

Слияния первичных черных дыр

Виктор Стасенко
НГУ, НИЯУ МИФИ

V. Stasenko and K. Belotsky, MNRAS, 526, 4308 (2023), 2307.12924

V. Stasenko, preprint 2403.11325

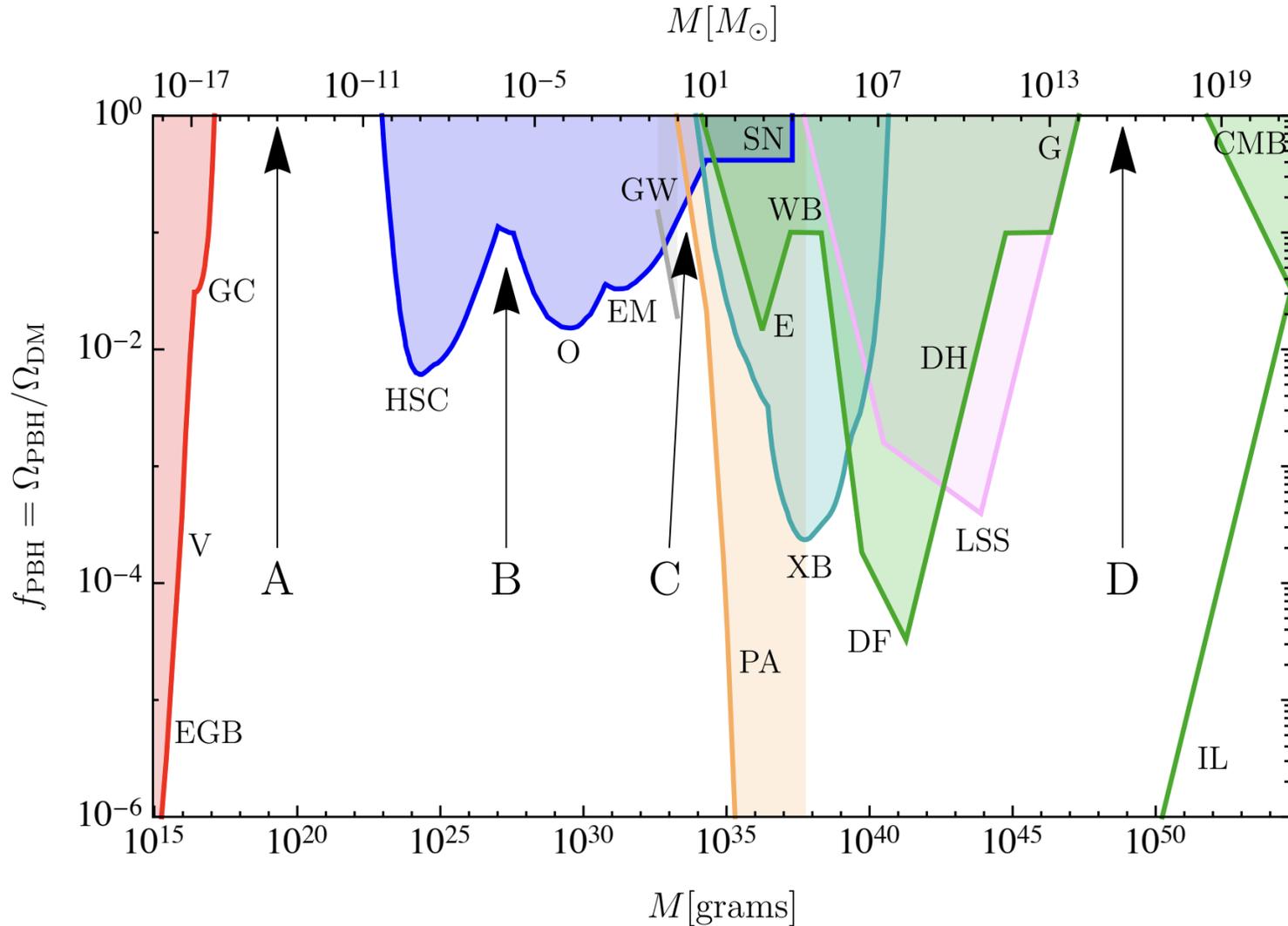
О чем

- Введение в ПЧД
- Кандидат в темную материю
- Слияния ПЧД в свете наблюдений LIGO-Virgo-KAGRA
- Кластеризация ПЧД
- Влияние кластеризации на слияния
- Слияния при больших z

Введение

- ПЧД – гипотетические ЧД, возникающие в результате коллапса флуктуаций плотности $\delta\rho/\rho \sim 1$ глубоко на РД стадии
- Идея была предложена Зельдовичем и Новиковым в 1967
- Позже развита Хокингом и Карром в 1971
- Основной механизм генерации таких больших флуктуаций – инфляция. Хотя рассматриваются и коллапс доменных стенок, струн, ...

ПЧД кандидат в темную материю



Почти во всех массовых диапазонах есть ограничения. Но они модельно зависимы и пересматриваются

Мы будем работать в области $m \sim 10 M_{\odot}$
 И подразумевать двухкомпонентную ТМ –
 ПЧД + частицы ТМ

Указания на ПЧД

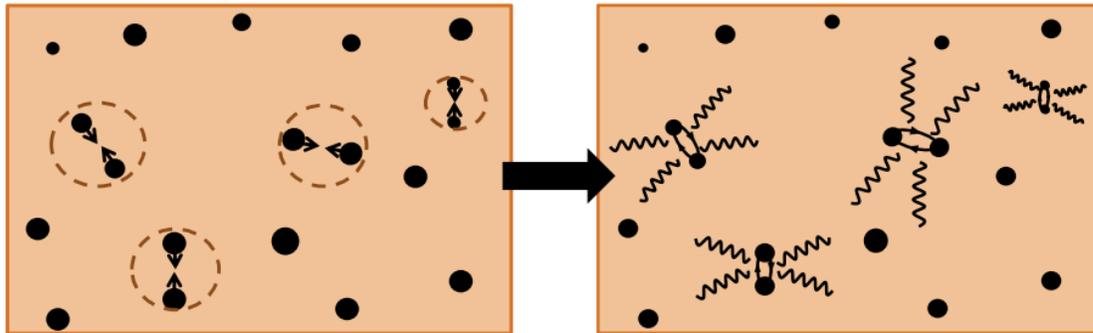
Даже если не вся темная материя состоит из ПЧД, то они все равно могут быть астрофизически значимы

- Сверхмассивные черные дыры в молодой Вселенной
- Ранние галактики - Accelerating Early Massive Galaxy Formation with Primordial Black Holes, 2208.13178; Carr and Silk, Primordial Black Holes as Generators of Cosmic Structures, 1801.00672
- ГВ фон от формирования ПЧД и их слияний - NANOGrav Hints to Primordial Black Holes as Dark Matter, 2009.08268; Do pulsar timing arrays observe merging primordial black holes? 2306.17836. **Будущие наблюдения LISA**
- Слияния черных дыр десятков солнечных масс – LIGO-Virgo-KAGRA

