

Выпускная квалификационная работа бакалавра

Динамика первичных черных дыр в кластерах

Студент: К.М. Гордильо Гарсия
Научный руководитель: В.Д. Стасенко

НИЯУ МИФИ
Москва, 2025

Введение

Гравитационно-волновое событие GW150914, обнаруженное детекторами LIGO, выявило существование черных дыр (ЧД) с массой около $30 M_{\odot}$ в форме двойных систем.

В кластерах ПЧД активно рассеиваются друг на друге в результате чего возможно возмущение параметров двойное или образование новой двойной, что ведет к подавлению темпа слияний.

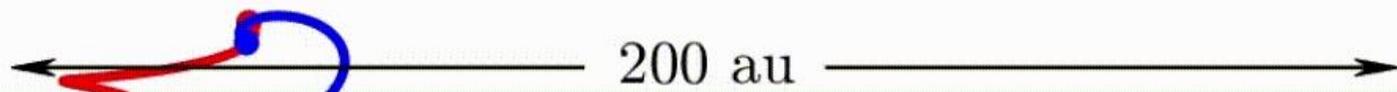
Цели и задачи

- Моделирование задачи рассеяния одиночной ПЧД на двойной системе и определение параметров двойных (угловой момент j и время жизни t) в результате таких рассеяний
- Вычисление темпа слияния двойных ПЧД с учетом возмущений в кластерах

