

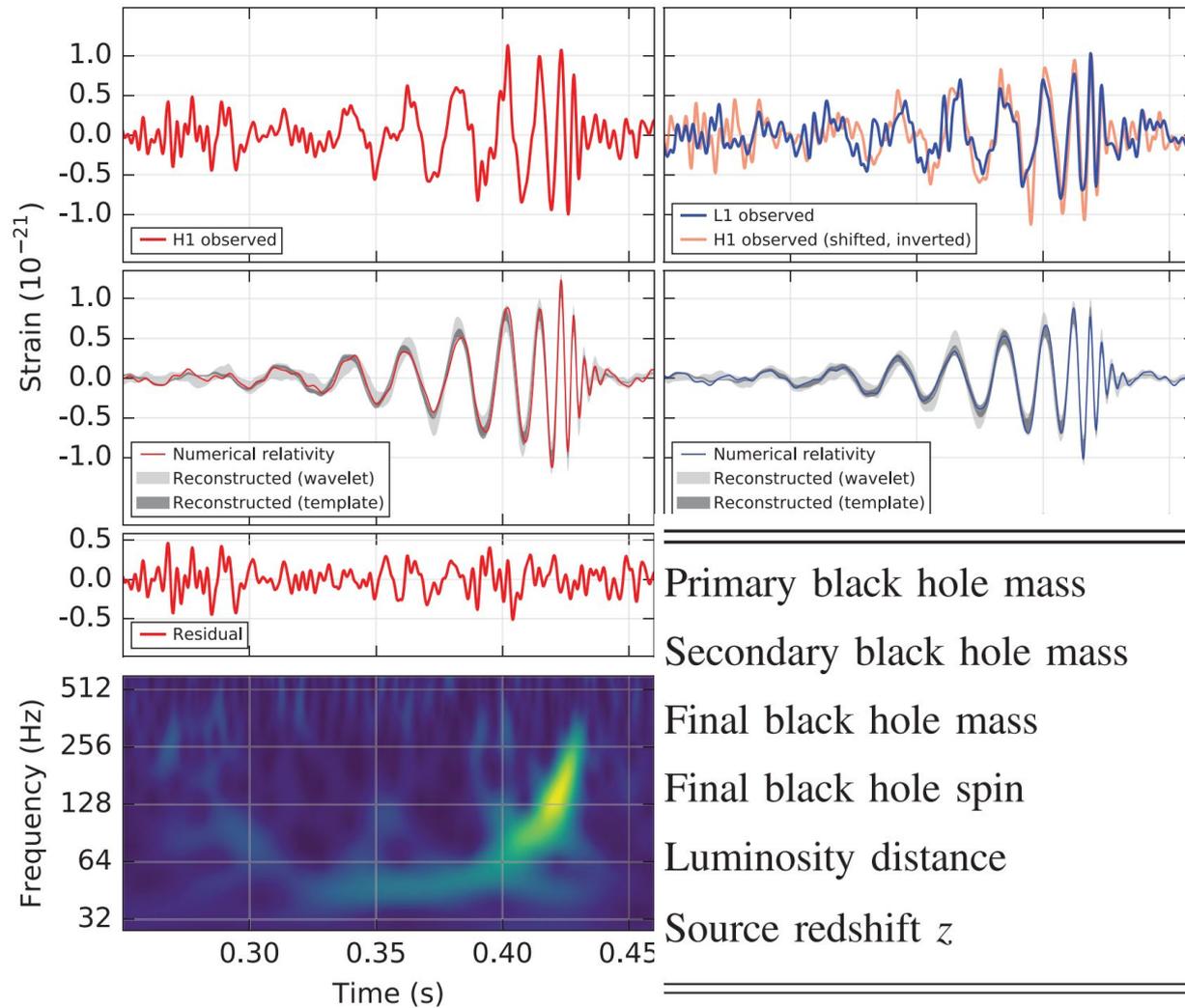


Исследование формирования и эволюции двойных ПЧД в ранней вселенной

подготовил: Воробьев Г.И.
Научный руководитель: Белоцкий К.М.
Консультант: Стасенко В.Д.
НИЯУ МИФИ, М21-115
06.02.2023

Hanford, Washington (H1)

Livingston, Louisiana (L1)



GW150914

[arXiv:1602.03837](https://arxiv.org/abs/1602.03837) [Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger LIGO](#)

[B. P. Abbott et al. \(LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration\) "Properties of the Binary Black Hole Merger GW150914" 2016](#)

$$36_{-4}^{+5} M_{\odot}$$

$$29_{-4}^{+4} M_{\odot}$$

$$62_{-4}^{+4} M_{\odot}$$

$$0.67_{-0.07}^{+0.05}$$

$$410_{-180}^{+160} \text{ Mpc}$$

$$0.09_{-0.04}^{+0.03}$$

Первичные чёрные дыры (ПЧД)

DID BLACK HOLES FORM IMMEDIATELY AFTER THE BIG BANG?

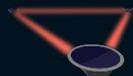


$$M \sim \frac{c^3 t}{G} \sim 10^{15} \left(\frac{t}{10^{-23} \text{ s}} \right) \text{ g}$$

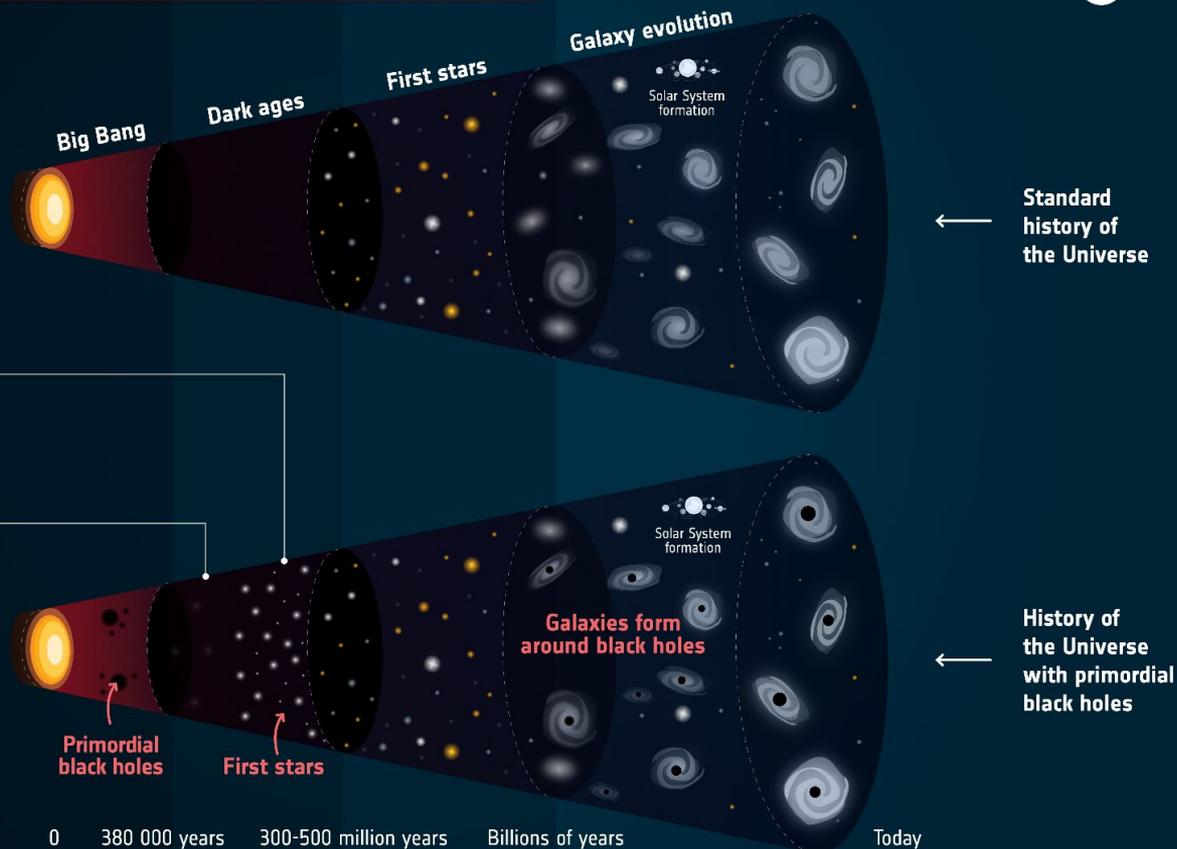
$t \sim 10^{-4} \text{ s}$
для $M = 30 M_{\odot}$

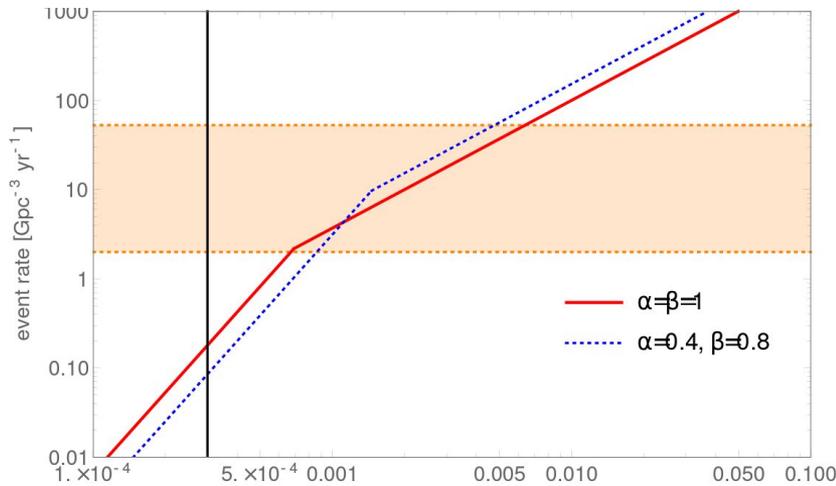


Webb might observe stars that were formed during the dark ages near **primordial black holes**