Двойные ПЧД

Существует два основных механизма формирования двойных

1) Отцепление от Хаббловского потока в ранней Вселенной - **ранние двойные**. Sasaki et al., Primordial Black Hole Scenario for the Gravitational-Wave Event GW150914, 1603.08338

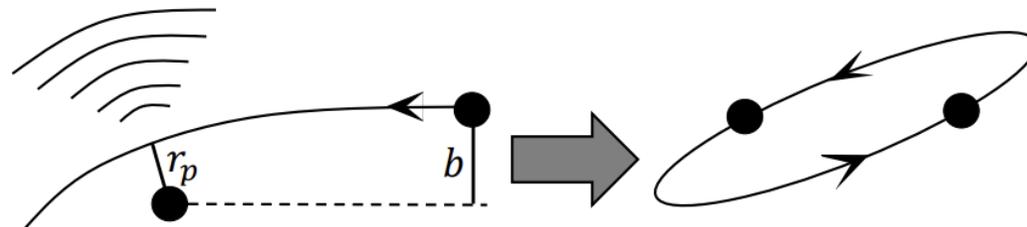


Распределение по параметрам ранних двойных

$$dP = \frac{3}{2} \left(\frac{f}{\bar{x}} \right)^{3/2} \frac{\sqrt{a}}{j^2} da dj$$

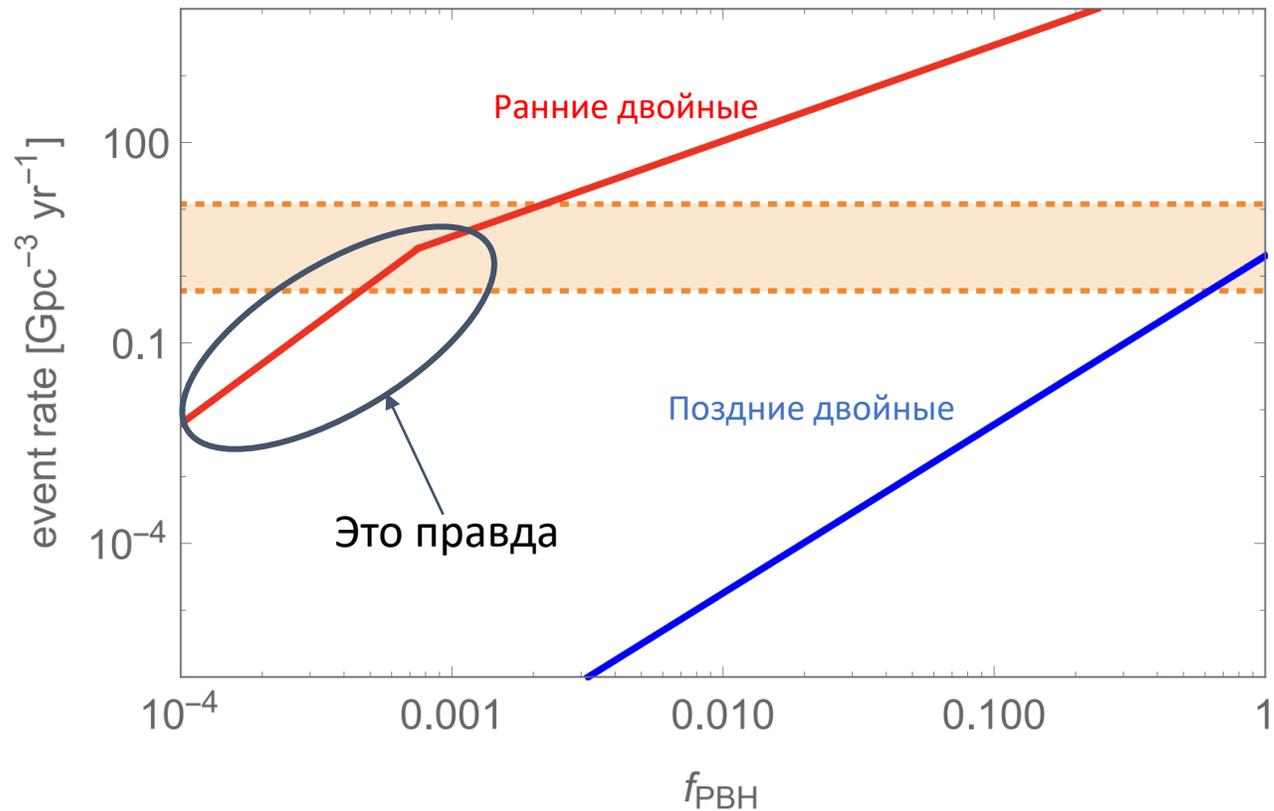
$$j \ll 1$$

$$j = \sqrt{1 - e^2}$$



2) Динамический канал в современных структурах - **поздние двойные**. Bird et al., Did LIGO detect dark matter? 1603.00464. Такие двойные сливаются мгновенно

LVK ограничения



Красная линия справедлива, если с двойными ничего не случилось с момента их формирования до слияния. **А это может быть не так, двойные могут разрушить или с возмутиться**

Также считается, что вклад поздних двойных пренебрежимо мал. **Будет показано, что это тоже не так**

Sasaki et al., Primordial Black Holes - Perspectives in Gravitational Wave Astronomy, 1801.05235

Пуассоновская кластеризация ПЧД

ПЧД за счет их случайного распределения создают флуктуации плотности. На малых масштабах эти флуктуации доминируют над инфляционными

$$\delta \sim f_{PBH} / \sqrt{N}$$

Меняется спектр мощности (Afshordi et al. 2003, astro-ph/0302035)