Возмущения двойных

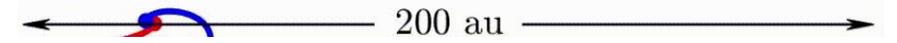
“Сложное” близкое рассеяние

Time: 90.2 yr



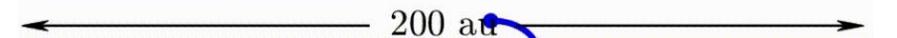
Time: 90.0 yr

“Простое” возмущение

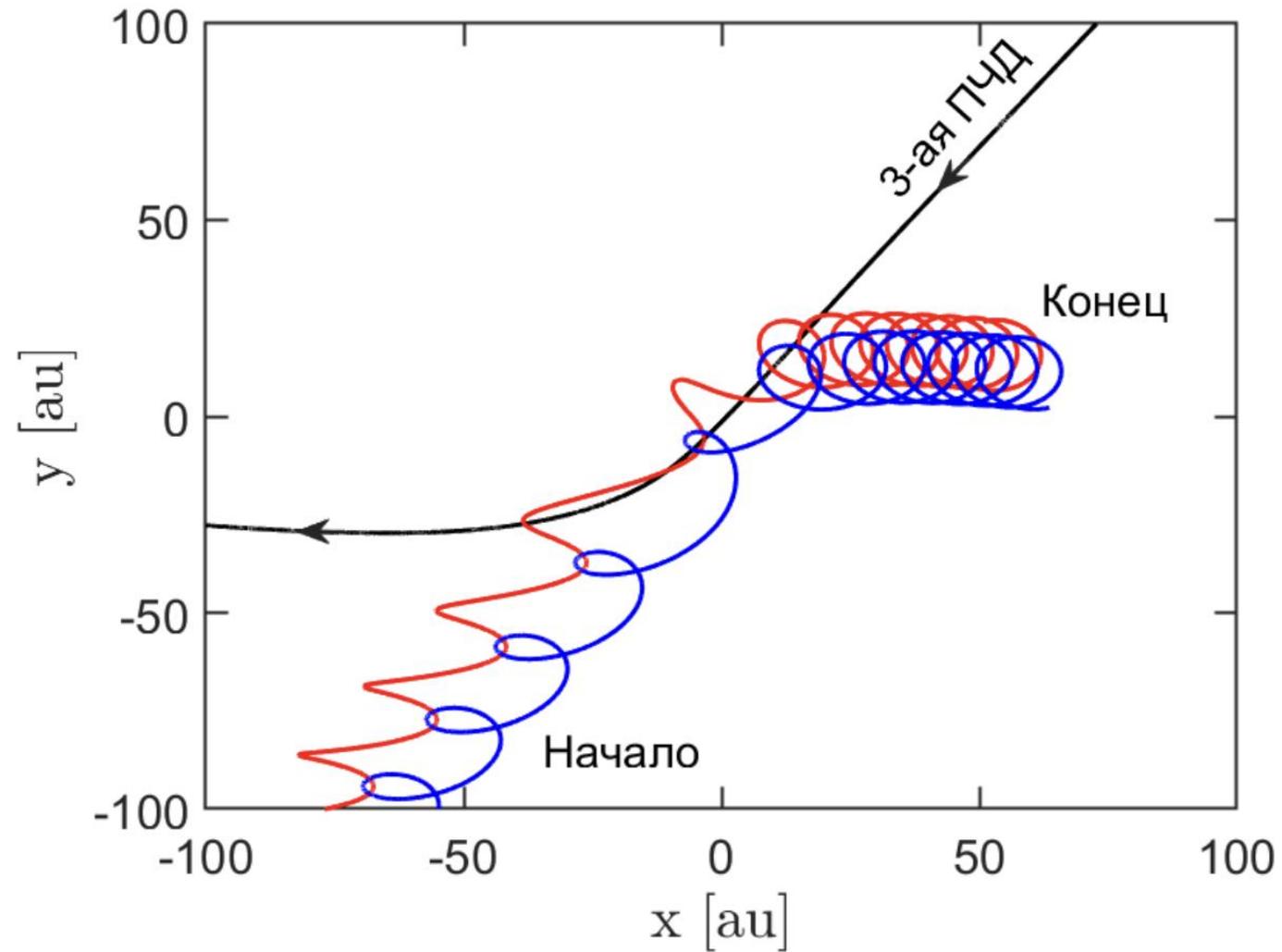


Time: 109.1 yr

Дальнее (приливное)
возмущение



