
Моделирование наблюдательных проявлений темной материи

Ткачев М. В.

науч. рук.: к.ф.-м.н. Пилипенко С. В.

Введение

Кривые вращения Галактик

Гравитационное
линзирование

Реликтовое излучение

Излучение грав. волн

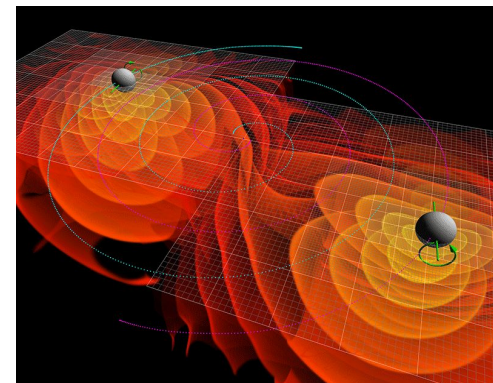
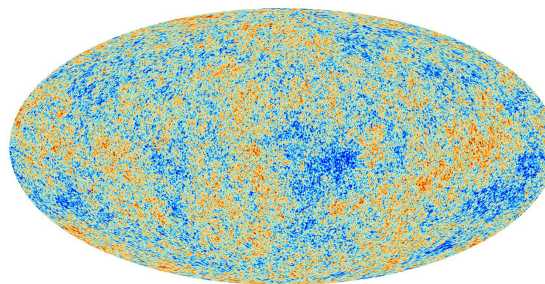
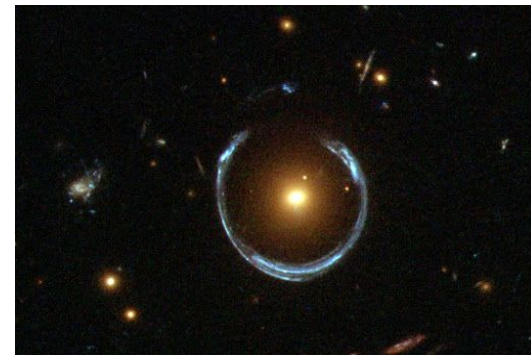
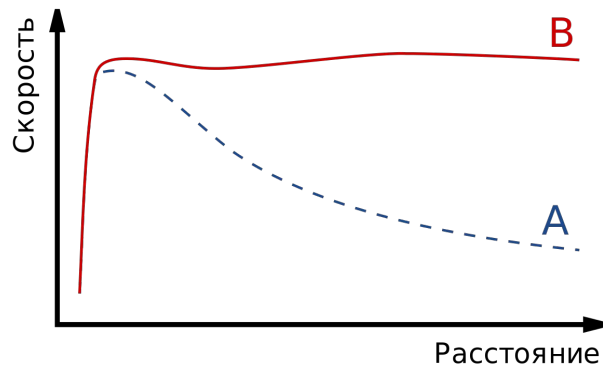
И другие...

**В
диссертации:**

Проблема каспов в
ТМ

Модель ИКФ с ТМ

ТМ из ПЧД



Цели работы:

1. Исследовать и проверить энтропийный подход к проблеме образования гало темной материи и развить идею «энтропийной модели» (**Глава 1**).
2. Разработать метод, позволяющий измерить энтропию темного гало в численных моделях и сравнить ее с предсказаниями теории (**Глава 1**).
3. Построить модель фона созданного далекими галактиками, излучающими в дальнем инфракрасном (ИК) диапазоне (**Глава 2**).
4. Оценить на основе численных моделей образования гало как предсказания модели ИК-фона согласуются с существующими данными о подсчетах источников (**Глава 2**).
5. Проанализировать процессы образования и разрушения гравитационно-связанных пар ПЧД при взаимодействии большого числа ПЧД, а также слияния как связанных, так и несвязанных пар, и оценить вероятность таких событий (**Глава 3**).
6. Оценить влияние численных эффектов моделирования на результат и определить основной фактор разрушения гравитационно-связанных пар (**Глава 3**).