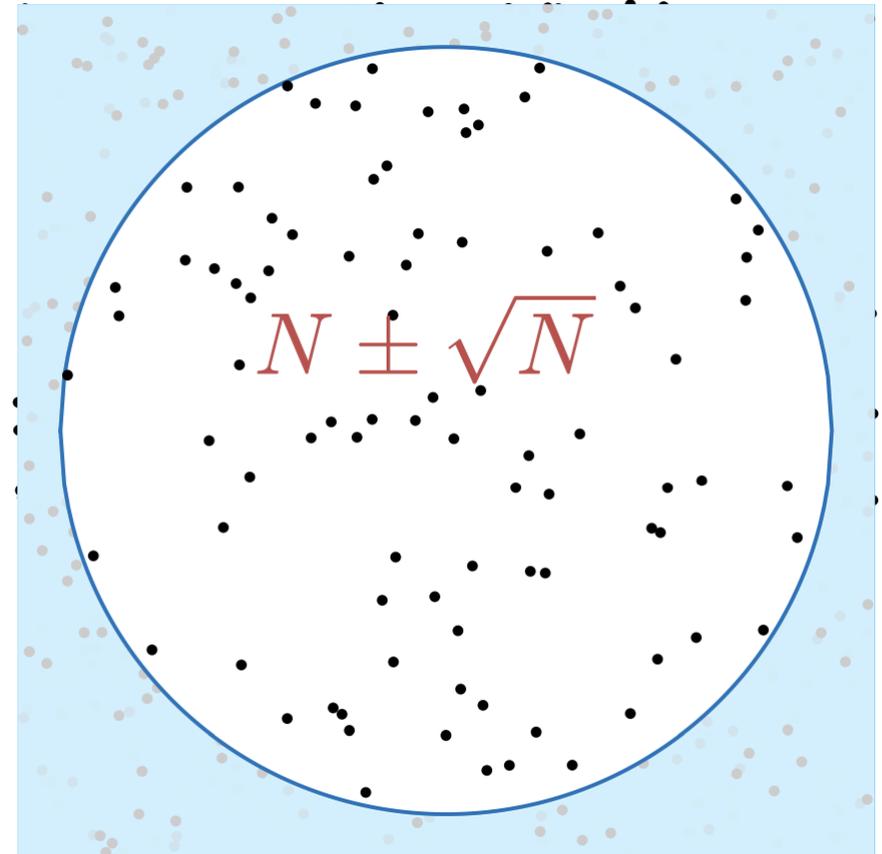
$$P_{PBH} = T_{iso}^2 \frac{m f_{PBH}}{\Omega_{DM} \rho_c} = \frac{9}{4} (1 + z_{eq})^2 \frac{m f_{PBH}}{\Omega_{DM} \rho_c}$$

Дисперсия флуктуаций

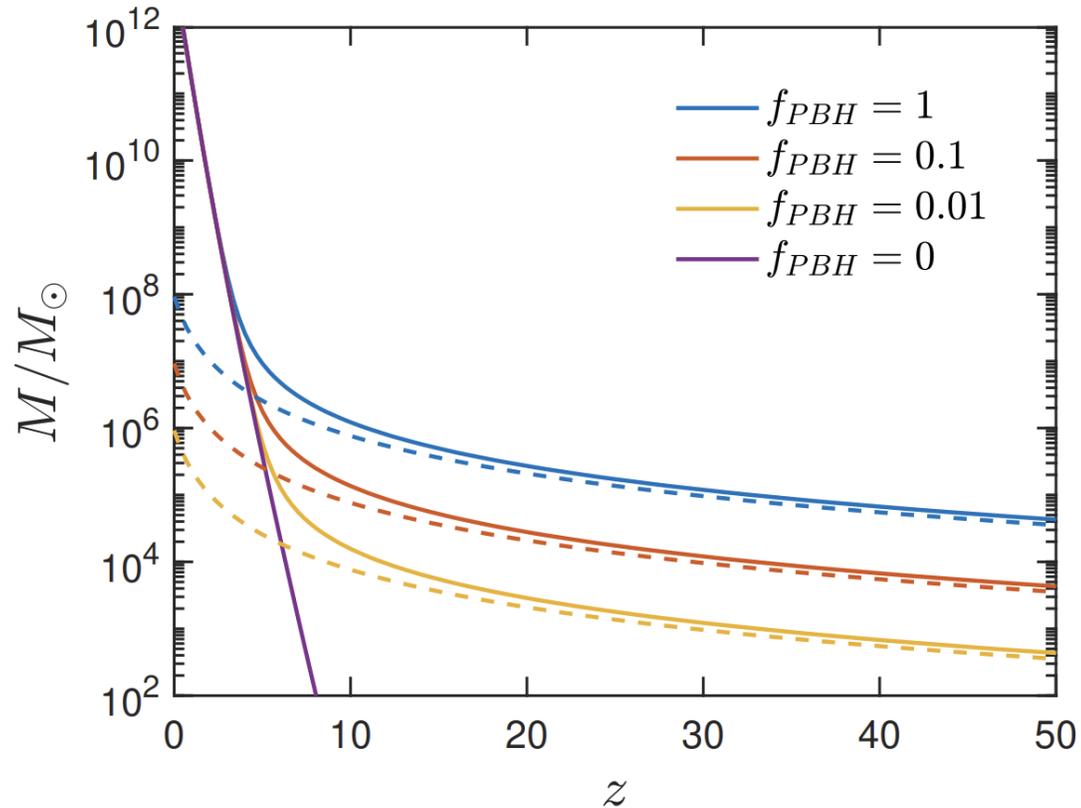
$$\sigma_M^2(R, z) = D^2(z) \int \frac{dk}{2\pi^2} k^2 P(k) W^2(kR)$$

$$\sigma_M^2(M) = \frac{9 m f_{PBH}}{4 M} \left(\frac{1 + z_{eq}}{1 + z} \right)^2$$

Если учитывать только ПЧД, это большие z



Гало характерной массы из ПЧД + ТМ



Определяется как $\sigma(M_{\text{ch}}) = \delta_c = 1.69$

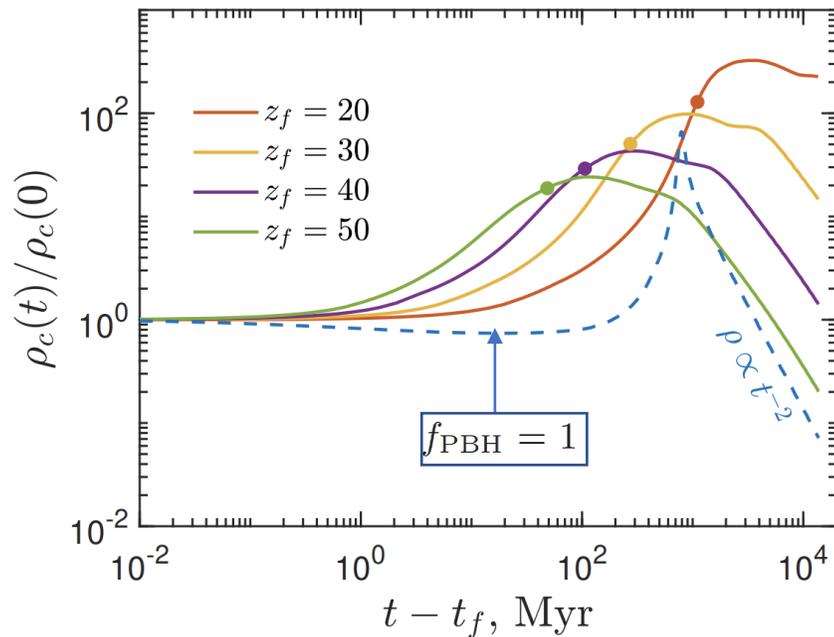
Пунктирные линии даются выражением

$$M_{\text{ch}} = \frac{9 m f_{\text{PBH}}}{4 \delta_c^2} \left(\frac{1 + z_{\text{eq}}}{1 + z} \right)^2$$