Возмущения двойных



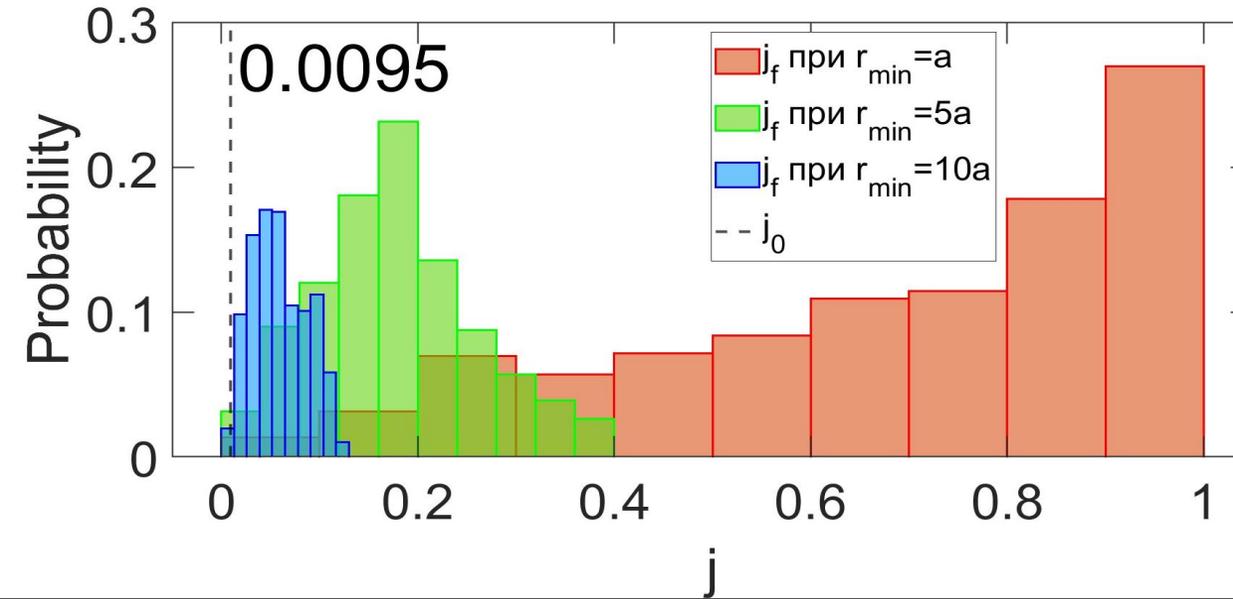
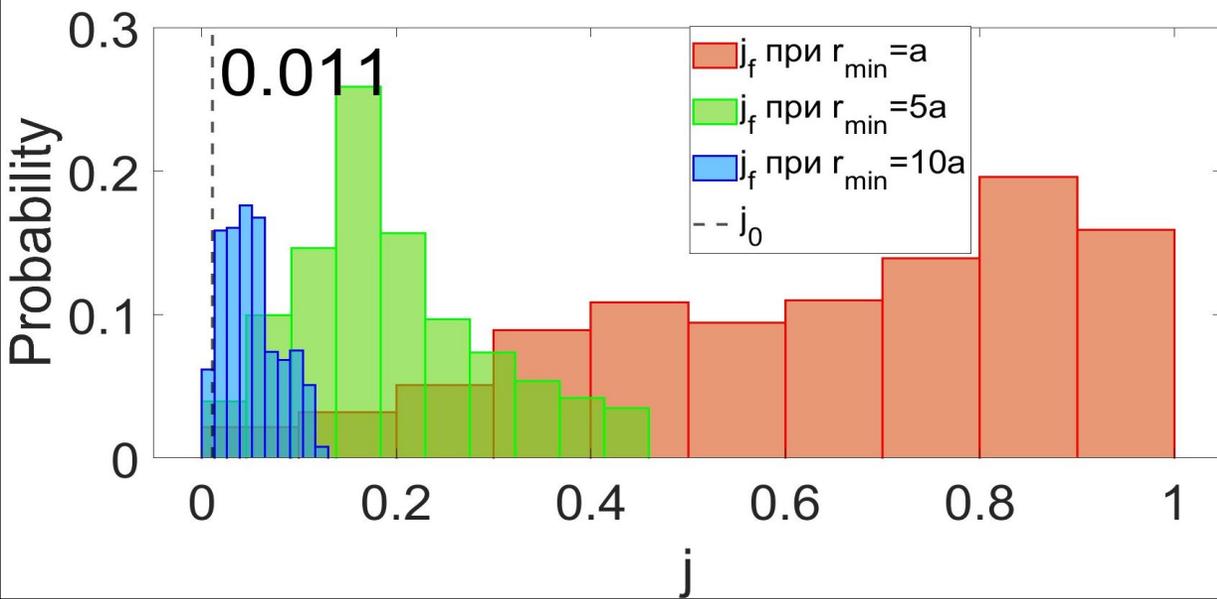
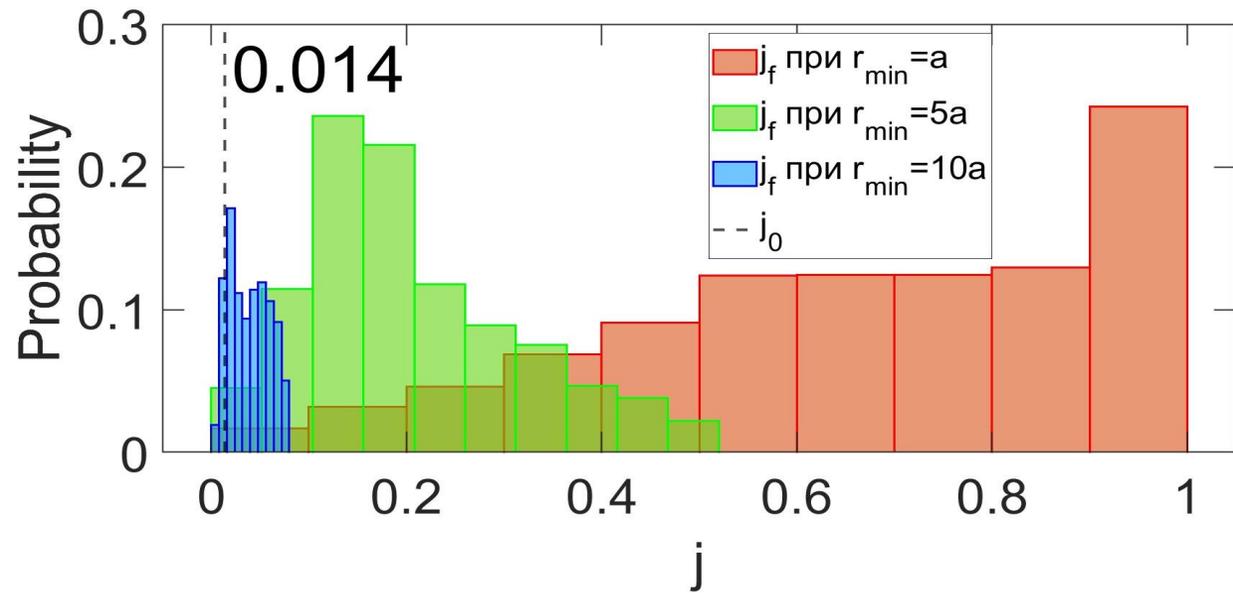