Глава 1

Моделирование гало темной материи: проверка энтропийного подхода к проблеме каспов

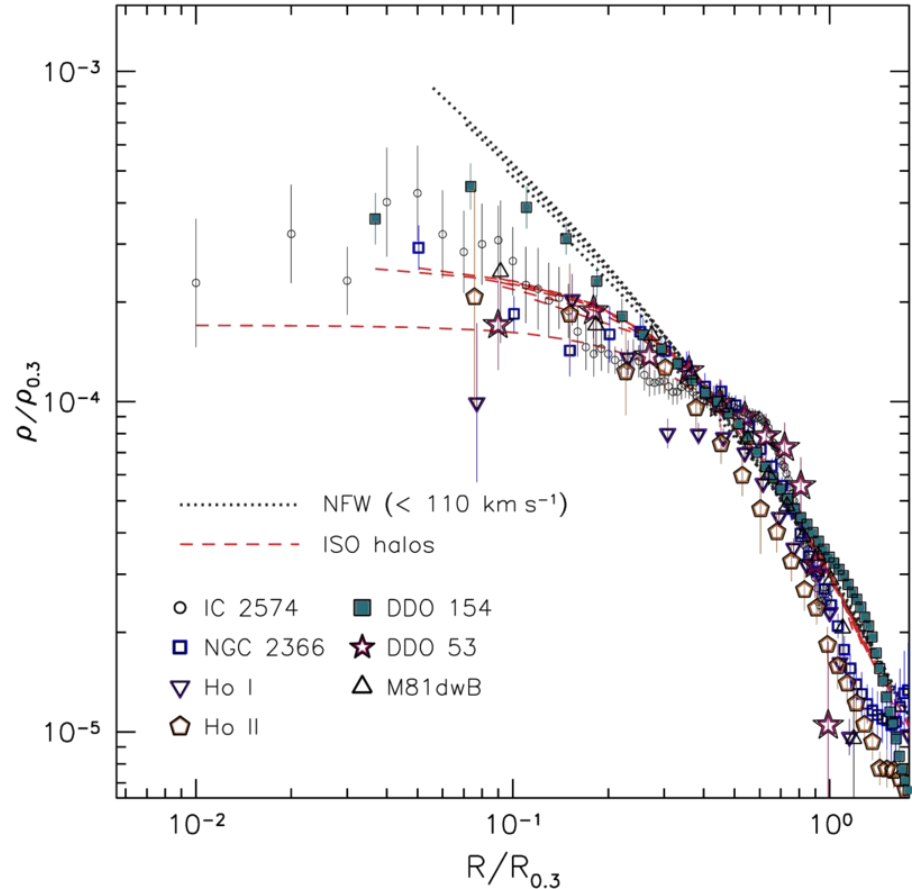
1.1: Введение в Главу 1

Численные модели - один из основных инструментов исследования гало ТМ

ТМ Профиль NFW ($M > 10^{13} M_{\odot}$) (APJ 1996):
Профиль Бюркerta (AJ 1995):

Несоответствие между симуляциями и наблюдениями – «**проблема каспов**»

Проф. плотности THINGS (Se-Heon et al, AJ 2011)



1.2: Энтропийный подход:

Б-столкн. неравновесные системы

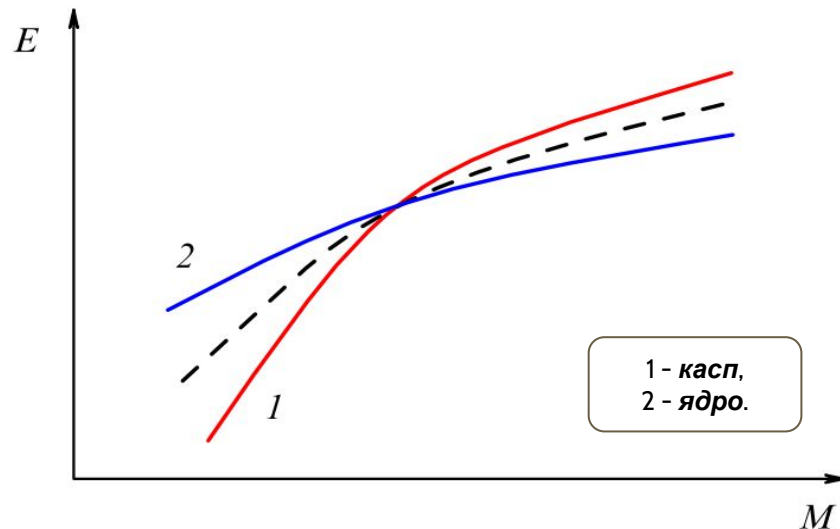
D. Lynden-Bell (1966)