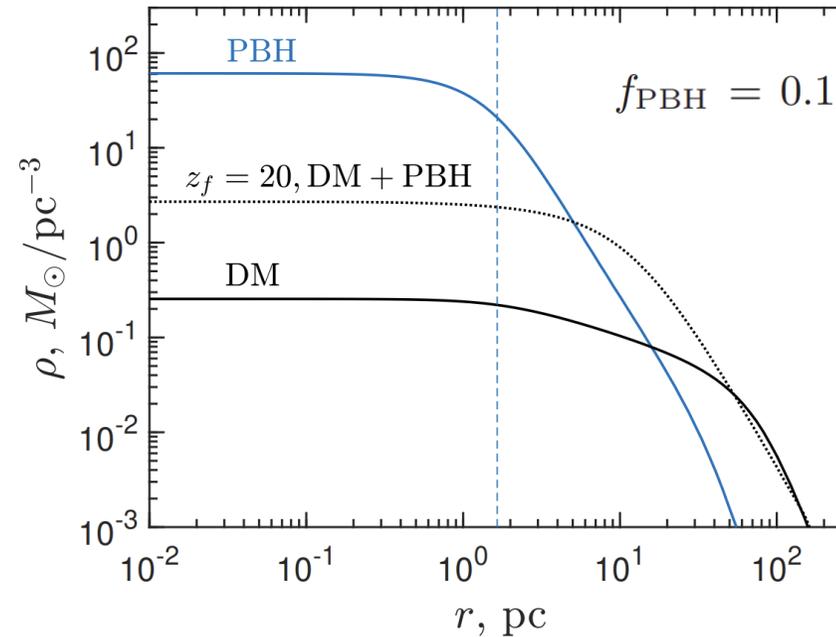
Хотелось бы, чтобы в таких структурах ранние двойные разрушались при взаимодействиях с другими ПЧД, **но не все так просто**. Темп таких взаимодействий очень слаб (Yacine Ali-Haïmoud et al. 2017, 1709.06576)

Динамика гало

Ранние гало эволюционируют, как шаровые звездные скопления – задача N-тел -> решаем кинетическое уравнение Фоккера-Планка



Эволюция центральной плотности ПЧД в гало, формирующихся при разных z_f и $f_{\text{PBH}} = 0.1$



Профиль плотности гало в современный момент. Пунктир – на момент формирования

Эволюция гало ведет к формированию плотных кластеров ПЧД. В таких кластерах двойные активно возмущаются! Коллапс кора прекращается за счет формирования двойных в трехтельных взаимодействиях

Слияния ПЧД

Механизм возмущения – за время коллапса кора двойная рассеивается на одиночной -> ее угловой момент растет (Jedamzik 2006.11172)

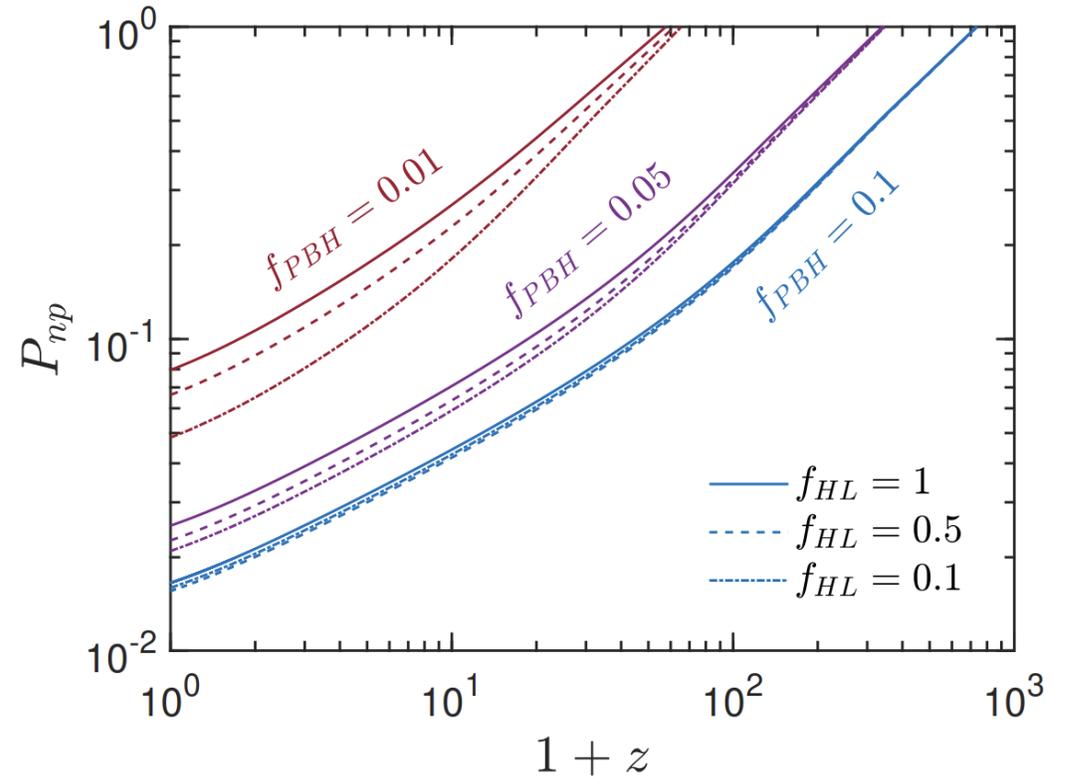
$$t_{\text{mer}} = \frac{3c^5 a^4 j^7}{170 G^3 m^3}, \quad j \ll 1$$

Ранние двойные

Доля невозмущенных двойных (Vaskonen and Veermäe 2019, 1908.09752)

$$P_{\text{np}}(z) = 1 - \sum_{N=3}^{N_{\text{crit}}(z)} p_N(z_f) - \sum_{N' > N_{\text{crit}}(z)} \left(\sum_{N=3}^{N_{\text{crit}}(z)} \tilde{p}_N(z_f) \right) p_{N'}(z_f)$$

Грубо говоря сливаться будут те двойные, которые не кластеризовались



Возникает следующая цепочка: двойная попадает в гало ТМ + ПЧД -> формируется кластер ПЧД с большая плотность -> вероятность возмущения двойной = 1 в кластере