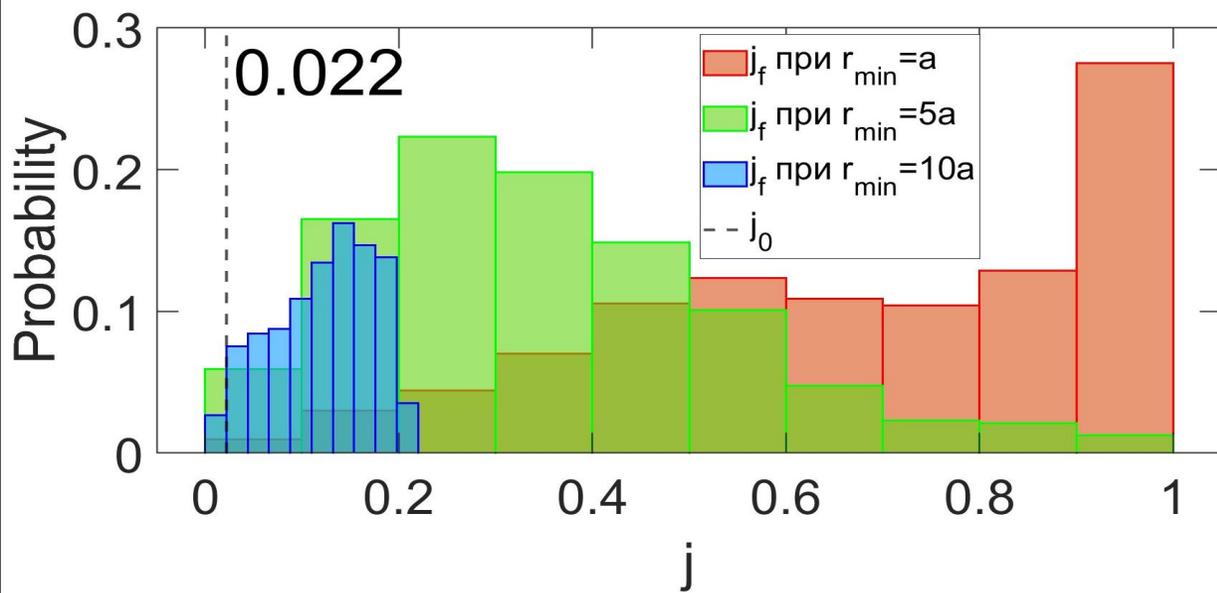
Время слияния двойной системы ПЧД за счет излучения гравитационных волн (время жизни)