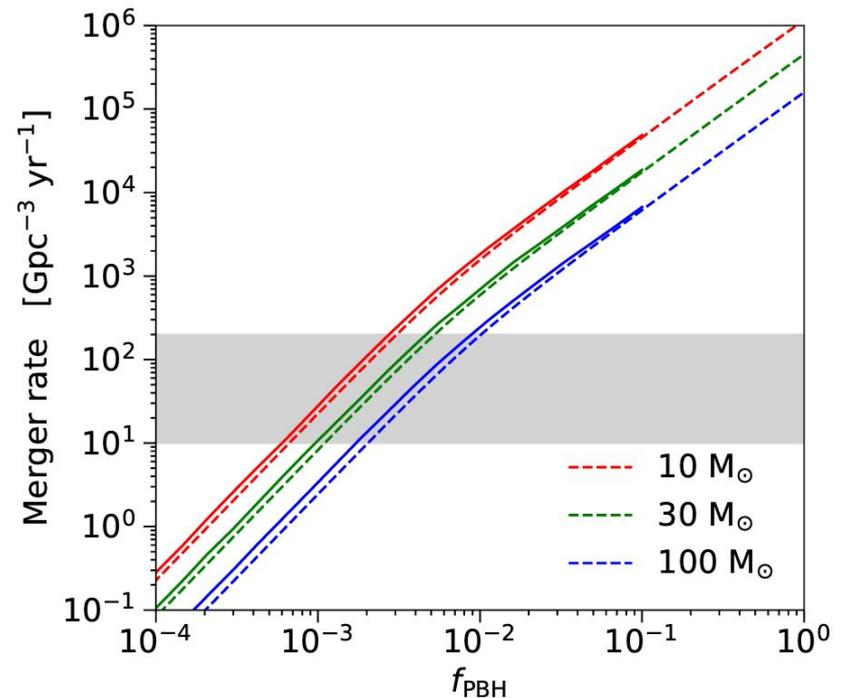


LISA might pick up gravitational waves from **merging black holes** in the early Universe





[Misao Sasaki "Primordial Black Hole Scenario for the Gravitational-Wave Event GW150914"](#)



[Bradley J. Kavanagh "Black Holes' Dark Dress: On the merger rate of a subdominant population of primordial black holes"](#) на $\Gamma_{\text{ПК}}^3$.

Темп слияний

Количество сигналов ГВ в $\Gamma_{\text{ПК}}^3$.
 Закрашенная полоса - наблюдаемый темп, измеренный LIGO.
 Чёрная линия - верхний предел аккреции планковских измерений искажений реликтового излучения.
 Сплошные линии на правом графике - слияние ПЧД находящихсЯ в гало частиц скрытой массы, пунктирные - без гало.

Цели

- Моделирование двойных ПЧД, окруженных скоплениями ПЧД меньших размеров (N-body)
- Исследование эволюции такой системы (как меняются параметры орбиты)

- Рассчитать темп слияний для такой системы (в зависимости от доли ПЧД в скрытой массе)

Программная реализация

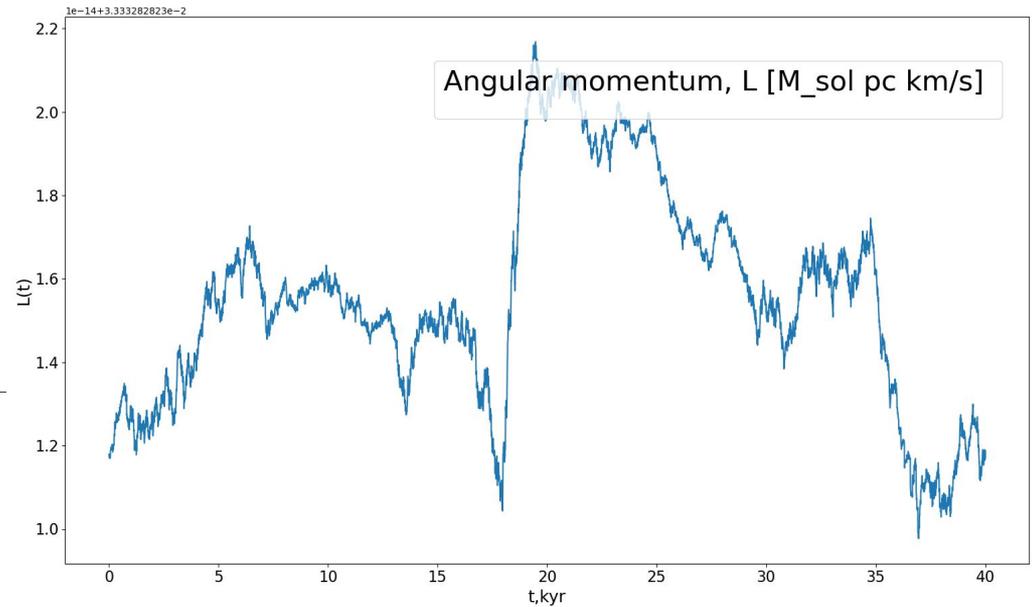
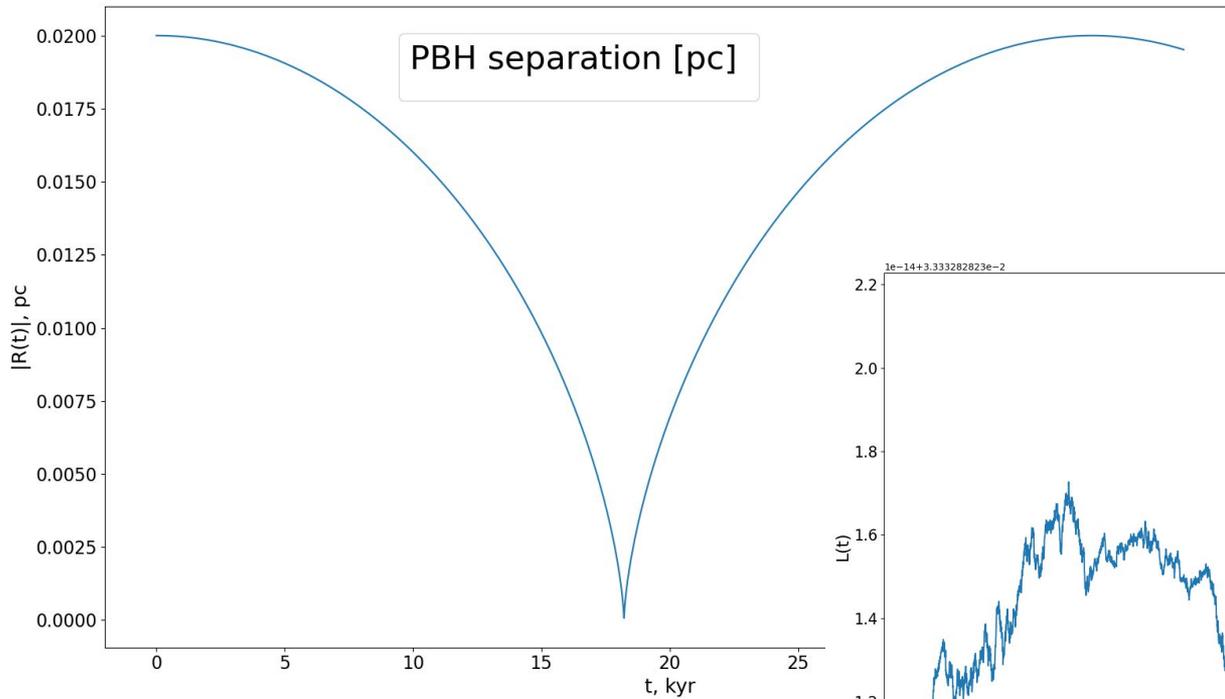
Почему такая реализация:

- Кроссплатформенность
- Удобный для разработки
- Быстрый с поддержкой Numba и numru
- Свой код легче изменять под свои нужды



