

Влияние ранних гало темной материи на темп слияний первичных черных дыр

Виктор Стасенко

НИЯУ МИФИ

2023

Введение

Идея формирования ПЧД предложена Зельдовичем и Новиковым (1967)

Мотивация:

- ▶ Темная материя (Carr and Kuhnel, 2021)
- ▶ Сверхмассивные черные дыры при больших красных смещениях $z \gtrsim 7$ (Banados et al., 2018)
- ▶ Гравитационные волны от сливающихся двойных ЧД (Sasaki et al., 2016) $\rightarrow f_{PBH} = \Omega_{PBH}/\Omega_{DM} \lesssim 10^{-3}$
- ▶ Раннее формирование структур (Afshordi et al., 2003).
Наблюдения JWST галактик в молодой Вселенной (Liu and Bromm, 2022)

Двойные ПЧД в ранней Вселенной

Распределение по параметрам двойных ПЧД

$$dP = \frac{3}{2} f_{PBH}^{3/2} \frac{\sqrt{a}}{j^2} dj da$$

где $j = \sqrt{1 - e^2}$

Время жизни двойной ЧД

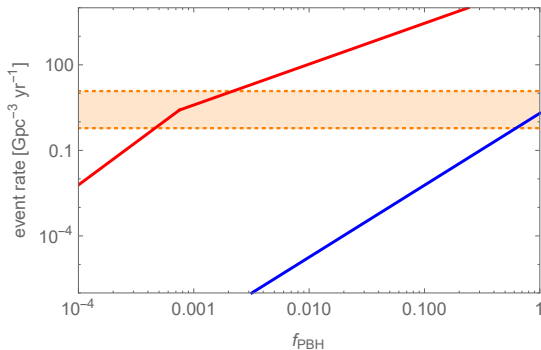
$$t_{gw} = \frac{3c^5 a^4 j^7}{170 G^3 m^3}$$

где $m = 10 M_{\odot}$ масса ПЧД

Двойные формируются высокоэксцентричными: типичное значение $j \sim 10^{-3}$

Идея состоит в том, чтобы каким-то образом увеличить j

Темп слияний ПЧД (Sasaki et al., 2018)



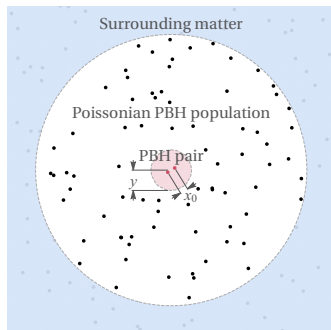
Пуассоновский шум и ранние гало ТМ

Спектр мощности материи:

$$P = T_{ad}^2(k)P_{ad}(k) + T_{iso}^2 P_{PBH},$$

Спектр мощности ПЧД (Afshordi et al., 2003):

$$P_{PBH} = T_{iso}^2 P_{PBH} = \frac{9}{4}(1 + z_{eq})^2 \frac{f_{PBH} M_{PBH}}{\Omega_{DM} \rho_c}$$
$$\approx 8.3 \times 10^{-3} f_{PBH} \left(\frac{M_{PBH}}{10 M_{\odot}} \right) \text{ Мpc}^3$$

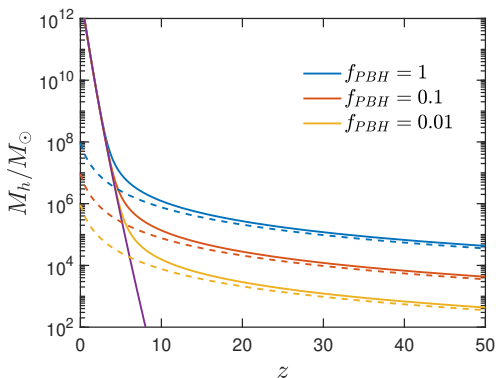


ПЧД генерируют флуктуации $\delta \sim 1/\sqrt{N}$. Инфляционные адиабатические флуктуации $\delta_{infl} \sim 10^{-5}$

Формируются ранние структуры, в которых параметры двойных будут возмущаться $\rightarrow t_{gw}$ растёт

Дисперсия флуктуаций

$$\sigma_M^2 = \frac{1}{2\pi^2} \int dk k^2 P(k) W^2(k, M) \approx f_{PBH} \frac{9M_{PBH}}{4m} \left(\frac{1+z_{eq}}{1+z} \right)^2$$



Гало характерной (типичной) массы в зависимости от красного смещения:

$$\sigma_M = \delta_c \approx 1.69$$

Время коллапса кора гало

Гало состоит как из ПЧД, так и из частиц ТМ. И испытывает коллапс кора — сжатие центральной области гало