$$t_{\text{gw}} = \frac{3c^5 a^4 j^7}{170G^3 m^3} \quad \text{где} \quad \begin{array}{l} a - \text{большая полуось} \\ j = \sqrt{1 - e^2} - \text{угловой момент} \end{array}$$

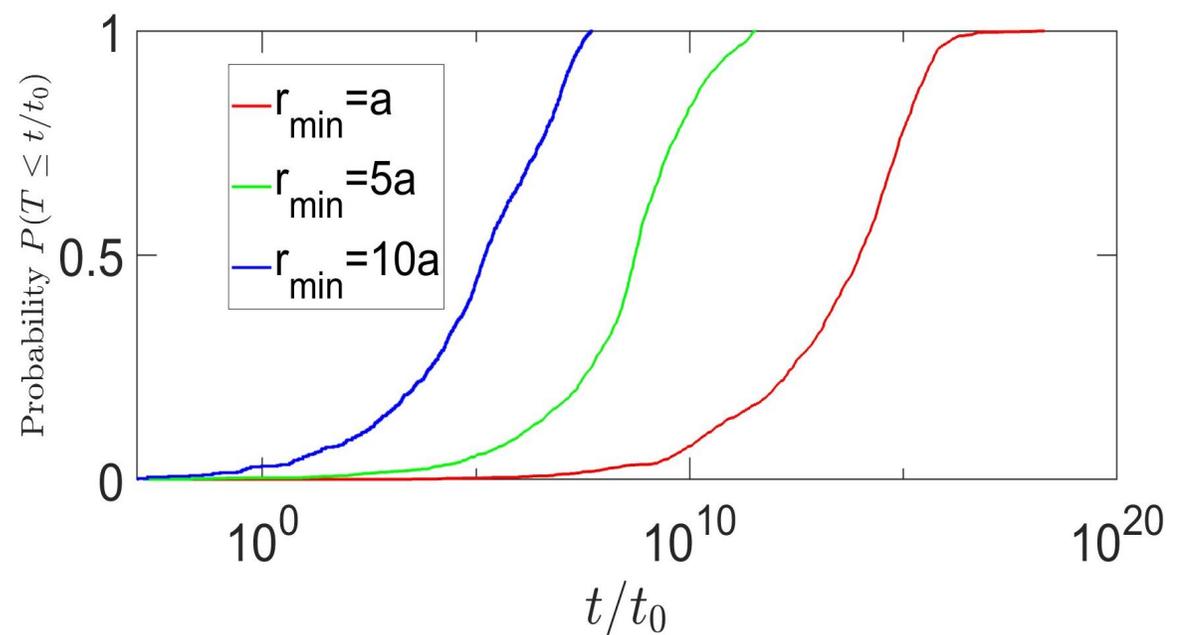