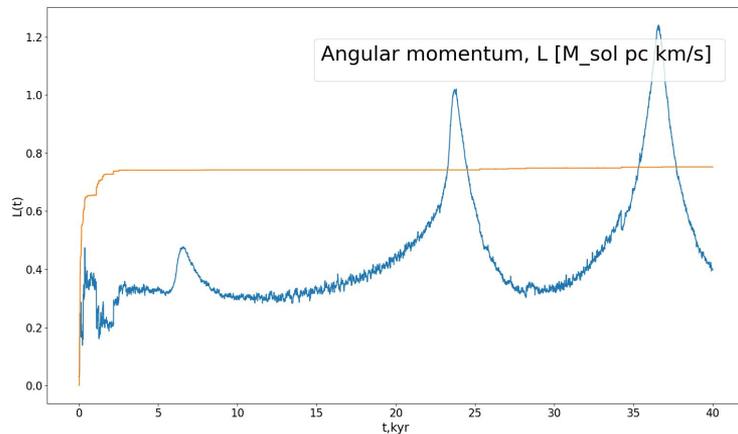
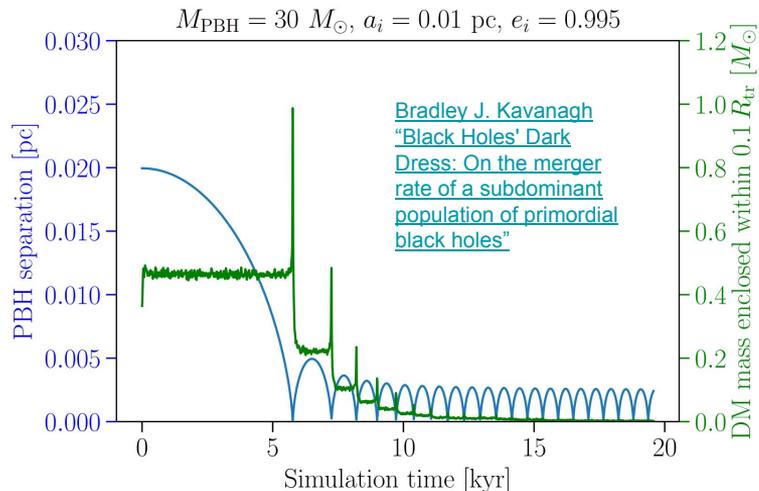
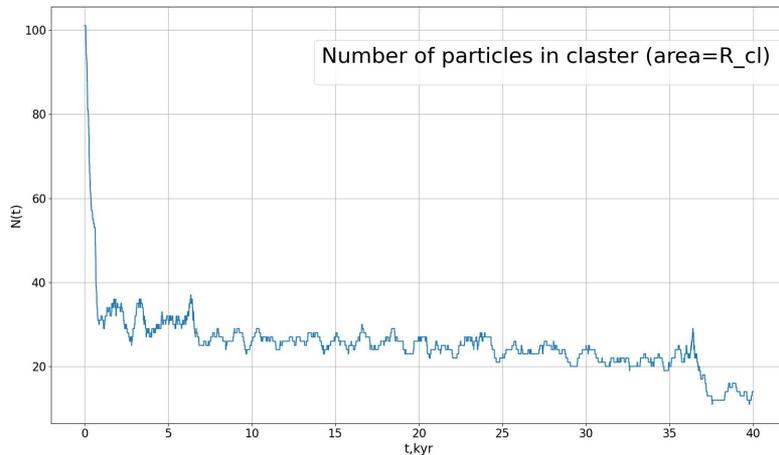
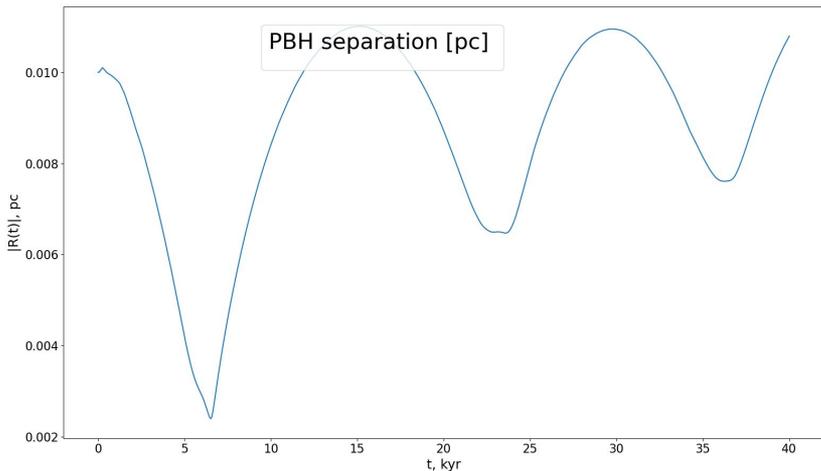
NBODY6++

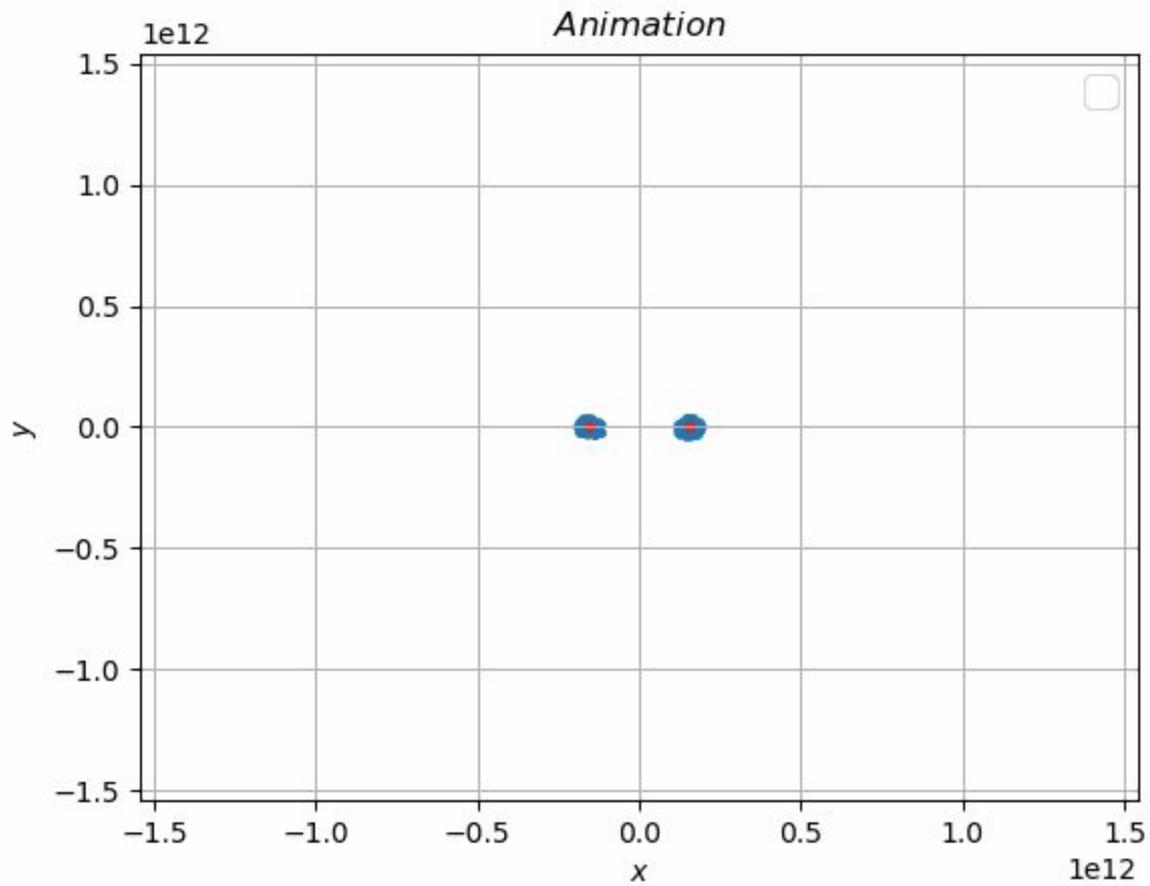
Однако точность и скорость пакетов типа NBody6 превзойти не получится.

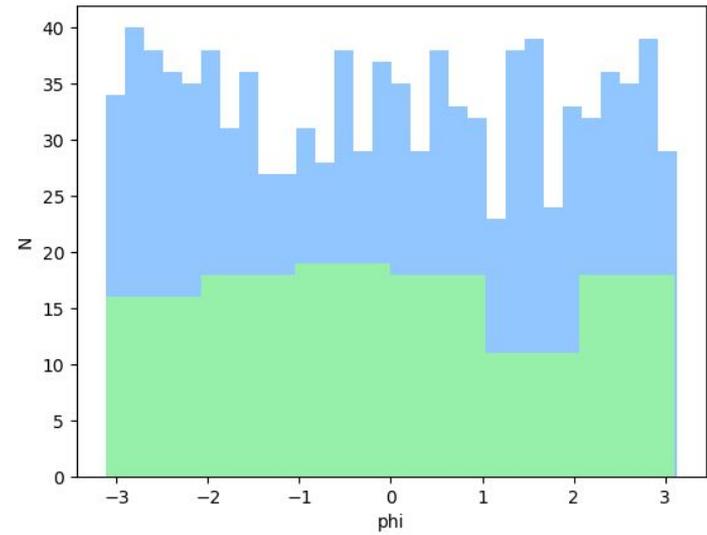
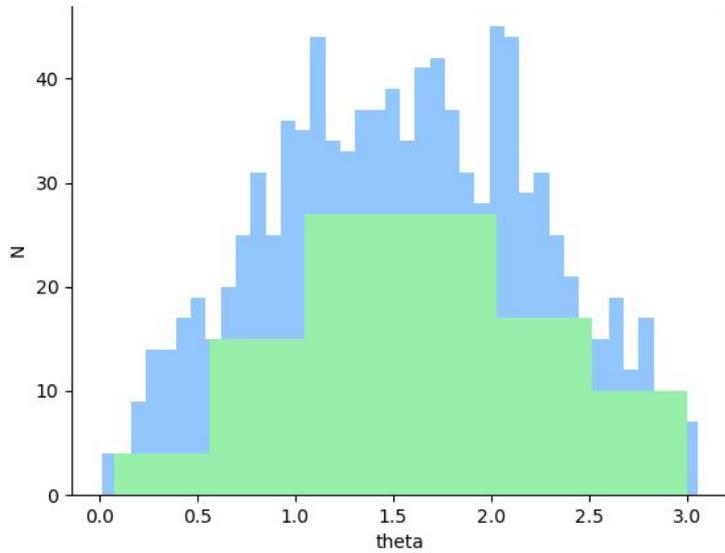