Грубая фазовая плотность f – не возрастает для замк. изол. системы

$$f = \frac{\rho}{m\sigma^3} \rightarrow E = f^{-\frac{2}{3}} \rightarrow E = \sigma^2 \left(\frac{m}{\rho} \right)^{2/3} \rightarrow E(M) = \sqrt{E_b^2 + E_g^2},$$

1. **«Фоновая» эн. E_b** – мелкомасштабные начальные неоднородности в распределении материи,
2. **«Приобретенная» эн. E_g** – бесстолкн. иерархическая релаксация материи на нелинейной стадии формирования гало.
3. **«Полная» эн. E вир. гало** – совокупное воздействие всех неравновесных процессов, протекавших за время его формирования (включ. E_b и E_g)

симуляции высокого разрешения способны вносить добавочную фоновую энтропию E_b и, таким образом, решить проблему каспов



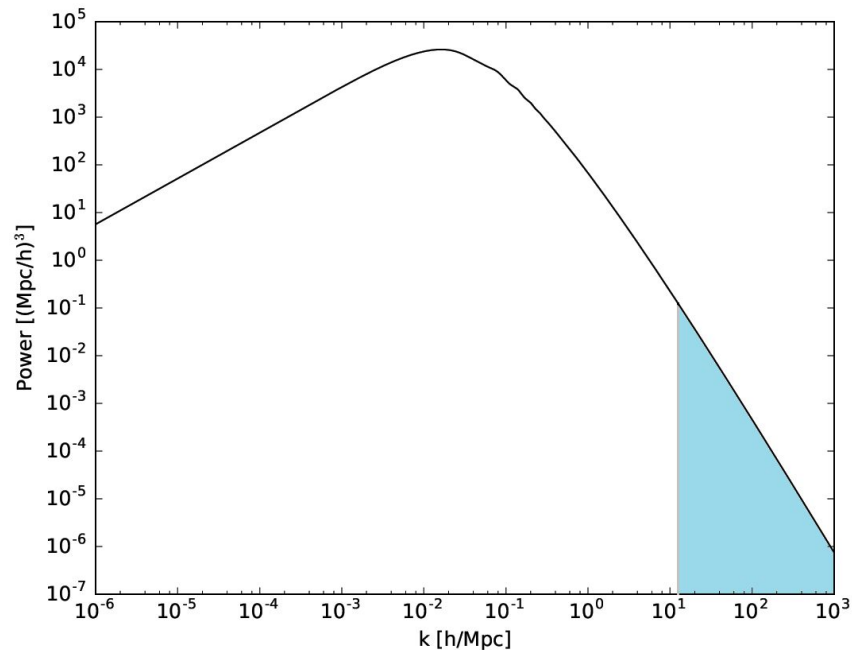
1 – касп,
2 – ядро.

Энтропийная функция масс равновесного гало.
А.Г. Дорошкевич, В. Н. Лукаш, Е.В. Михеева, (УФН
2012)

1.3: Измерение фоновой энтропии

- два численных расчета образования гало из похожих начальных условий
- Начальные условия имеют одинаковые фазы возмущений плотности и скорости на масштабе порядка размера гало, а на меньших масштабах эти фазы разные (см. рисунок)
- разница между E_{sim1} и E_{sim2} целиком определяется фоновой энтропией:

$$\sigma(E_{sim1} - E_{sim2}) = \sqrt{2}\sigma(E_b)$$

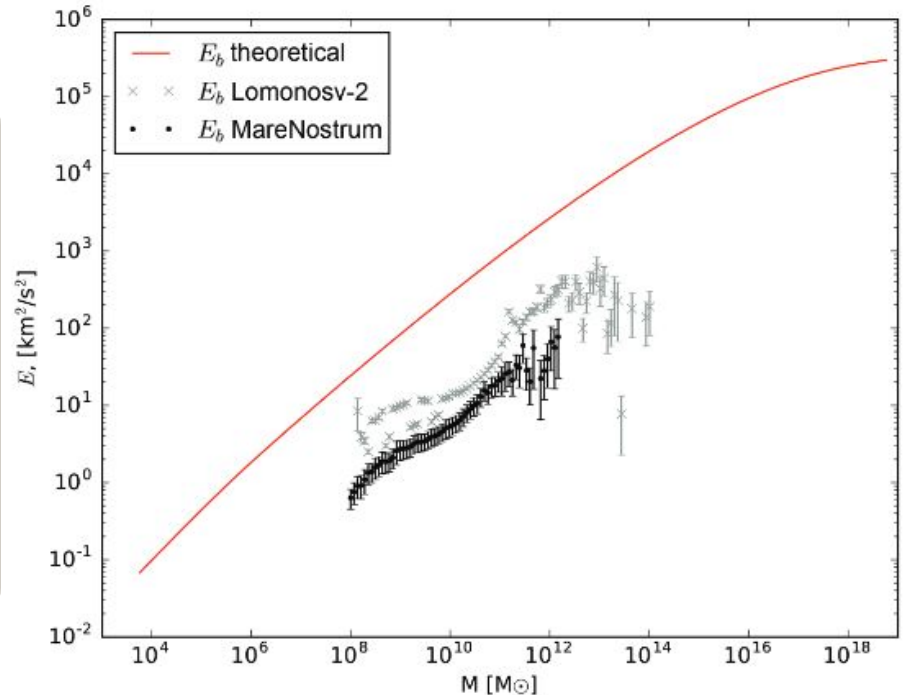


Спектр мощности начальных возмущений
(D. Eisenstein, W. Hu, APJ 1999)

1.5: Результаты

- Для каждого гало был построен профиль функции энтропии $E(< M)$ для сфер радиуса r , ограниченных полной массой $M(r)$.
- Для пар гало из разных симуляций профили вычитались друг из друга
- Для каждого значения M была посчитана **дисперсия** разницы функции энтропии σ ($E_{sim1} - E_{sim2}$) по ансамблю всех используемых гало.
- Предполагая, что фоновая энтропия распределена по Гауссу около некоторой средней величины:

$$\sigma(E_{sim1} - E_{sim2}) = \sqrt{2}\sigma(E_b)$$

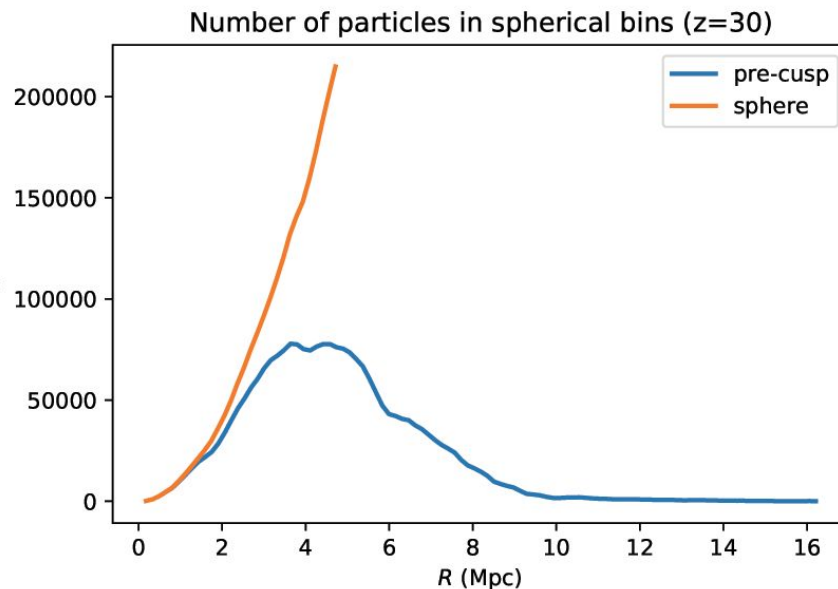


Фоновая энтропия E_b , оцененная нашим методом, в зависимости от массы $M(r)$, сосредоточенной внутри радиуса r для численного расчета из данной работы (точками) и для модели Местной группы (крестиками).

Линией – теоретическая оценка E_b из работы УФН 2012.