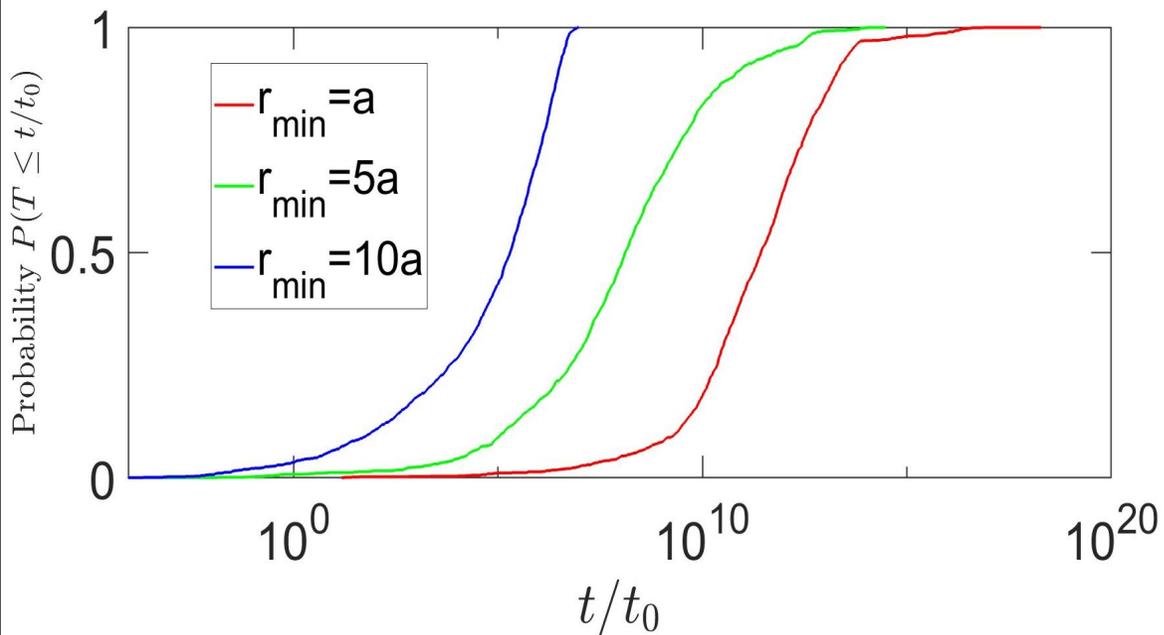
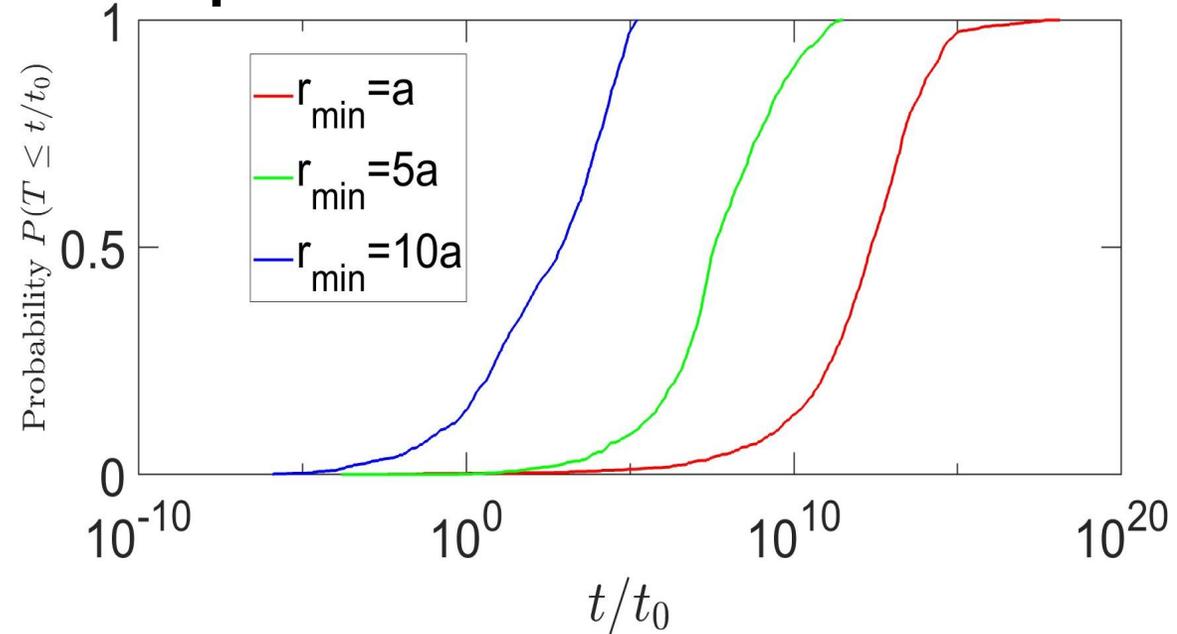
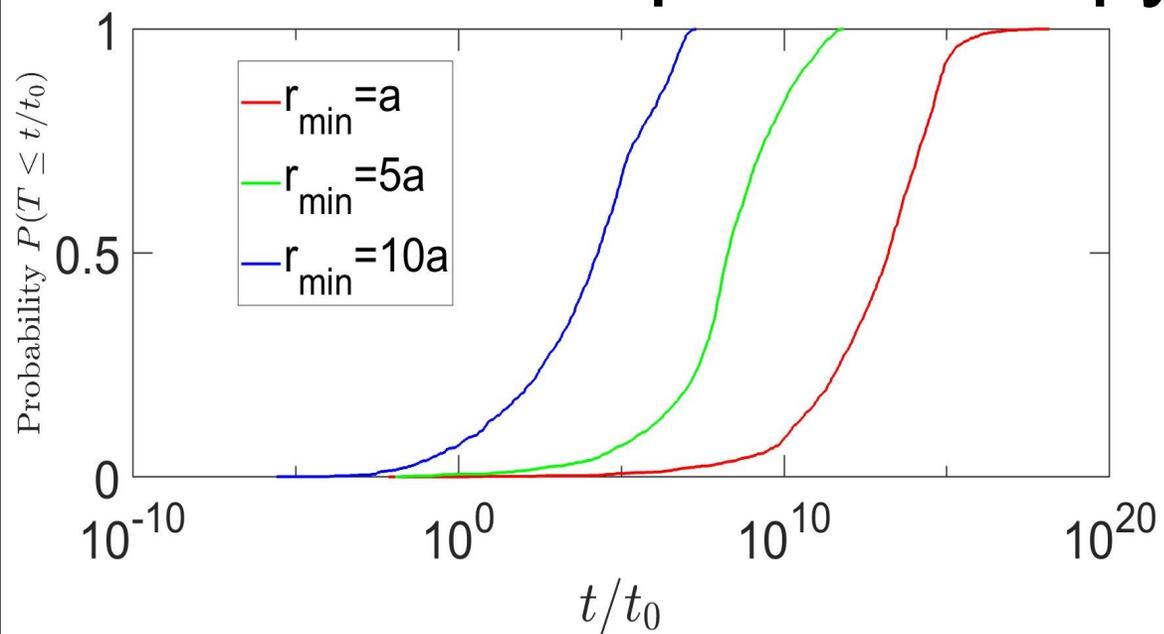
Исследовались 4 двойных систем, с фиксированным времени жизни $t = 13.8$ млрд лет (возраст Вселенной):