Слияние двойной $a=0.01, e=0.995, M_i=33.1$

Слияние двойных окружённых скоплениями

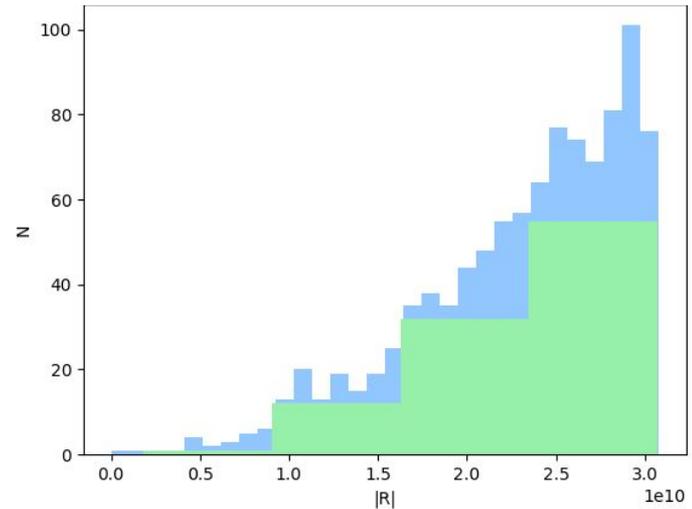




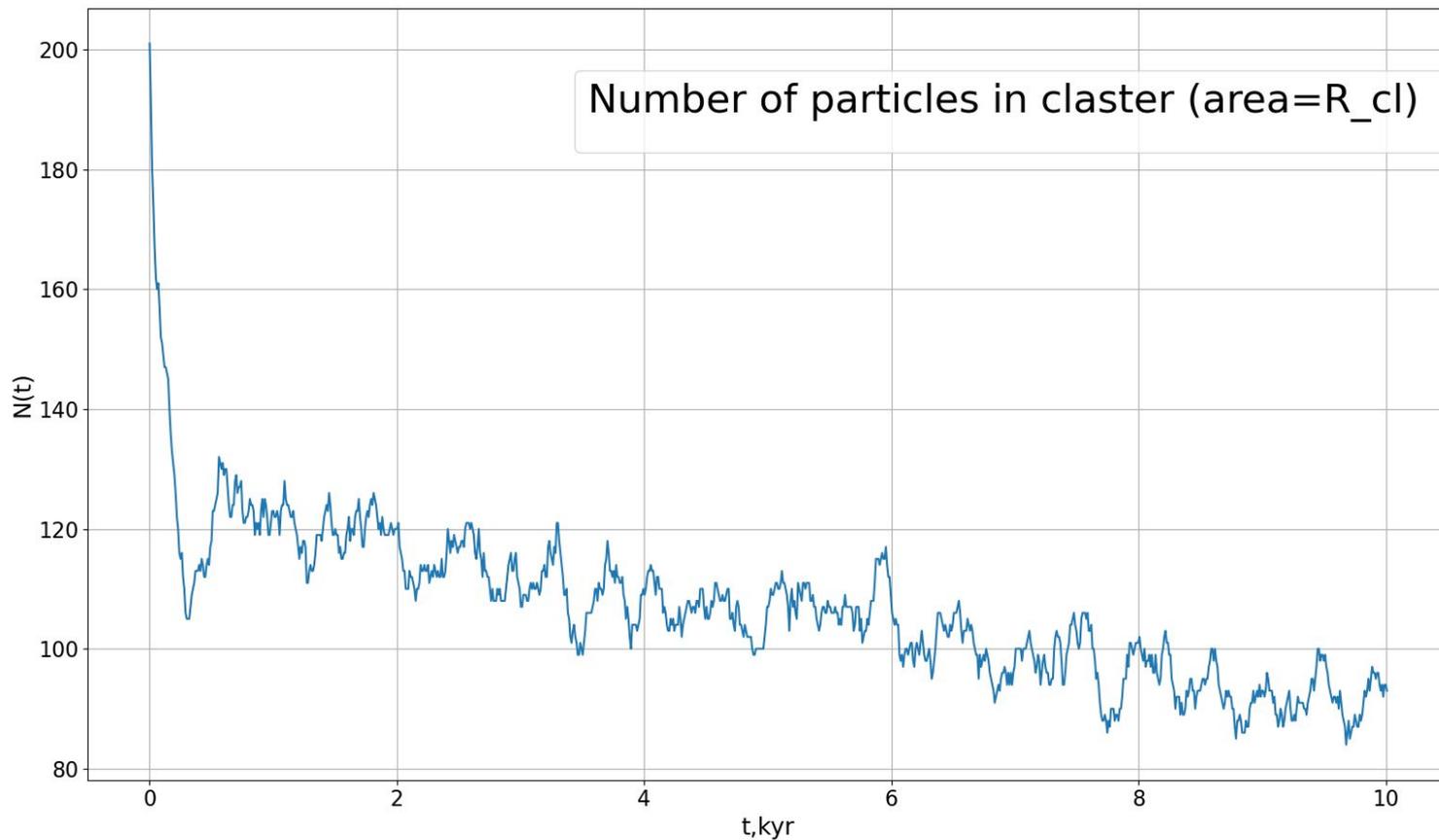


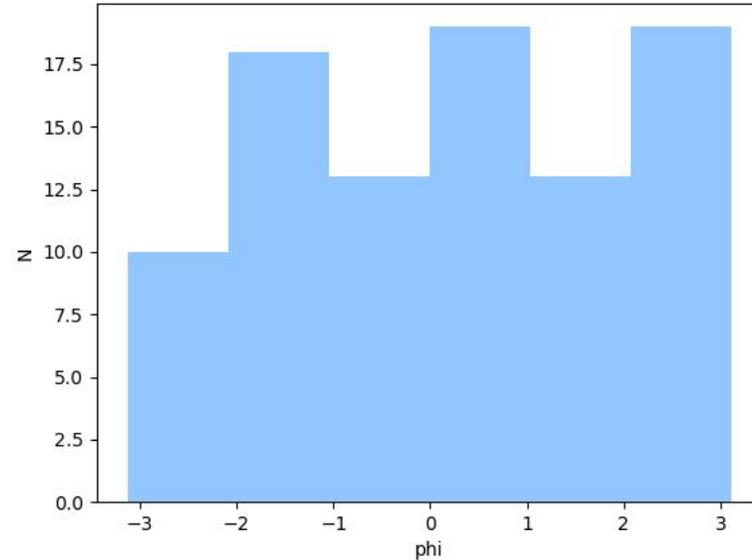
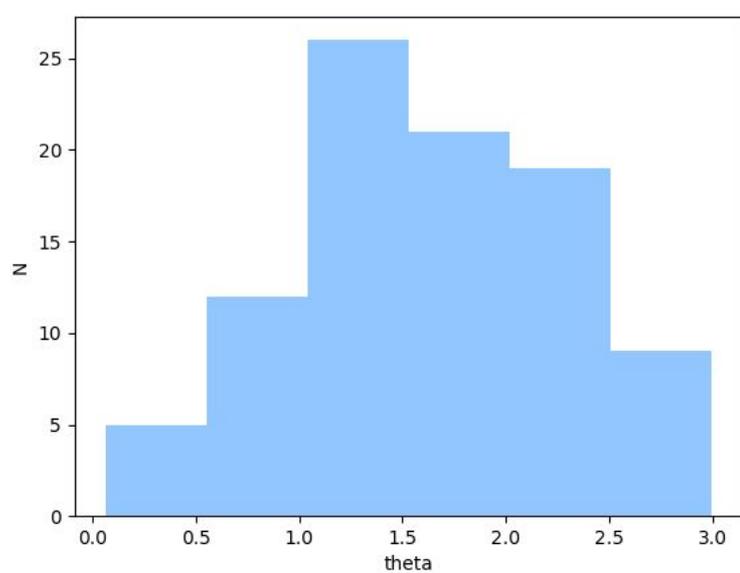
Начальные параметры для скоплений - равномерное положение по шару ($N=10^3$ и 10^2)

