

Динамическая эволюция скопления первичных черных дыр

Выполнил: Стасенко В.Д.

Научный руководитель: Кириллов А.А.

2021

Введение

Идея формирования ПЧД в ранней Вселенной была предложена Зельдовичем и Новиковым¹.

Возможные проявления ПЧД:

- ▶ Составляют долю скрытой массы².
- ▶ Раннее формирование структур³.
- ▶ Сверхмассивные черные дыры на больших красных смещениях⁴ $z > 7$.
- ▶ Источники гравитационных волн⁵.

¹Sov. Astron. 10 (1967) 602

²Annu. Rev. Nucl. Part. Sci. 70 (2020) 355-394

³Phys. Rev. D. 100 (2019) 083528

⁴Nature 553 (2018) 473-476

⁵Phys. Rev. Lett. 116 (2016) 201301

Введение

В работе рассматривается динамика скопления ПЧД⁶ и оценивается темп слияний ПЧД в кластере → ограничение на плотность кластеров во Вселенной.

Момент формирования $z_f = 10^4$.

Условие отцепления от расширения Вселенной $\delta\rho/\rho \sim 1 \rightarrow \langle\rho_{cl}\rangle \sim \rho_{DM}(z_f) \sim 10^4 M_\odot \text{ пк}^{-3} \rightarrow R_{cl} = 1 \text{ пк}, M_{cl} = 10^5 M_\odot$.

Доля кластеров⁷ $\Omega_{cl}/\Omega_{DM} \lesssim 0.05 \rightarrow$ формирование гало скрытой массы вокруг кластера⁸ $\rho_H \propto r^{-9/4}$.

⁶Astropart. Phys. 23 (2005) 265-277

⁷Phys. Rev. Lett. 123 (2019) 071102

⁸Astrophys. J. Suppl. 58 (1985) 39-65

Уравнения

Уравнение Фоккера-Планка⁹:

$$\frac{\partial N}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial E} (N \langle \Delta E \rangle) + \frac{1}{2} \frac{\partial^2}{\partial E^2} (N \langle (\Delta E)^2 \rangle) - \nu_{lc} N, \quad (1)$$

где $N = 4\pi^2 \rho(E) f(E)$ и $\nu_{lc} N$ — конус потерь¹⁰, который учитывает захват ПЧД центральной ЧД.

Гравитационный потенциал:

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

профиль плотности:

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

⁹Astrophys. J. 848 (2017) 10

¹⁰Class. Quantum Grav. 30 (2013) 244005

Слияния черных дыр

Сечение гравитационного захвата двух черных дыр¹¹:

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

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.

¹¹Astrophys J. Lett. 566 (2002) L17

Начальные данные

Профиль плотности ПЧД:

$$\rho_i(r) = \rho_0 \left(\frac{r}{r_0} \right)^{-1} \left[1 + \left(\frac{r}{r_0} \right)^2 \right]^{-2}, \quad (6)$$

профиль скрытой массы:

$$\rho_{DM} = \rho_{0,DM} \left(1 + \frac{r}{r_0} \right)^{-9/4}, \quad (7)$$

$$\rho_{0,DM} = \rho_{DM}(z = 10^4) \sim 10^4 M_\odot \text{ пк}^{-3}, \quad r_0 = 1 \text{ пк}, \quad M_{cl} = 10^5 M_\odot$$

Спектр масс ПЧД¹²:

$$\frac{dN}{dm} \propto \frac{1}{M_\odot} \left(\frac{m}{M_\odot} \right)^{-2} \Bigg|_{0.01 M_\odot}^{10 M_\odot}, \quad M_\bullet = 100 M_\odot. \quad (8)$$

¹²Eur. Phys. J. C 79 (2019) 246

Эволюция массового распределения

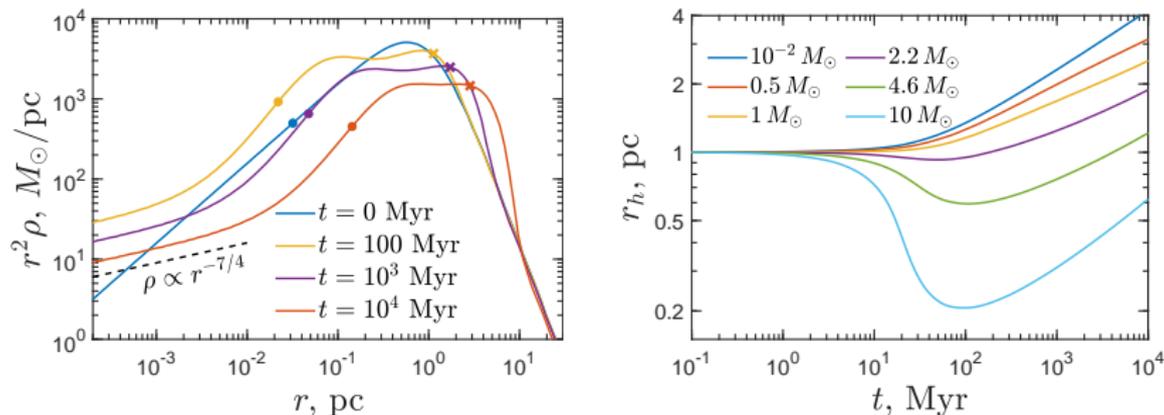


Рис. 1 — Слева: полное массовое распределение ПЧД для разных моментов времени. Точки — радиусы, содержащие M_{\bullet} массы, кресты — половину массы r_h . Справа: Эволюция радиуса, содержащего половину массы r_h , для указанных типов ПЧД

$$r^2 \rho(r) \propto \frac{dM(r)}{dr}, \quad \rho \propto r^{-7/4} \quad \text{касп Бакалла — Вольфа}^{13}.$$