1.6: Результаты измерения энтропии ядра гало

Энтропия каспа на $z=0$ (Lomonosov-2)	$1005.29 \text{ км}^2/\text{с}^2$
Фоновая энтропия найденная нашим методом ($z=0$) (Lomonosov-2)	$113.02 \text{ км}^2/\text{с}^2$
Фоновая энтропия, найденная по линейной теории ($z=0$)	$14632.11 \text{ км}^2/\text{с}^2$
Энтропия группы частиц каспа на момент ($z=40$)	$4.27 \text{ км}^2/\text{с}^2$
Энтропия сферической группы на момент ($z=40$)	$3.29 \text{ км}^2/\text{с}^2$



Распределение расстояний частиц на ($z=30$)
синим - группа частиц каспа, **оранжевым** -
сферическая группа

1.7: Заключение по Главе 1

- Значение фоновой энтропии, полученное из численного счета на основе данной модели отличается почти на порядок от теоретической оценки фоновой энтропии, как для симуляции на Lomonosov-2, так и для симуляции CLUES.
- Касп в гало возникает из областей начального распределения материи, имеющих энтропию на порядок ниже, чем в среднем по Вселенной (внутри сферы с массой каспа).
- Поэтому предположение о том, что симуляции высокого разрешения способны вносить добавочную фоновую энтропию и, таким образом, решить проблему каспов, скорее всего не соответствует действительности.
- Мы предполагаем, что такое расхождение связано в первую очередь с предположением о сферичности гало в теоретической модели

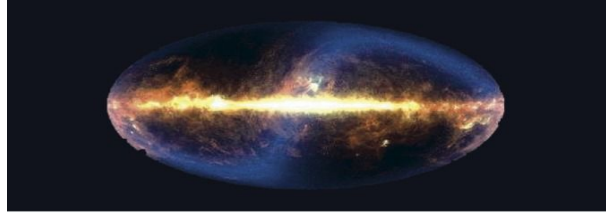
Глава 2

Модель инфракрасного фона неба, созданного далекими галактиками

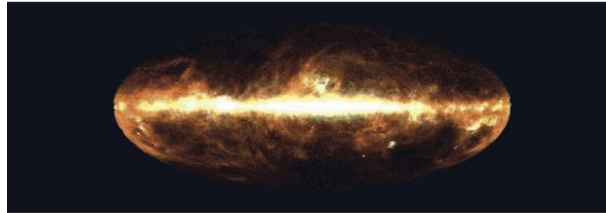
2.1: Введение в Главу 2



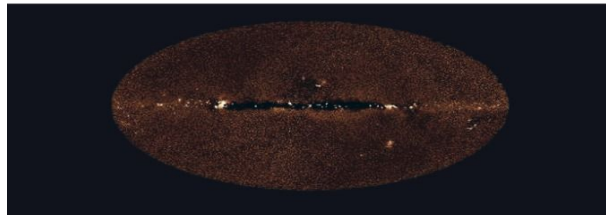
- Современные модели не учитывают крупномасштабных неоднородностей в распределении материи во Вселенной.
- Наша учитывает



a



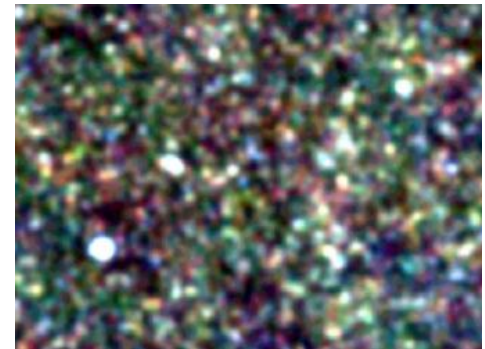
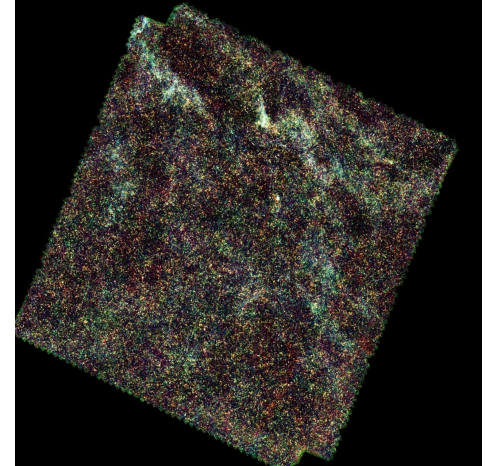
б