N - число объектов на расстоянии R [км] от центра



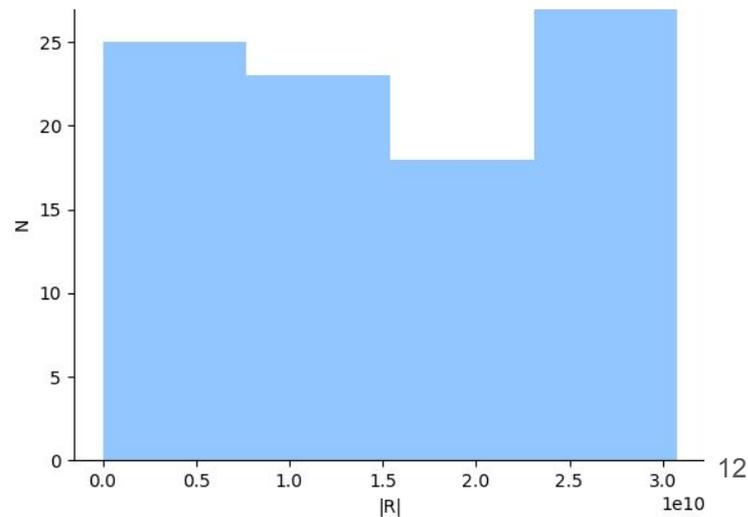
Начальные параметры для скоплений

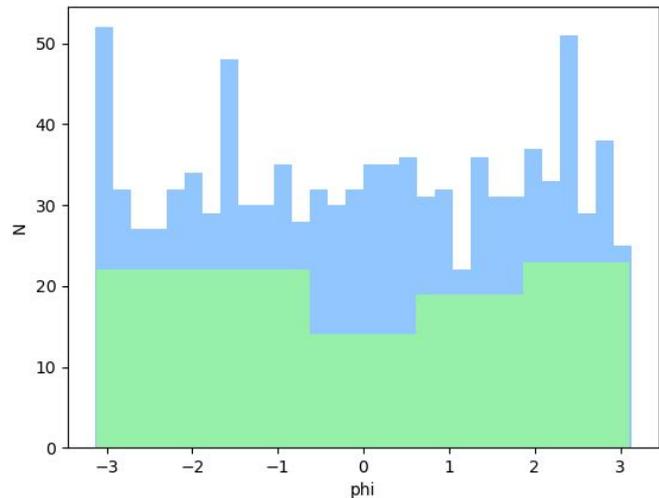
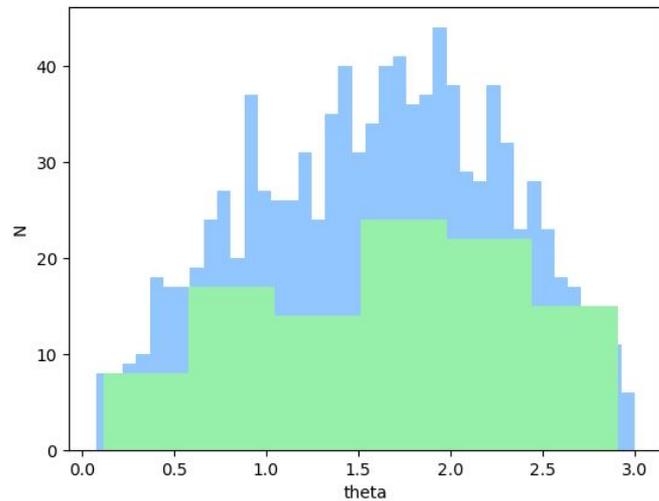




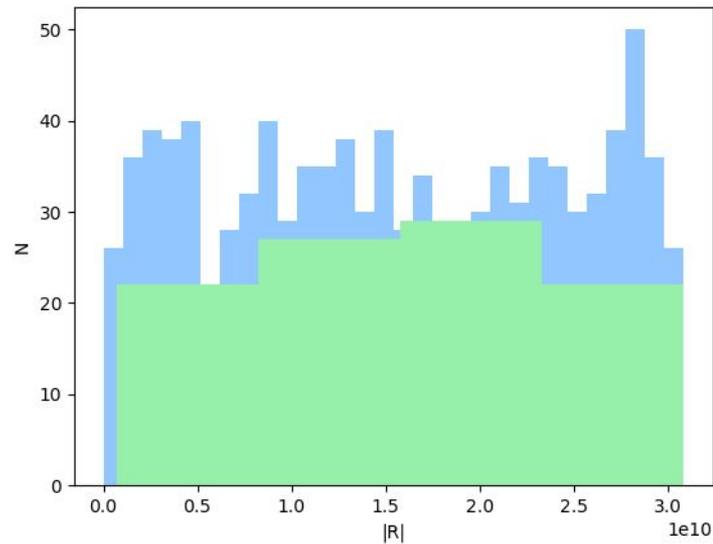
Начальные параметры для скоплений - Статистически устойчивое распределение ($N=10^2$)

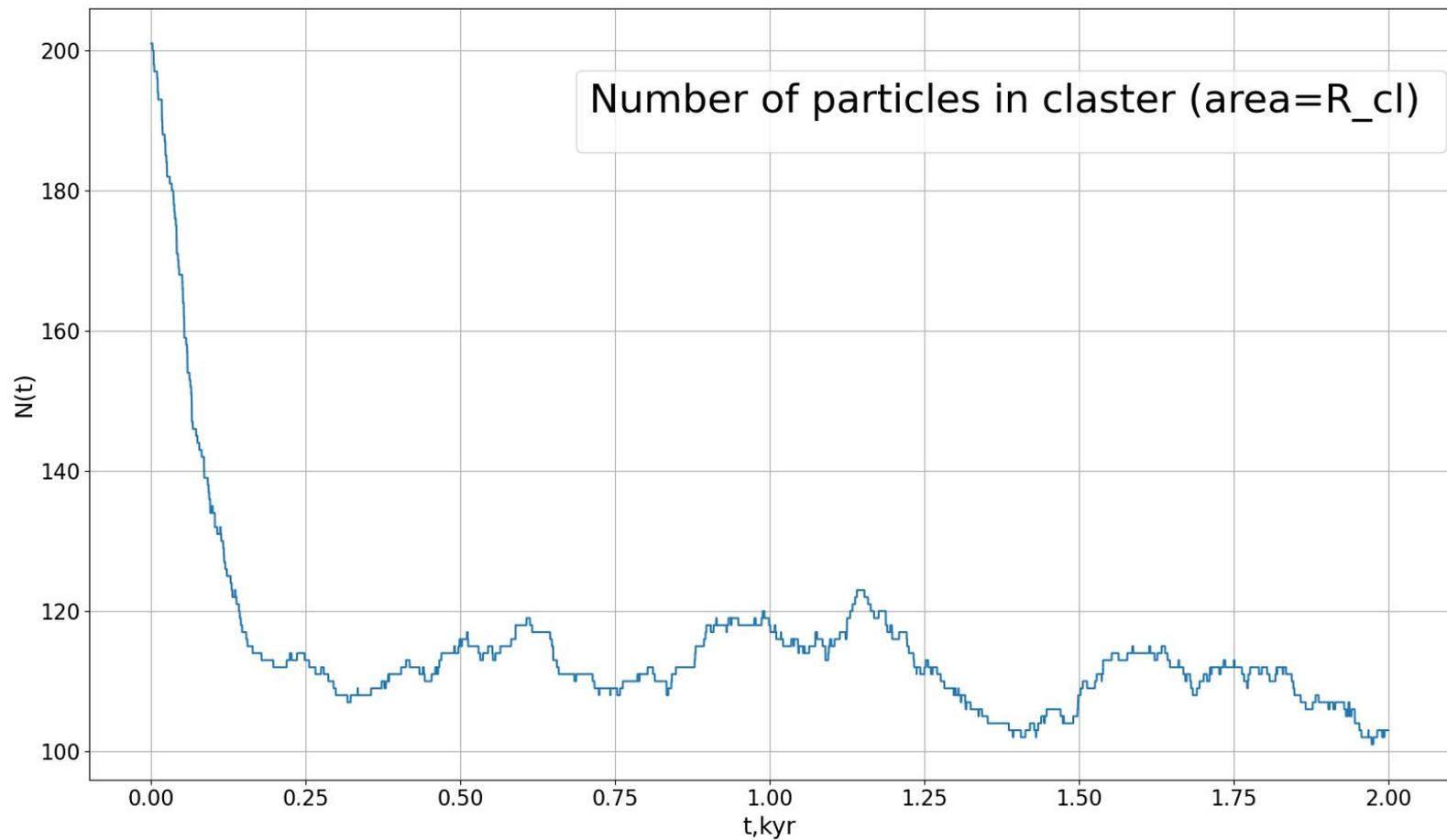
N - число объектов на расстоянии R [км] от центра