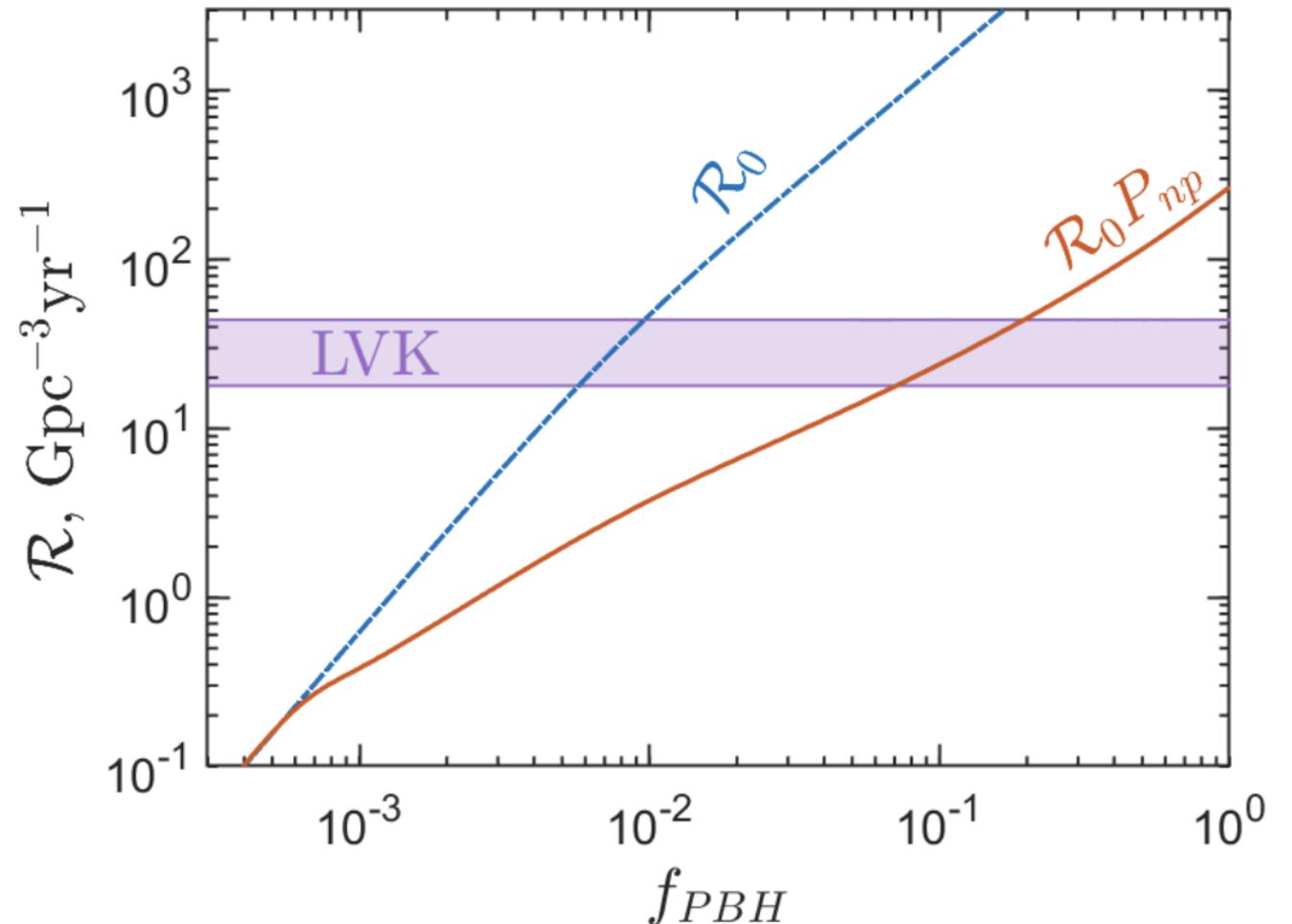
Слияния ПЧД

Сливаются невозмущенные двойные

$$\mathcal{R} = \mathcal{R}_0 P_{np}$$

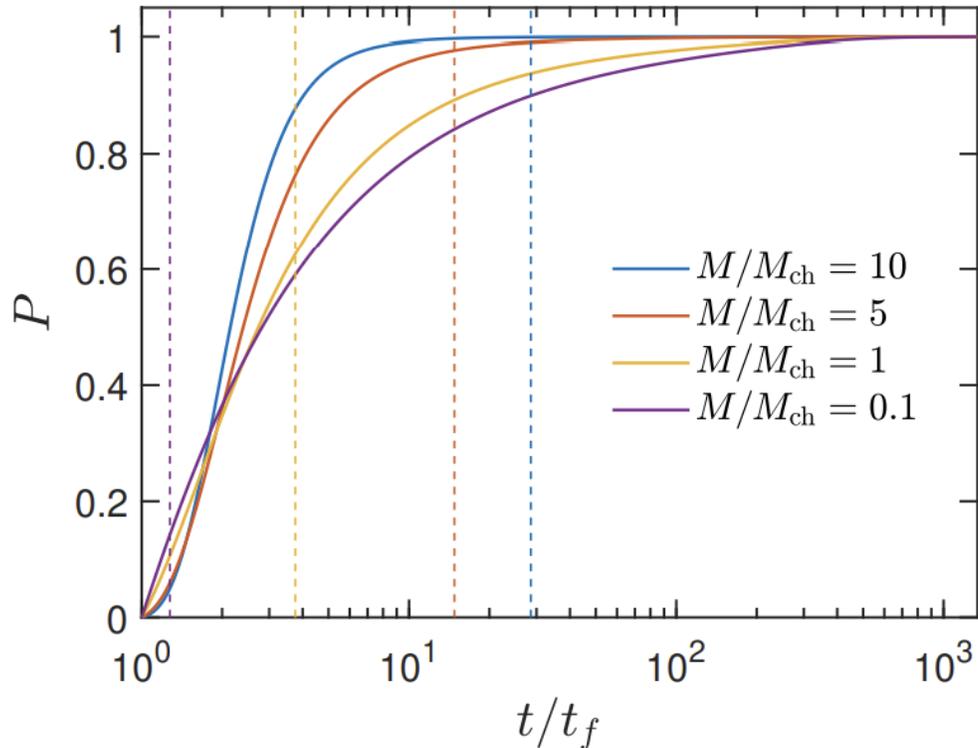
Темп слияний ранних двойных значительно подавляется. Ограничения ослабляются до уровня ограничений по микролинзированию $f_{PBH} \leq 0.1$

Фиолетовая область – данные GWTC-3 LVK 2111.03634



Выживаемость кластеров

Естественно задаться вопросами – а что если гало разрушаются быстрее при формировании структур, чем двойные? Будут ли сейчас кластеры ПЧД?