в

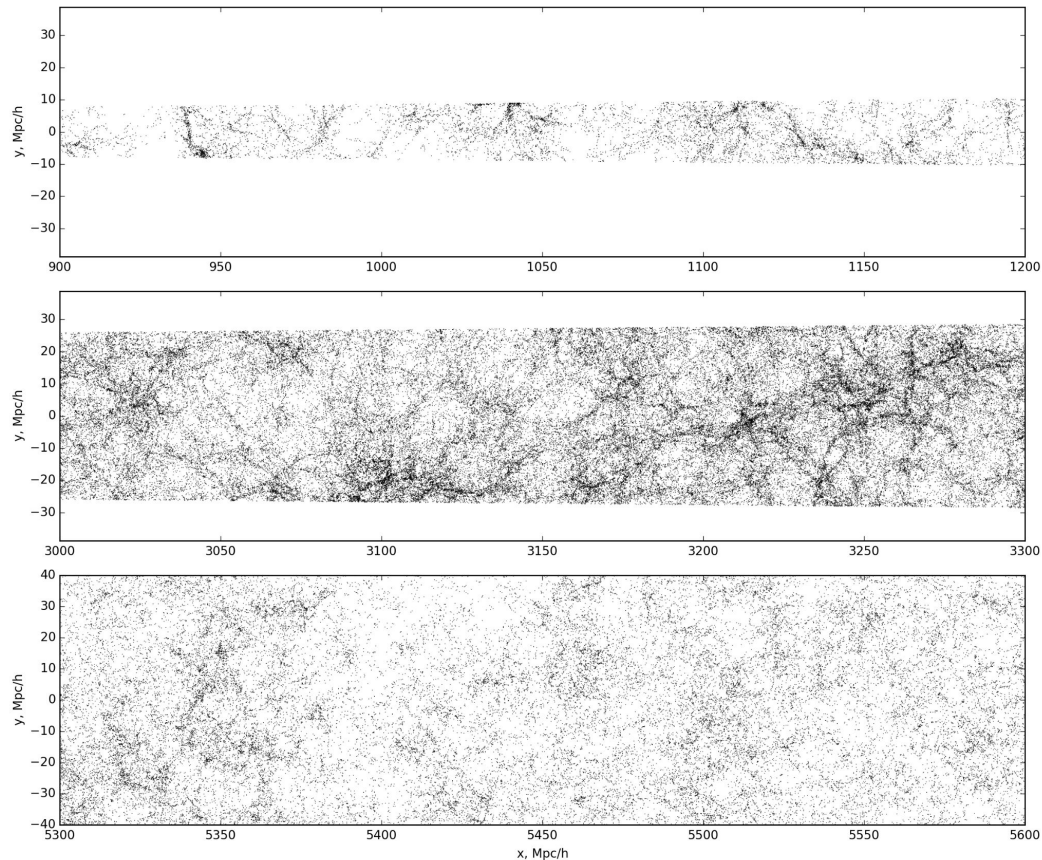
COBE mission

- а) пыль Сол. Системы
- б) без зодиакального света,
- в) без галактических источ.



2.3: Описание модели

1. Представление каталога гало в виде заполненного конуса (COSMOSIM, учет нелинейной крупномасштабной структуры Вселенной)
2. Присвоение каждому гало светимости (с учетом сильного грав. линзирования)
3. Расчет потоков от каждой галактики для заданной длины волны (спектрального окна)
4. Получение карты неба с помощью интерполяции
5. Свертывание карты с диаграммой направленности телескопа.