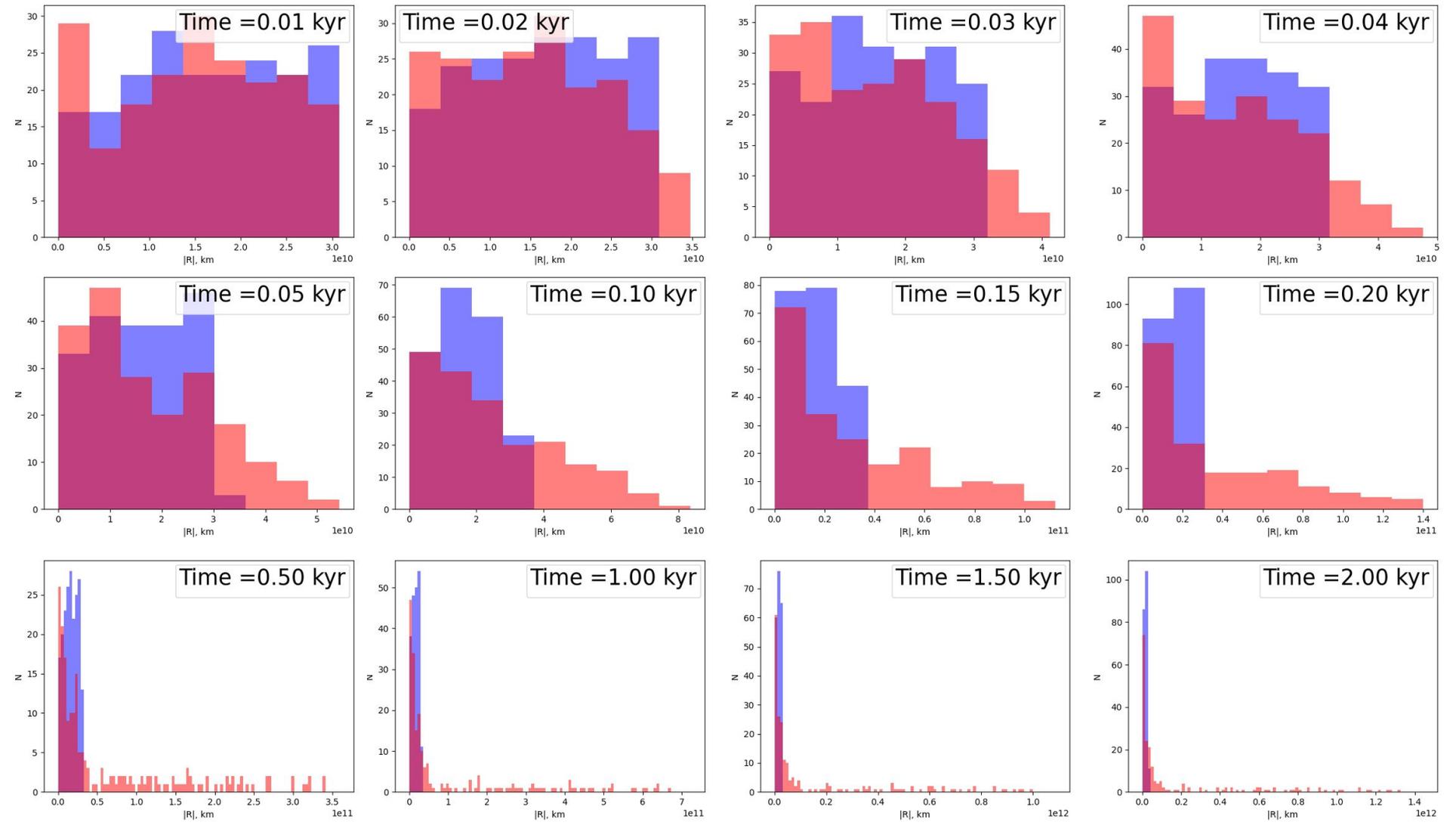




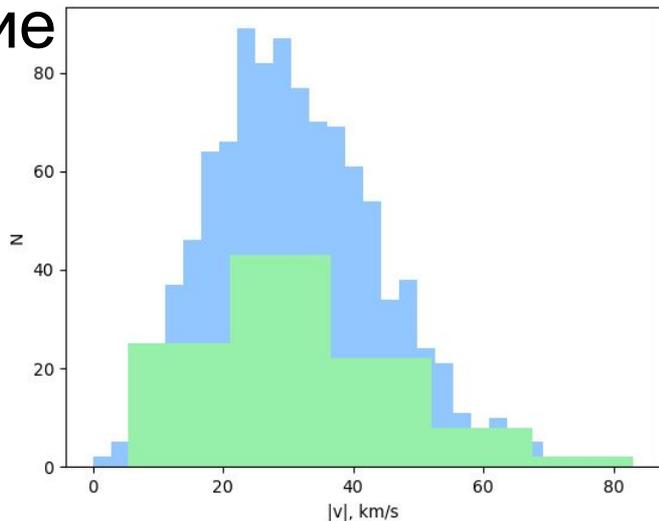
Восстановление
статистически
устойчивых
распределений



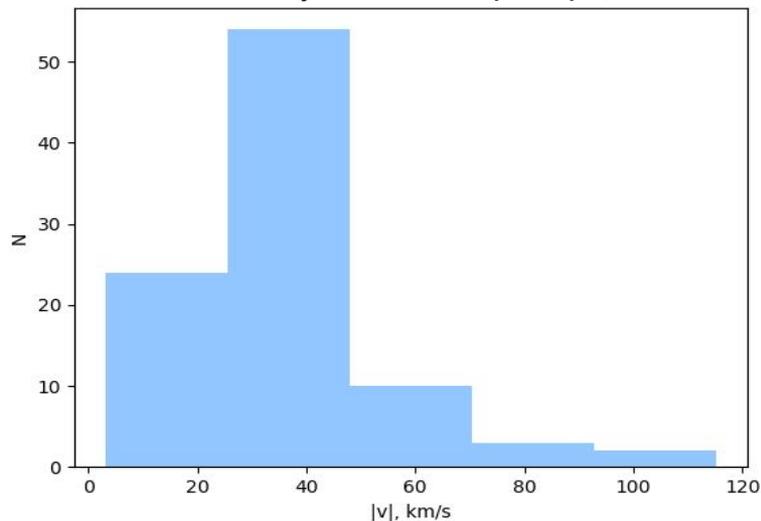




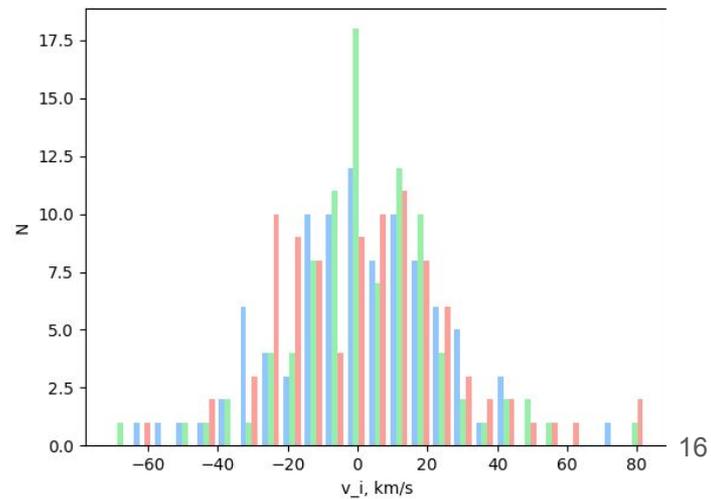
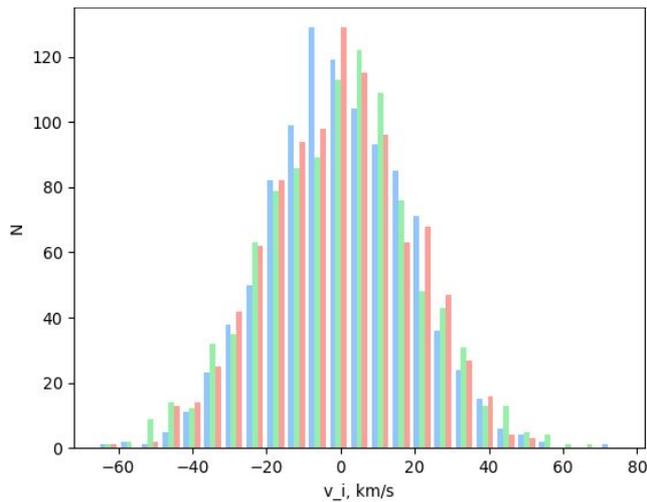
Распределение скоростей в скоплениях



Статистически устойчивое распределение

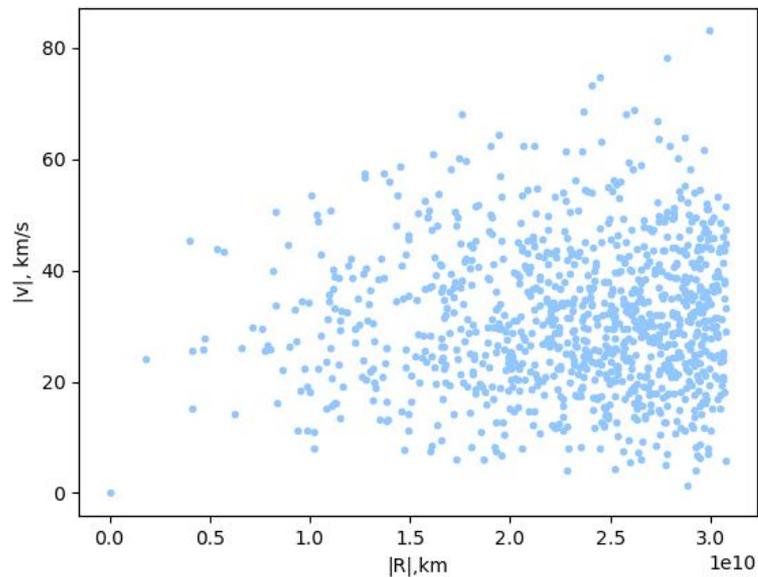


Нормальное распределение по координатам ($N=10^3$ и 10^2)

