Профиль плотности:

$$\rho_i(r) = \rho_0 \left( \frac{r}{r_0} \right)^{-\gamma} \left[ 1 + \left( \frac{r}{r_0} \right)^\alpha \right]^{(\gamma-\beta)/\alpha}, \quad (6)$$

$\gamma = 2$ ,  $\alpha = 2$ ,  $\beta = 5$ ,  $r_0 = 0.5$  пк.

Спектр масс ПЧД<sup>9</sup>:

$$\frac{dN}{dm} \propto \frac{1}{M_\odot} \left( \frac{m}{M_\odot} \right)^s, \quad (7)$$

$s = -2$ , диапазон масс от  $10^{-2} M_\odot$  до  $10 M_\odot$ , число типов ПЧД 10, масса центральной ЧД  $M_\bullet = 100 M_\odot$ , масса кластера  $M_{cl} = 10^6 M_\odot$ .

---

<sup>9</sup>Eur. Phys. J. C 79 (2019) 246

# Эволюция профиля плотности

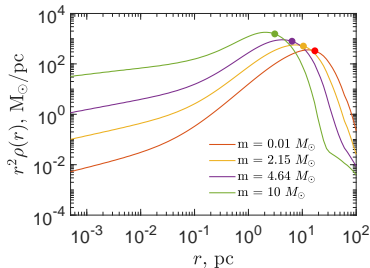
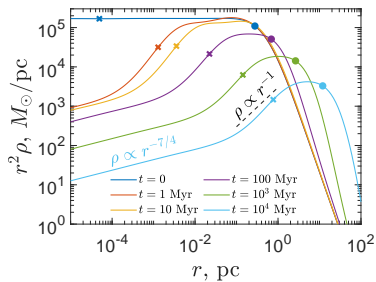


Рис. 1 — Слева: полное массовое распределение ПЧД для разных моментов времени. Справа: массовое распределение разных типов ПЧД при  $t = 10$  млрд. лет. Кресты — радиусы, содержащие  $M_{\bullet}$  массы, точки — половину массы  $r_h$ .  $r^2 \rho(r) \propto \frac{dM(r)}{dr}$

Скопление автомодельно расширяется, приобретает слоистую структуру, в центре касп Бакалла — Вольфа<sup>10</sup>, снаружи  $\rho \propto r^{-2}$ .

<sup>10</sup>Astrophys. J. 209 (1976) 214

# Эволюция массовых оболочек

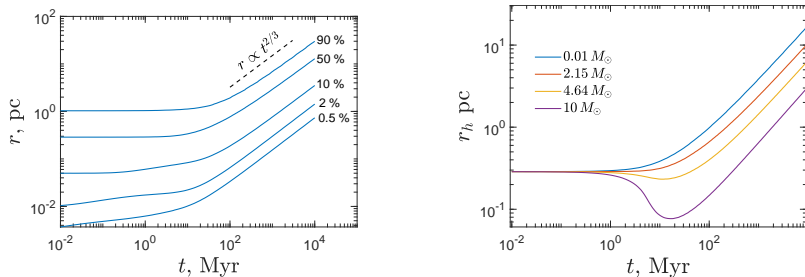


Рис. 2 — Слева: эволюция оболочек, содержащих указанное количество массы. Справа: Эволюция радиуса, содержащего половину массы, для указанных типов ПЧД.

Происходит сжатие массивных ПЧД к центру скопления в результате динамического трения.

# Рост массы центральной ЧД

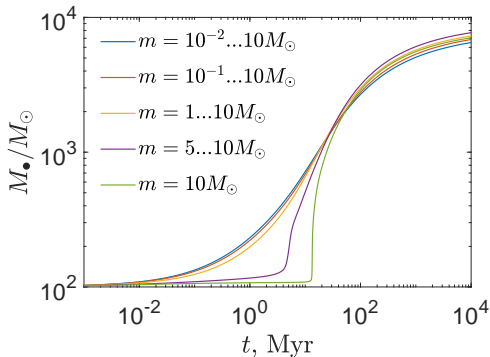


Рис. 3 — Масса центральной ЧД для скоплений с разными диапазонами изменений масс,  $M_{cl} = 10^6 M_{\odot}$ .

$M_{\bullet}$  увеличивается до  $\sim 10^4 M_{\odot}$ . Учет аккреции также может увеличить массу центральной ЧД на поздних этапах эволюции.



# Скорость слияния черных дыр в кластере

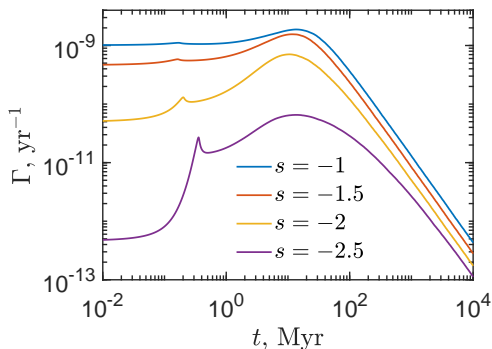


Рис. 4 — Скорость слияния черных дыр с массой  $10 M_{\odot}$ , для кластера с параметрами:  $M_{cl} = 10^5 M_{\odot}$ ,  $\gamma = 1$ ,  $\alpha = 2$ ,  $\beta = 5$  и разными показателями степени спектра масс.

$$\text{LIGO/Virgo}^{11}: \Gamma_V \sim 100 \text{ лет}^{-1} \Gamma_{\text{пк}}^{-3} \rightarrow \Omega_{cl} \lesssim 0.7$$

<sup>11</sup>Phys. Rev. Lett. 118 (2017) 221101

# Заключение

Эволюция скопления ПЧД приводит к

- ▶ Значительному увеличению размера скопления  $r_h \sim 10$  пк.
- ▶ Массе центральной ЧД увеличивается до  $\sim 10^4 M_\odot$ .
- ▶ Возникновению слоистой структуры в распределении масс.

Кластеризация ПЧД не приводит к ограничениям по гравитационным волнам.