Вероятность того, что гало с массой M будет в гало с массой $2M$ в зависимости от времени. Здесь t_f -- момент формирования гало. Вертикальные линии – момент формирования кластера. **Время выживания гало, обычно, определяется как удвоение его массы**

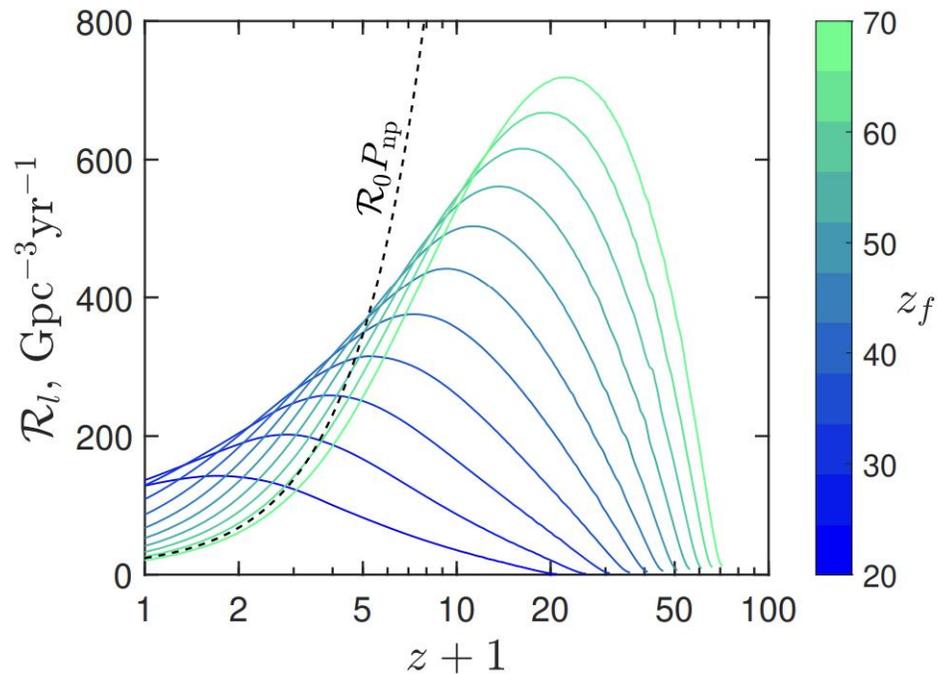
Вероятность того, что гало массы M_1 будет в гало с массой M_2 к моменту времени t_2 (Lacey and Cole 1993)

$$P(S_2, t < t_2 | S_1, t_1) = \frac{1}{2} [1 - \text{erf}(A)] + \frac{\delta_1 - 2\delta_2}{2\delta_1} \exp\left(\frac{2\delta_2(\delta_1 - \delta_2)}{S_1}\right) [1 - \text{erf}(B)]$$

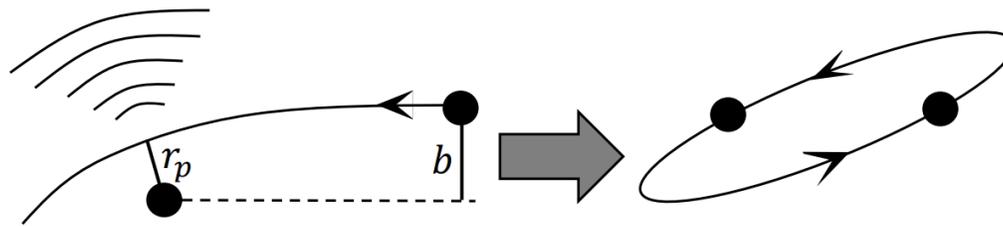
$$A = \frac{S_1\delta_2 - S_2\delta_1}{\sqrt{2S_1S_2(S_1 - S_2)}} \quad B = \frac{S_2(\delta_1 - 2\delta_2) + S_1\delta_2}{\sqrt{2S_1S_2(S_1 - S_2)}}$$

Ответ: разрушаются, но не все. **~10% легких гало “живут” десятки Хаббловских времен.** А значит будет много кластеров ПЧД в современную эпоху

Есть кластеры -> повышается вероятность слияний ПЧД (поздние двойные)



Темп слияний поздних двойных от времени при “замороженных” функциях масс гало z_f , также полагается $w = 1$. Будет максимум, если все гало формируются при $z_f = 20 - 30$



Сечение этого процесса

$$\Sigma = \pi R_s^2 \left(\frac{85\pi}{3} \right)^{2/7} \left(\frac{v_{rel}}{c} \right)^{-18/7}$$

Темп слияний на одно гало

$$\Gamma_h = \frac{2\pi}{m^2} \int dr r^2 \rho_{PBH}^2 \langle \Sigma v_{rel} \rangle$$