- $j = 0.022$, $a = 28$ а.е.
- $j = 0.014$, $a = 58$ а.е.
- $j = 0.011$, $a = 88$ а.е.
- $j = 0.0095$, $a = 118$ а.е.

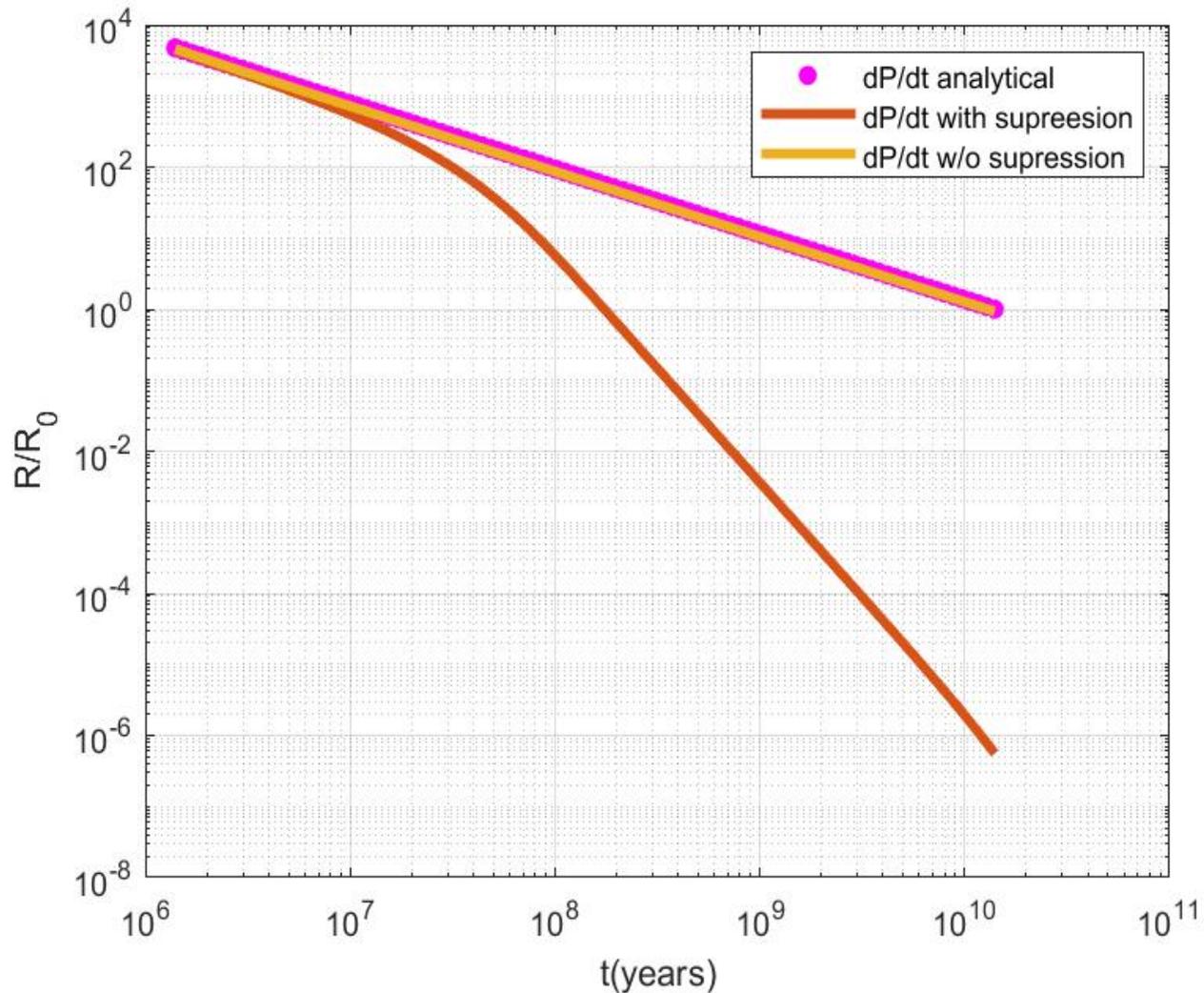
Распределения углового момента j



Интегральные функции вероятности t



Темп слияний ПЧД



В работе Sasaki et al. 2016:

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

Учет возмущений двойных в данной работе

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

$$\tau \sim \frac{1}{n\sigma v}$$

$$n = \frac{1000 \left(\frac{M_{\odot}}{M_{bh}} \right)}{\text{pc}^3} \approx \frac{30}{\text{pc}^3}$$

$$\sigma = \pi a^2 \left(1 + \frac{6GM_{bh}}{av^2} \right)$$

Заключение

-Была разработана математическая модель, описывающая динамику задачи трех тел — рассеяние одиночной черной дыры на двойной системе.

-Были построены и проанализированы распределения углового момента j и времени слияний двойных после возмущений.

-Наблюдалась значительная циркуляризация орбит, что приводит к существенному увеличению времени слияния двойных систем.

-Была получена эволюция темпа слияний с космологическим временем и показано, что она существенно отличается по сравнению с некластерным случаем формирования ПЧД: темп слияний значительно подавляется.