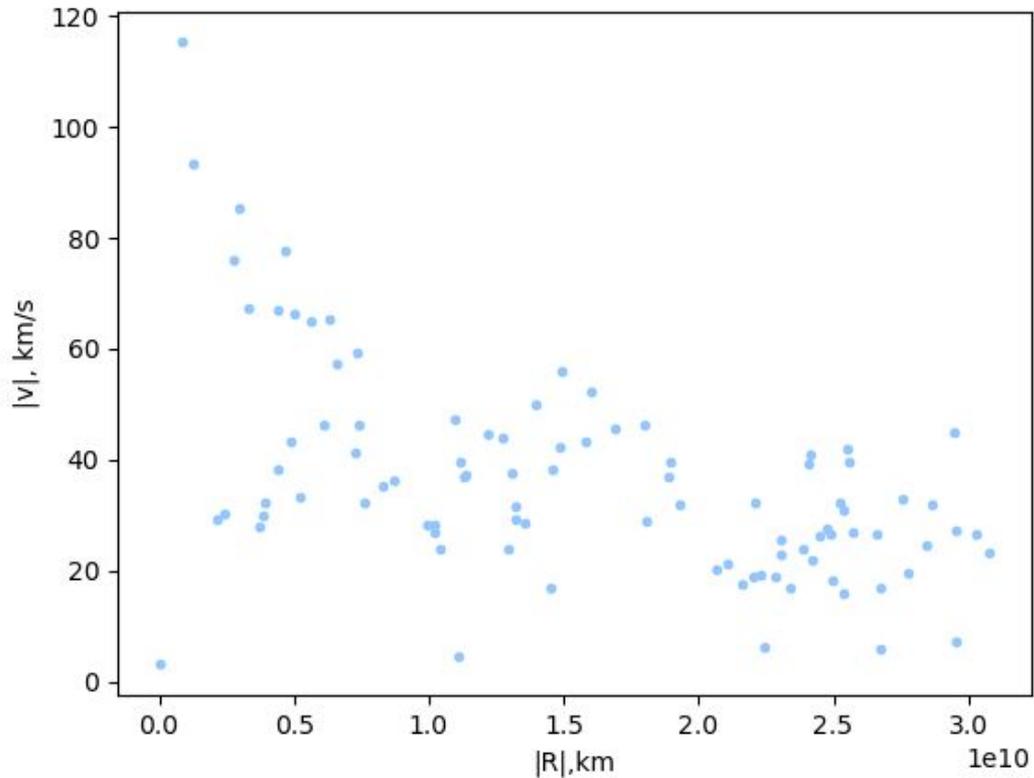


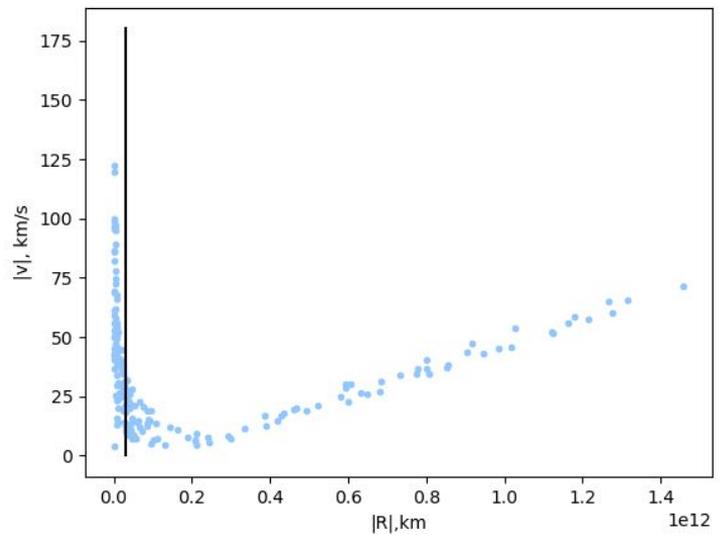
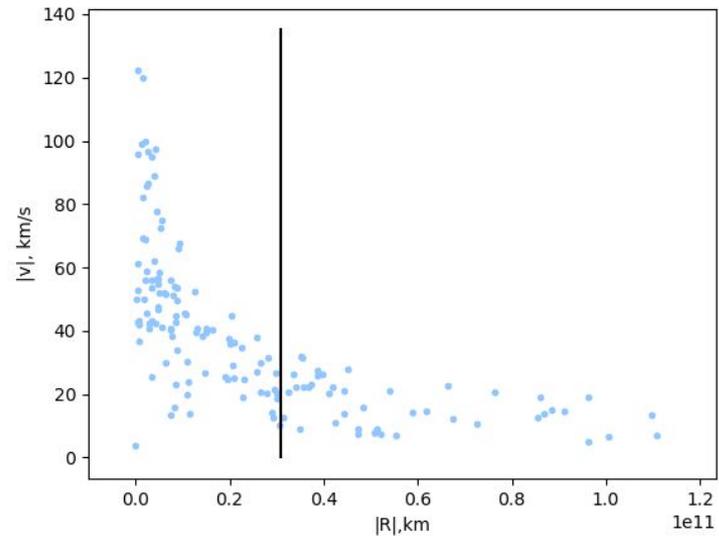
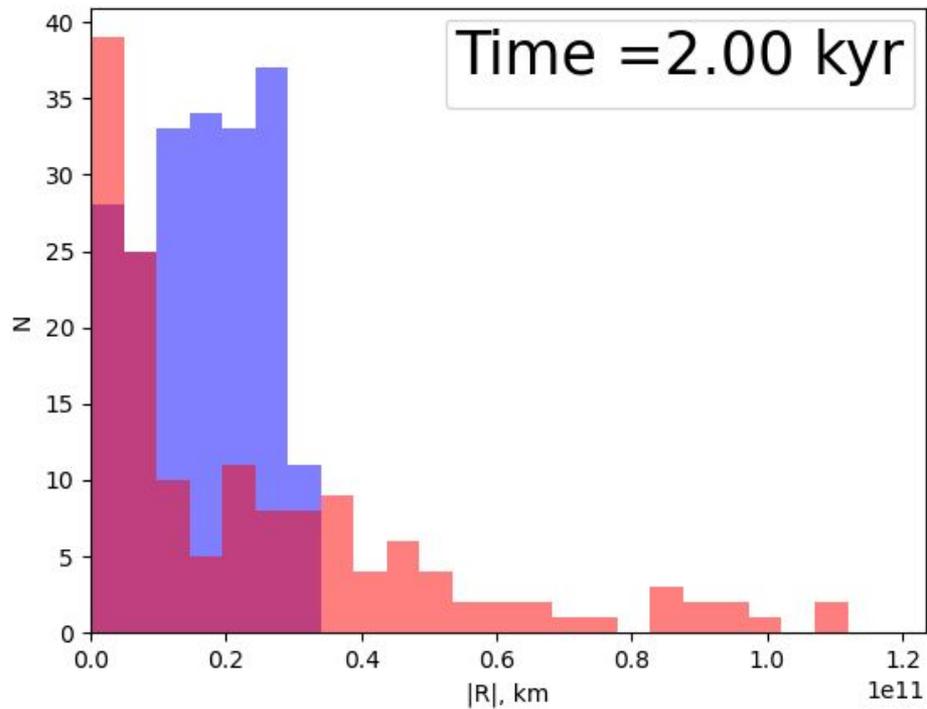
Распределение скоростей и положений в скоплениях

Нормальное распределение по скоростям и равномерного по координатам ($N=10^3$)



Статистически устойчивое распределение ($N=10^2$)





Заключение

В данной работе был проведён небольшой обзор на проблемы современной космологии, успехи гравитационно-волновой астрономии и концепции первичных чёрных дыр (ПЧД). Отдельно рассмотрены гравитационно-волновой сигнал GW150914 и гипотезы о природе породивших его черных дырах. Одной из гипотез отмечена возможность существования кластеров ПЧД с центральными массивными ЧД на эпохе рд-мд перехода, слияние которых также отразится на темпе слияний, наблюдаемых экспериментами коллабораций LIGO, Virgo и KaGra.

В рамках научной работы был разработан скрипт на языке Python для N-body моделирования. В ходе работы со скриптом был получен опыт моделирования систем шаровых скоплений и оценивания параметров и масштабов этих систем.

Отдельно стоит отметить, что были улучшены навыки работы с Docker контейнерами и методами кроссплатформенной разработкой в целом, программирования на языке Python с использованием математических библиотек и изучены методики GPU и CPU оптимизации с помощью технологии jit-компиляций пакета Numba, а также методы параллельных вычислений.

Заключение. Дальнейшая работа.

1. Проверка гипотез распределений параметров в скоплениях в литературе
2. Моделирование двойных со скоплениями при $e=0$. Оценка параметров орбит.
3. Расчёт темпа слияний для такой модели.
 - Проверка результатов в более точных программных пакетах.
 - Вариации распределения масс и гало тёмной материи.
 - ГВ сигналы таких систем (если они доживают до наших времён).