¹³Astrophys. J. 209 (1976) 214

Эволюция массового распределения

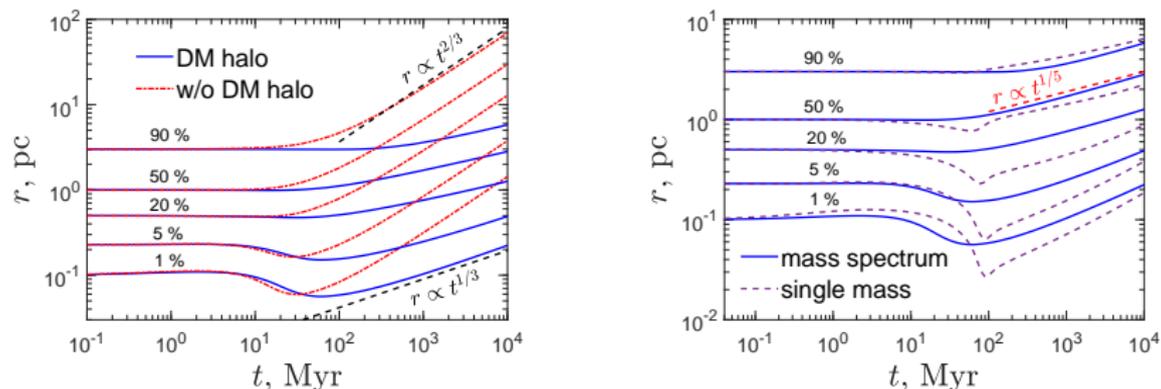


Рис. 2 — Эволюция оболочек, содержащих указанное количество массы (в процентах от M_{cl}). Слева: расчеты с гало скрытой массы и без. Справа: расчеты с широким степенным спектром масс (8) и для монохроматического спектра масс $m = 10 M_{\odot}$

Рост массы центральной ЧД

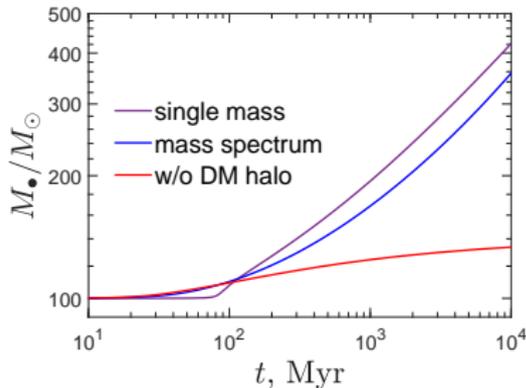
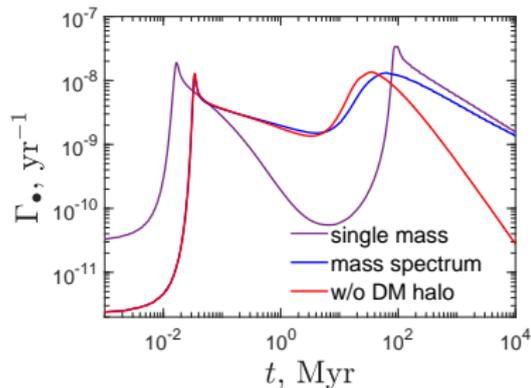


Рис. 3 — Слева: Скорость слияний ПЧД с массой $10 M_{\odot}$ и с ЦЧД в зависимости от времени. Справа: Зависимость массы ЦЧД от времени

Скорость слияния черных дыр в кластере

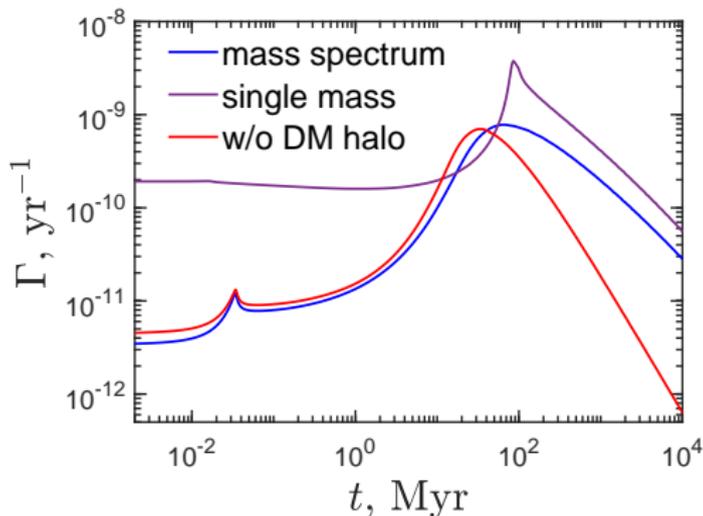


Рис. 4 — Скорость слияния черных дыр с массой $10 M_{\odot}$ в зависимости от времени

LIGO/Virgo¹⁴: $\Gamma_V \sim 100 \text{ лет}^{-1} \Gamma_{\text{пк}}^{-3} \rightarrow \Omega_{cl}/\Omega_{DM} \lesssim 0.01$.

¹⁴Phys. Rev. Lett. 118 (2017) 221101

Заключение

Была изучена эволюция скопления ПЧД. Основные результаты:

- ▶ Учет гало скрытой массы замедляет темп расширения скопления.
- ▶ Современный размер кластера $r_h \sim 3$ пк.
- ▶ Масса центральной ЧД увеличивается до $\sim 400 M_\odot$.
- ▶ Темп слияний ПЧД в современную эпоху накладывает ограничения на количество кластеров $\Omega_{cl}/\Omega_{DM} \lesssim 0.01$.