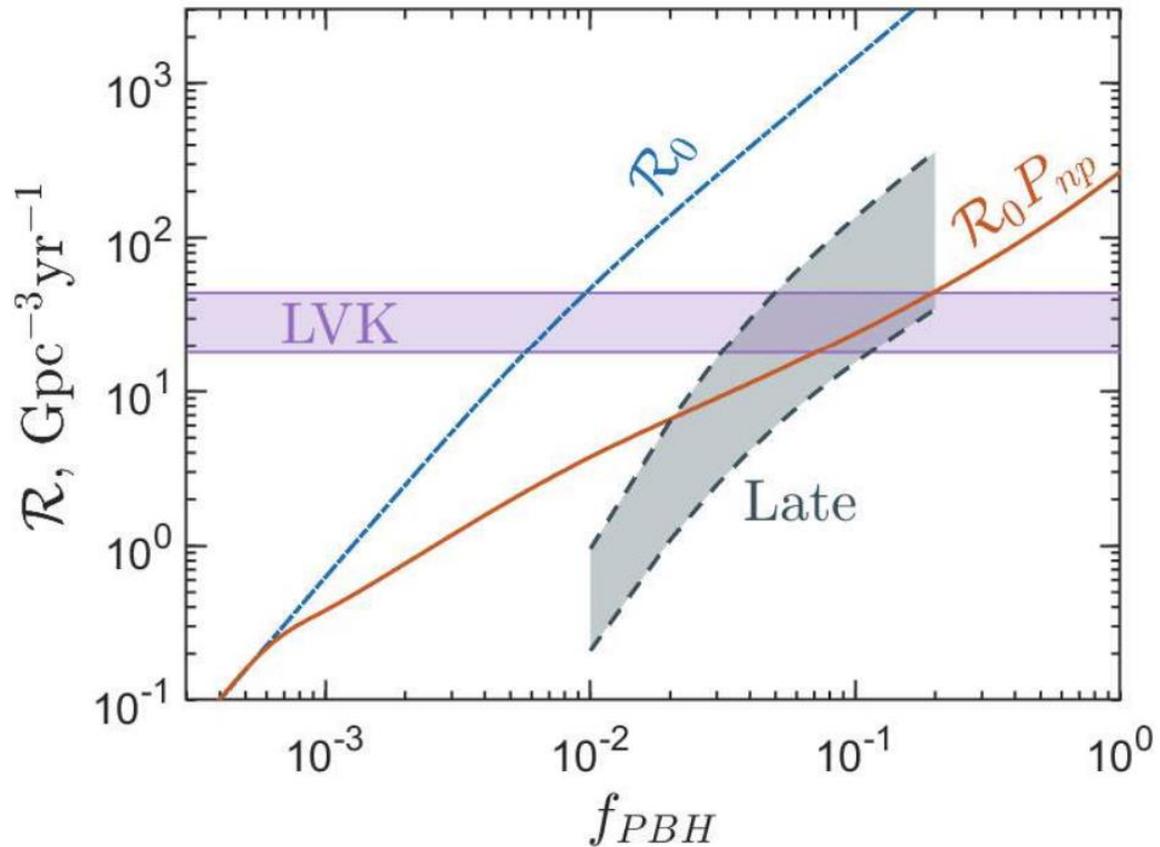
Темп слияний поздних двойных

$$\mathcal{R}_l(z) = \int w(M, z_f) \frac{dn}{dM}(z_f) \Gamma_h(z) dM$$

Доля выживших гало, формирующихся при z_f , к моменту z

Функция масс гало, формирующихся при z_f

Современный темп слияний



Темп слияний поздних двойных

$$\mathcal{R}_1(z) = \int w(M, z_f) \frac{dn}{dM}(z_f) \Gamma_h(z) dM,$$

Верхняя пунктирная линия $w = 1$ и максимизация по z_f . Нижняя учитывает разрушение гало

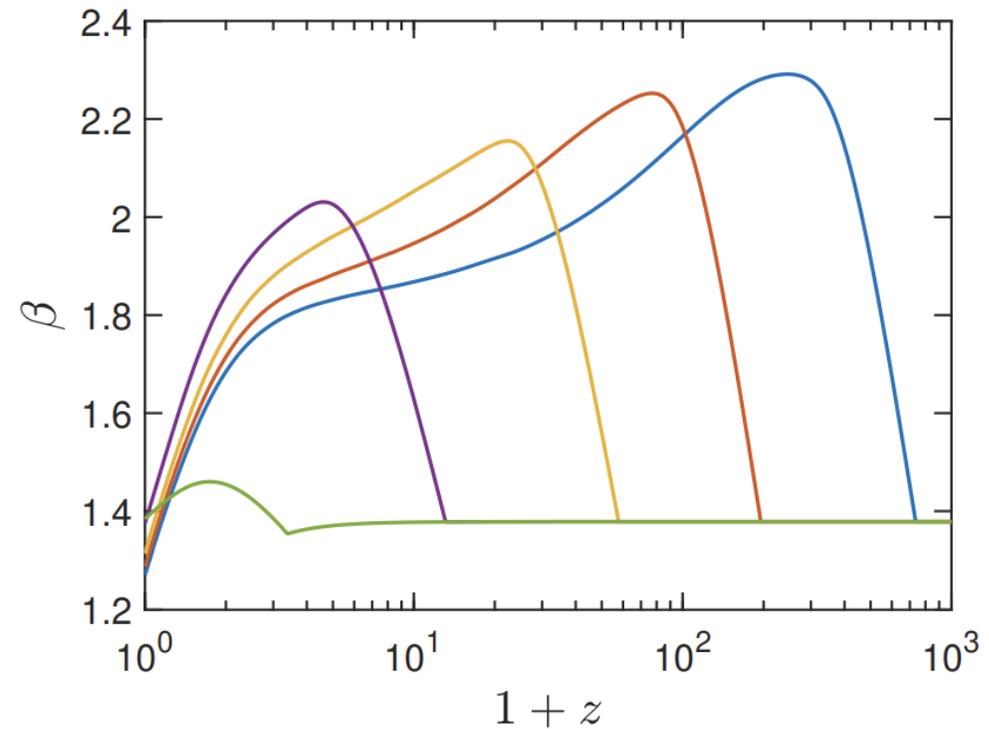
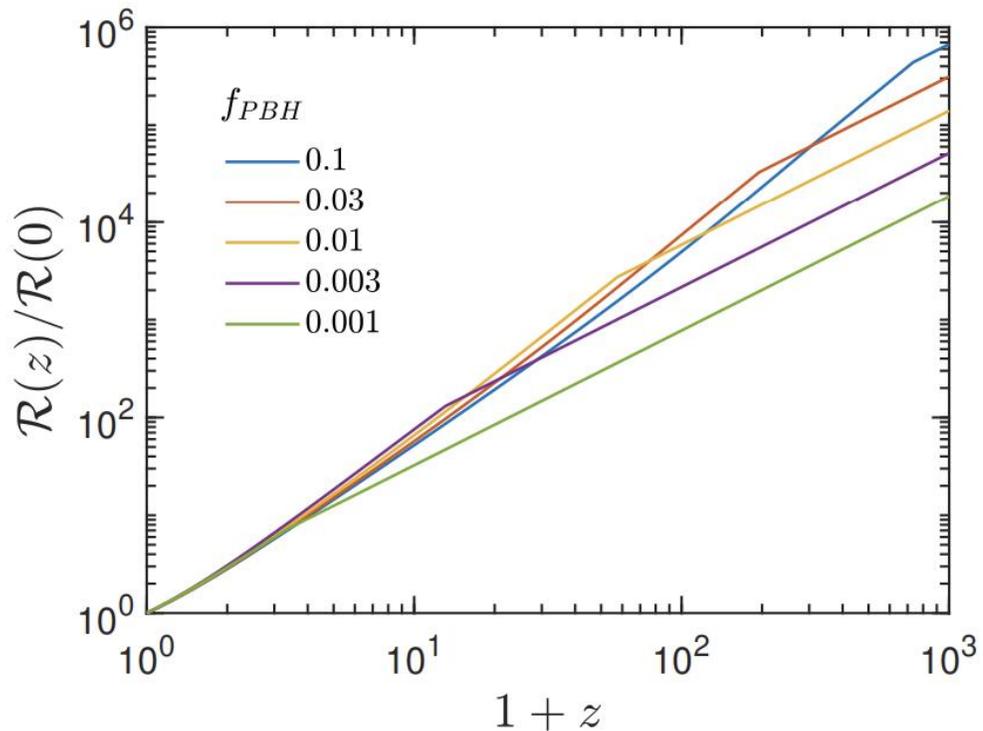
Слияния ПЧД в кластерах в современную эпоху потенциально доминируют над ранними двойными

Удивительная штука: подавление темпа слияний ранних двойных неминуемо ведет к усилению слияний поздних двойных. Эти процессы связаны!

А что насчет больших z ?

