

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 ПЧД¹

Возможные проявления ПЧД:

- ▶ Составляют долю скрытой массы²
- ▶ Участвуют в формировании структур³
- ▶ Сверхмассивные черные дыры на больших красных смещениях⁴ $z > 6$
- ▶ Источники гравитационных волн

¹J.Exp.Theor.Phys. 92 (2001) 921-929

²Phys. Rev. D 94 (2016) 083504

³Astron. Rep. 52 (2008) 779-789

⁴Astrophys. J. 849 (2017) 91

Уравнения

Уравнение Фоккера-Планка:

$$\frac{\partial N_i}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial E}(N_i \langle \Delta E \rangle_{\text{orb}}) + \frac{1}{2} \frac{\partial^2}{\partial E^2}(N_i \langle (\Delta E)^2 \rangle_{\text{orb}}), \quad (1)$$

$$N_i(E) = 4\pi^2 \rho(E) f_i(E).$$

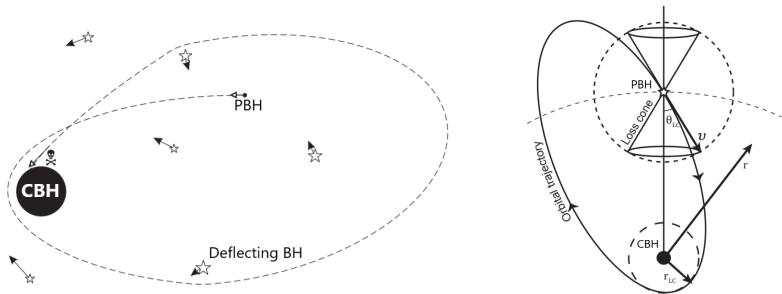
Уравнение Пуассона:

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

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

Конус потерь⁶

ЧД поглощает частицы с моментом импульса $L < L_{lc} = 2mcr_g$



Уравнение Фоккера-Планка с учетом конуса потерь⁵:

$$\rho(E) \frac{\partial f_i}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial E} \left[m_i f_i B(E, f) + \frac{\partial f_i}{\partial E} C(E, f) \right] - \nu_{lc}(E, f) f_i. \quad (4)$$

⁵Astrophys. J. 848 (2017) 10

⁶Class. Quantum Grav. 30 (2013) 244005

Начальные данные

Профиль плотности:

$$\rho_i(r) = \rho_0 \left(\frac{r}{r_0} \right)^{-\gamma} \left[1 + \left(\frac{r}{r_0} \right)^\alpha \right]^{(\gamma-\beta)/\alpha}, \quad (5)$$

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

Спектр масс ПЧД⁷:

$$\frac{dN}{dm} \propto \frac{1}{M_\odot} \left(\frac{m}{M_\odot} \right)^{-2}, \quad (6)$$

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 $M_{cl} = 10^6 M_\odot$.

⁷Eur. Phys. J. C 79 (2019) 246

Эволюция профиля плотности

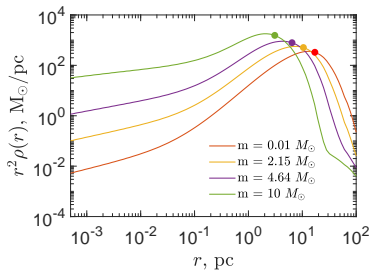
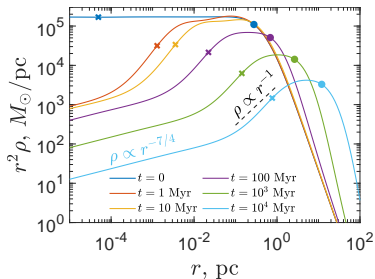


Рис. 1 — Слева: полное массовое распределение ПЧД для разных моментов времени. Справа: массовое распределение разных типов ПЧД при $t = 10$ млрд. лет. Кресты — радиусы, содержащие M_* массы, точки — половину массы r_h . $r^2 \rho(r) \propto \frac{dM(r)}{dr}$

Скопление автомодельно расширяется, приобретает слоистую структуру, в центре касп Бакалла — Вольфа⁸, снаружи $\rho \propto r^{-2}$.

⁸Astrophys. J. 209 (1976) 214

Эволюция массовых оболочек

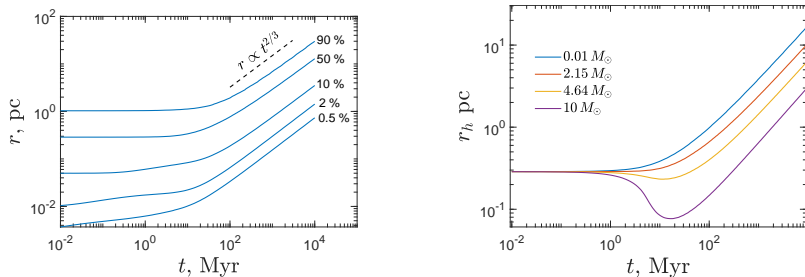


Рис. 2 — Слева: эволюция оболочек, содержащих указанное количество массы. Справа: Эволюция радиуса, содержащего половину массы, для указанных типов ПЧД.

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

Сравнение с монохроматическим спектром

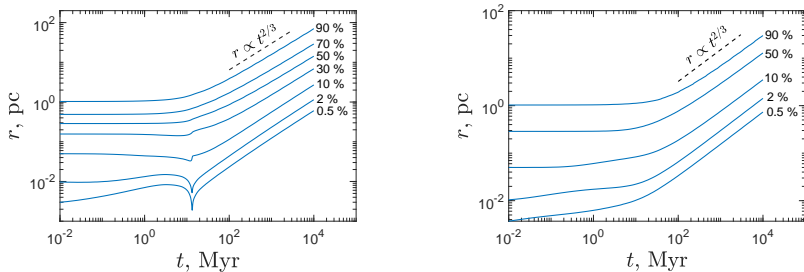


Рис. 3 — Эволюция оболочек, содержащих указанное количество массы. Слева: для скопления с монохроматическим спектром масс $m = 10 M_{\odot}$. Справа: для скопления с диапазоном масс $m = 10^{-2} - 10 M_{\odot}$. Масса скопления в обоих случаях $M_{cl} = 10^6 M_{\odot}$.

Сжатие центральных оболочек для скопления с монохроматическим спектром масс.

Рост массы центральной ЧД

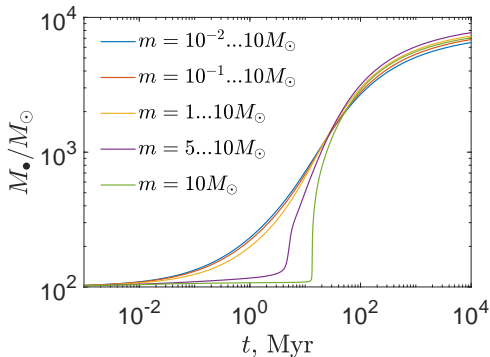


Рис. 4 — Масса центральной ЧД для скоплений с разными диапазонами изменений масс, $M_{cl} = 10^6 M_{\odot}$.

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

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.