Используем профиль плотности Бюркерт

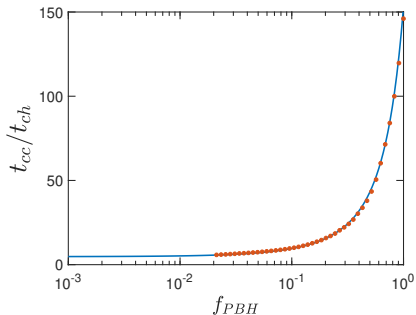
$$\rho_H = \frac{\rho_c}{(1 + r/r_0)(1 + r^2/r_0^2)}$$

Характерный временной масштаб

$$t_{ch} = \frac{\sigma^3}{G^2 m \rho_c \ln \Lambda}$$
$$\sim 0.7 \frac{10^4}{a} \left(\frac{N}{10^3} \right) \left(\frac{1+z}{10} \right)^{-3/2} \text{ Gyr}$$

где $\rho_c = a \rho_M(z)$

Время жизни двойных в коллапсирующих гало $t_{gw} > t_H$



Время коллапса кора гало, формирующегося при $z_f = 10$.

Сплошная линия

$$\frac{t_{cc}}{t_{ch}} = 15.9 \left(1.3 e^{2.1 f_{PBH}} - 1 \right)$$

Подавляющий фактор

Темп слияний будет подавляться из-за того, что двойные будут сливаться за время больше Хаббловского t_H : $\mathcal{R} = \mathcal{R}_0 \times S_f$

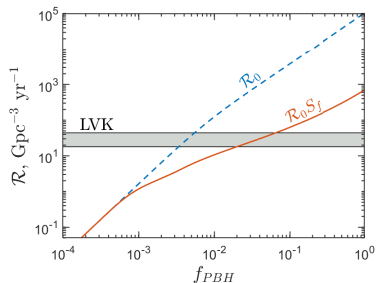
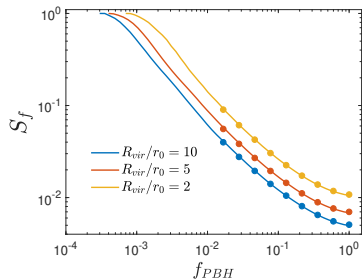
Нужно посчитать долю двойных, которые оказались в коллапсирующих гало за время $< t(z)$

$$S_f(z) = 1 - \sum_{N=3}^{N_c(z)} \bar{p}_N(z_f) - \sum_{N' > N_c} \left(\sum_{N=3}^{N_c(z)} \tilde{p}_N(z_f) \right) \bar{p}_{N'}(z_f), \quad (1)$$

где p_N — функция распределения количества ПЧД в гало при красном смещении z

$$p_N(z_f) \propto N^{-1/2} e^{-N/N^*(z_f)}, \quad \sum_{N \geq 2} \bar{p}_N = 1, \quad \sum_{N=2}^{N'} \tilde{p}_N = 1, \quad (2)$$

Темп слияний ПЧД



Слева: подавляющий фактор. Справа: темп слияний ПЧД, закрашенная область — наблюдения LVK $\mathcal{R} = 18 \div 44 \text{ Гpc}^{-3} \text{yr}^{-1}$

Ограничения на ПЧД по гравитационным волнам могут быть ослаблены до $f_{PBH} \sim 0.1$

Заключение

- ▶ ПЧД индуцируют формирование ранних гало ТМ
- ▶ Эти гало эволюционируют на малых временных масштабах, ПЧД в них активно взаимодействуют друг с другом
- ▶ В результате чего ограничения по гравитационным волнам на вклад ПЧД в состав ТМ ослабляются до $f_{RVN} \sim 0.1$ для ПЧД с массой $m = 10 M_{\odot}$

Бэкап

Темп слияний невозмущенных двойных ПЧД (Vaskonen and Veermäe, 2019)

$$\mathcal{R}_0 = \frac{7.7 \times 10^5}{\text{Gpc}^3 \text{ yr}} f_{PBH}^{53/37} \left(\frac{m}{M_\odot} \right)^{-32/37} \left(1 + \frac{2.3\sigma_M^2}{f_{PBH}^2} \right)^{-21/74} \quad (3)$$

Время релаксации

$$t_r = \frac{0.34\sigma^3}{G^2 m \rho_{PBH} \ln \Lambda}, \quad (4)$$

Время динамического трения

$$t_{df} = \frac{3}{8} \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{\sigma^3}{G^2 m \rho_{DM} \ln \Lambda}. \quad (5)$$