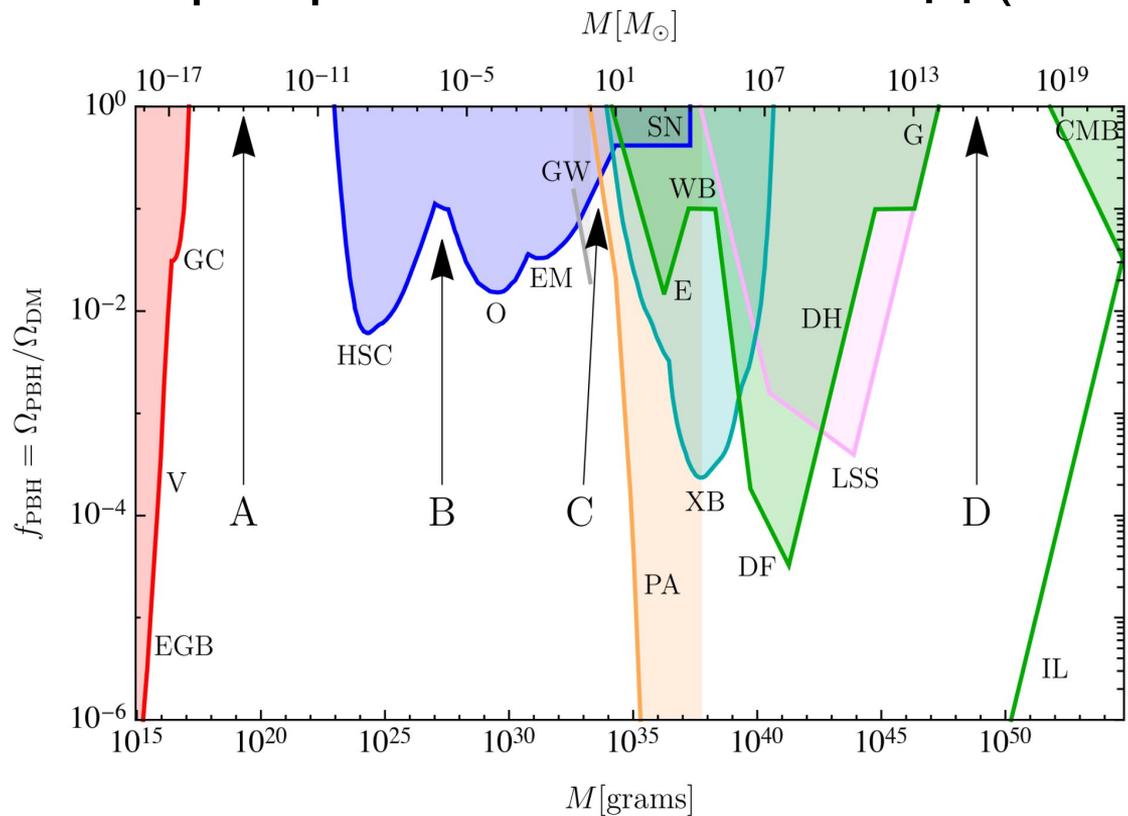
Спасибо за внимание

Про спин ЧД

[B. P. Abbott et al. \(LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration\) “Properties of the Binary Black Hole Merger GW150914” 2016](#)

(magnitude and orientation) of the individual BHs. For a BH of mass m , the spin can be at most Gm^2/c ; hence, it is conventional to quote the dimensionless spin magnitude $a = c|\mathbf{S}|/(Gm^2) \leq 1$. Nine additional parameters are

Спектр ограничений масс ПЧД (монохроматический)



[Primordial Black Holes as Dark Matter: Recent Developments](#)

[Bernard Carr, Florian Kuhnel](#)

[arXiv:2006.02838](#)

[\[astro-ph.CO\]](#)

$$dP = \frac{3}{4} f^{3/2} \bar{x}^{-3/2} a^{1/2} e (1 - e^2)^{-3/2} da de.$$

$$t = Q a^4 (1 - e^2)^{7/2}, \quad Q = \frac{3}{170} (GM_{\text{BH}})^{-3}$$

[Misao Sasaki "Primordial Black Hole Scenario for the Gravitational-Wave Event GW150914"](#)

Приливные эффекты для двойных скоплений

Можно представить вместо гало частиц скрытой массы шаровое скопление ЧД меньших масс. Приливные силы в таких системах могут сильно повлиять на эксцентриситет “выравнивая” орбиту в более округлую форму и увеличивая её “время жизни”.

Оценка орбитальных параметров

Для круговой орбиты и одинаковых тел:

Период выбирается такой, что время релаксации скопления (TE) сильно меньше периода орбиты.

Характеристики орбиты выбираются из вероятностных распределений обнаружить двойную, описанных в работах выше.

$$T_E = \frac{1}{25.5 \lg N/2} \cdot \sqrt{\frac{NR_1^3}{Gm_1}}$$

$$m_1 \frac{v^2}{R} = \frac{Gm_1m_2}{(2R)^2} \Rightarrow v = \sqrt{\frac{Gm_2}{4R}}$$

$$m_1 \omega^2 R = m_1 \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \cdot R = \frac{Gm_1m_2}{(2R)^2} \Rightarrow R^3 = \left(\frac{T}{2\pi}\right)^2 \cdot \frac{Gm_2}{4}$$

Время релаксации

Временной шаг: 0.1 yr

Масса ск.: $500M_{\odot}$

Радиус ск.: 1 пк

Частиц в ск.: 100

Максимум по оси t:

$4 \cdot 10^{12} \text{c} = 0.4 \text{ Myr}$

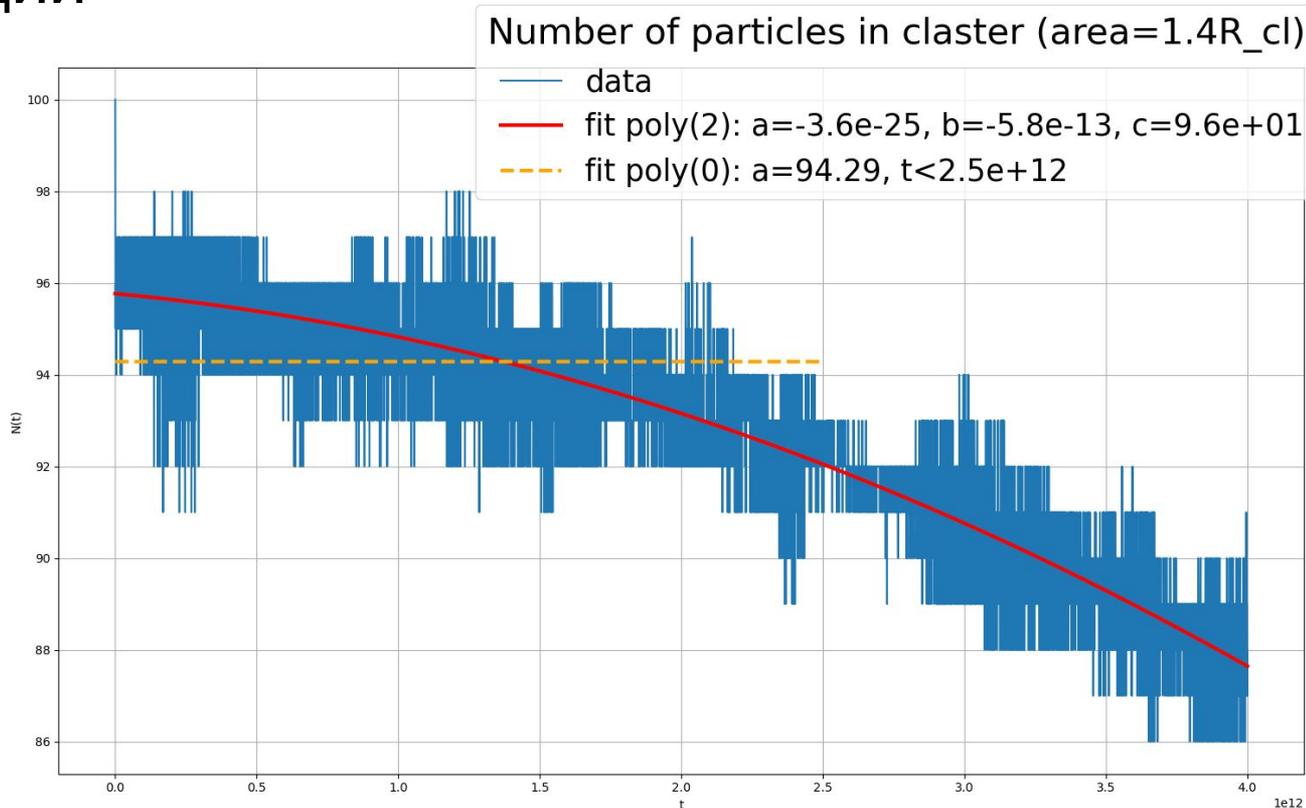
Расчётное время

релаксации: 0.9 Myr

Потери не более 5%

(N: 92-97) до t =

0.25-0.30 Myr



Время релаксации

Временной шаг: 0.1 yr

Масса ск.: $530M_{\odot}$

Радиус ск.: 1 пк

Частиц в ск.: 101

(1 частица: $30M_{\odot}$)

Максимум по оси t:

$2 \cdot 10^{12} \text{c} = 0.2 \text{ Myr}$

Расчётное время

релаксации: 0.9 Myr

Потери не более 5%

(N: 93-98) до $t = 0.2 \text{ Myr}$