LVK вероятно не ответит на вопрос о природе сливающихся ЧД

А вот наземные детекторы третьего поколения возможно смогут, т.к. будут наблюдать слияния ЧД до красных смещений $z = 100$ Searching for Primordial Black Holes with the Einstein Telescope: impact of design and systematics, 2304.03160. Слияний звездных ЧД не ожидается при $z > 30$ (Koushiappas and Loeb 2017)



Слева: темп слияний в зависимости от z . Справа: логарифмический наклон $\mathcal{R} \propto (1+z)^\beta$. Можно видеть переход в эпоху, когда кластеризация еще не началась

Слияния при больших z

Будущие детекторы вряд ли смогут достаточно хорошо восстановить эволюцию темпа слияний

Поэтому следует также смотреть на интегральный темп слияний

$$N_{\text{events}} = \int_{z_{\text{min}}}^{z_{\text{max}}} dz \frac{\mathcal{R}(z)}{1+z} \frac{dV_c}{dz} \quad \frac{dV_c}{dz} = 4\pi r^2(z) \frac{c}{H(z)}$$

$$r(z) = \int_0^z dz' \frac{c}{H(z')}.$$

Это все без учета
эффективности детектора

При больших количествах ПЧД в составе ТМ будет много событий слияний

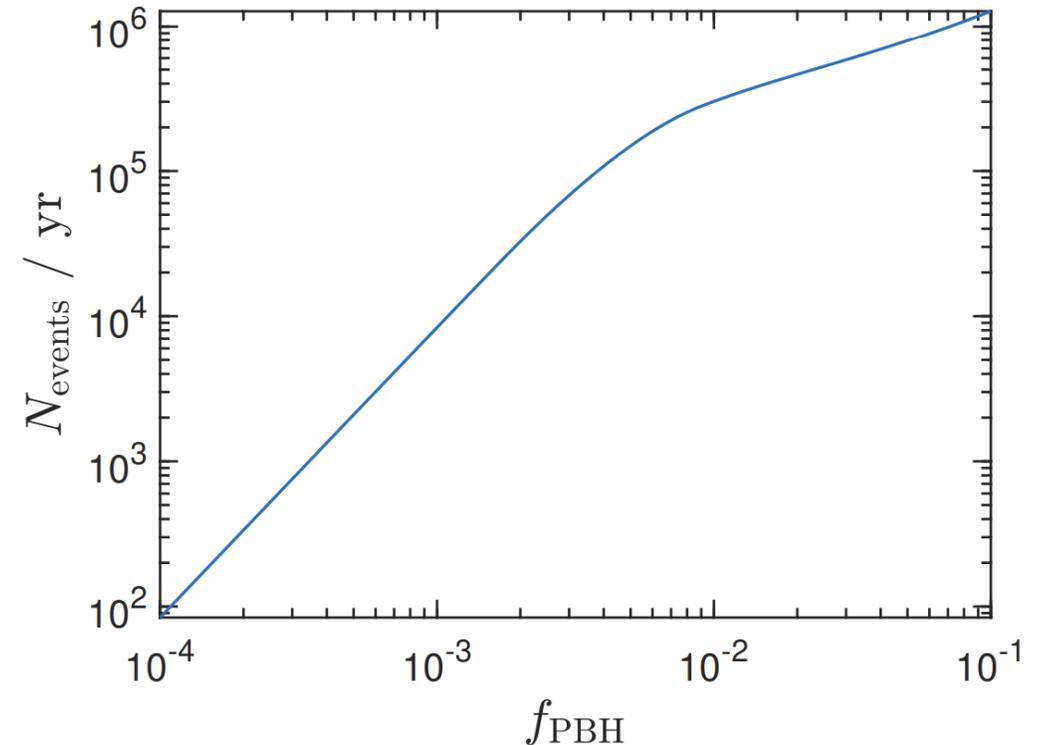


Figure 9. Number of PBH mergers per year, at redshifts $5 < z < 50$ depending on f_{PBH}

Заключение

- При вкладе ПЧД в состав ТМ $f = \Omega_{PBH}/\Omega_{DM} = 0.01 - 0.1$ ПЧД будут активно кластеризоваться, причем такие кластеры доживают до наших дней. **Такая фракция не ограничена**
- В таких кластерах подавляется слияния двойных, формирующихся в ранней Вселенной, **но это же ведет к усилению слияний двойных в современный момент**
- Наблюдение слияний ЧД при больших $z > 10$ будет указывать на ПЧД, двойные звездные ЧД сложно делать при больших z

Доля «выживших» кластеров

Поглощаясь в состав больших гало (хост гало), кластер будет испытывать динамическое трение и оседать в центр хоста за время

$$t_{\text{df}} = \frac{400 \text{ Gyr}}{\ln \Lambda} \left(\frac{R}{1 \text{ kpc}} \right)^2 \left(\frac{\sigma_h}{10 \text{ km s}^{-1}} \right) \left(\frac{10^4 M_\odot}{M} \right), \quad (20)$$

Чем позже поглотившийся кластер тем менее эффективно динамическое трение. Если кластер «дожил» и поглощается в примерно современную эпоху, то динамическое трение = 0

Время динамического трения в больших гало формирующихся при z

$$t_{\text{df}} = 15 \frac{e^{\xi(z)}}{e^{\xi(4)}} \left(\frac{1+z}{5} \right)^{-3/2} \left(\frac{10^4 M_\odot}{M} \right) \text{ Gyr}$$

$$\xi(z) = \left(5\delta_c(1+z) \right)^{0.8},$$

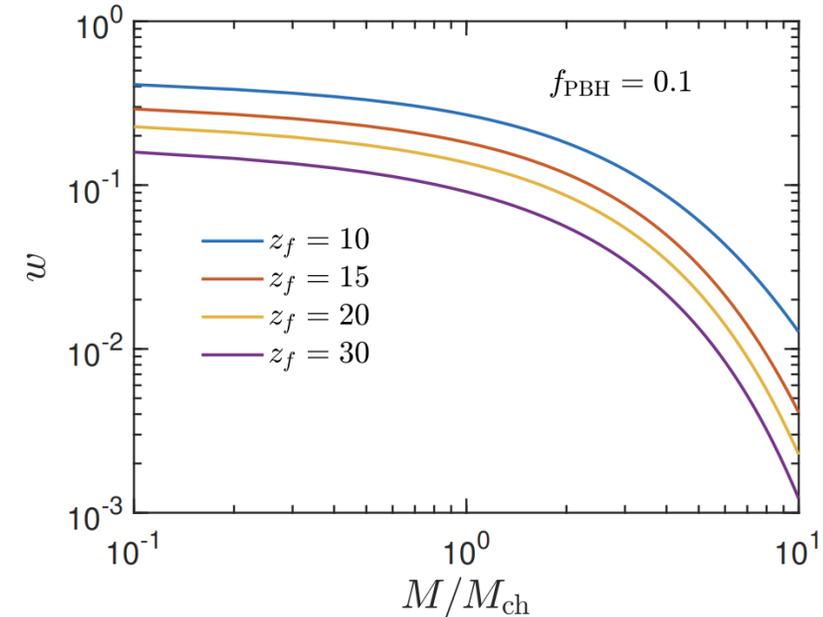


Figure 4. The fraction of surviving clusters by the modern epoch $z = 0$ depending on their mass. Different lines correspond to different moments of formation z_f showed on the legend.

Формирующиеся кластеры могут дожить до наших дней