2.3: Гравитационное линзирование

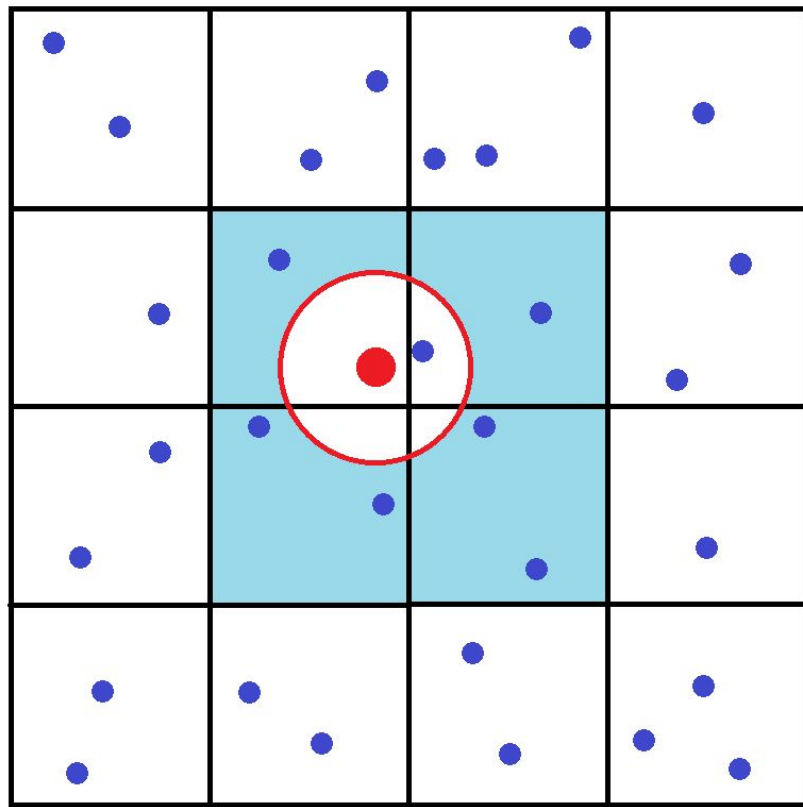
точечная линза

$$\mu(M_L, D_L, D_S, \beta) = \frac{\tilde{\beta}^2 + 2}{\tilde{\beta} \sqrt{\tilde{\beta}^2 + 4}}$$

сферич. линза

$$\mu(M_L, D_L, D_S, \beta) = \begin{cases} \frac{2}{\tilde{\beta}}, & \tilde{\beta} \leq 1 \\ \frac{\tilde{\beta}+1}{\tilde{\beta}}, & \tilde{\beta} > 1 \end{cases}, \quad \tilde{\beta} = \frac{\beta}{\alpha_0},$$

$$\alpha_0 = \sqrt{\frac{4GM_L}{c^2} \frac{D_{LS}}{D_S D_L (1+z_L)}},$$

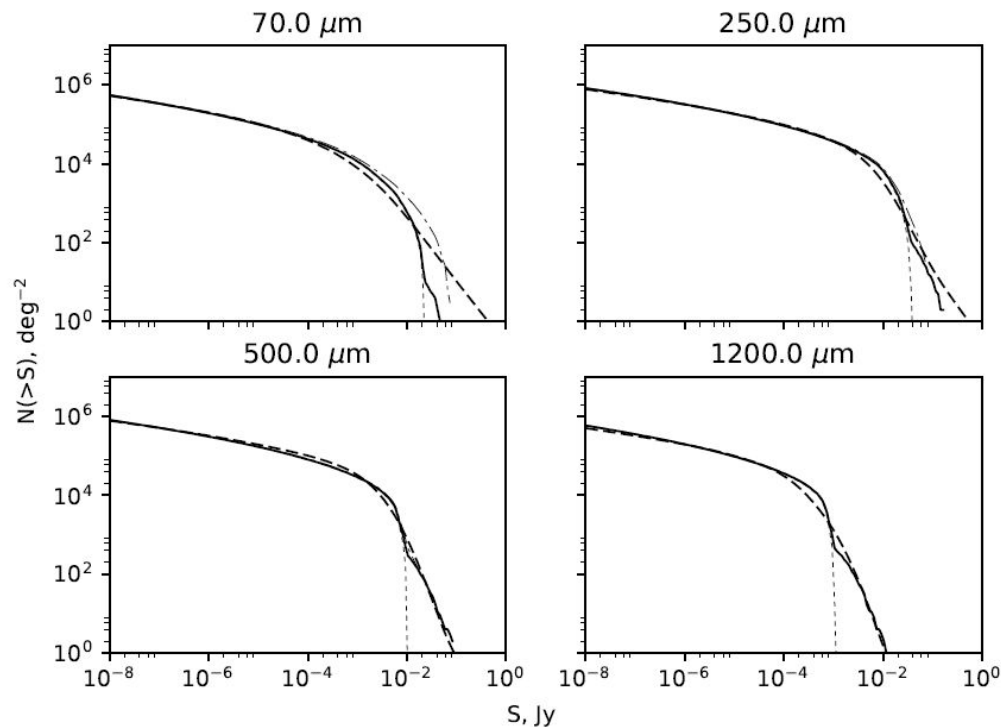


2.3: Определение светимостей галактик

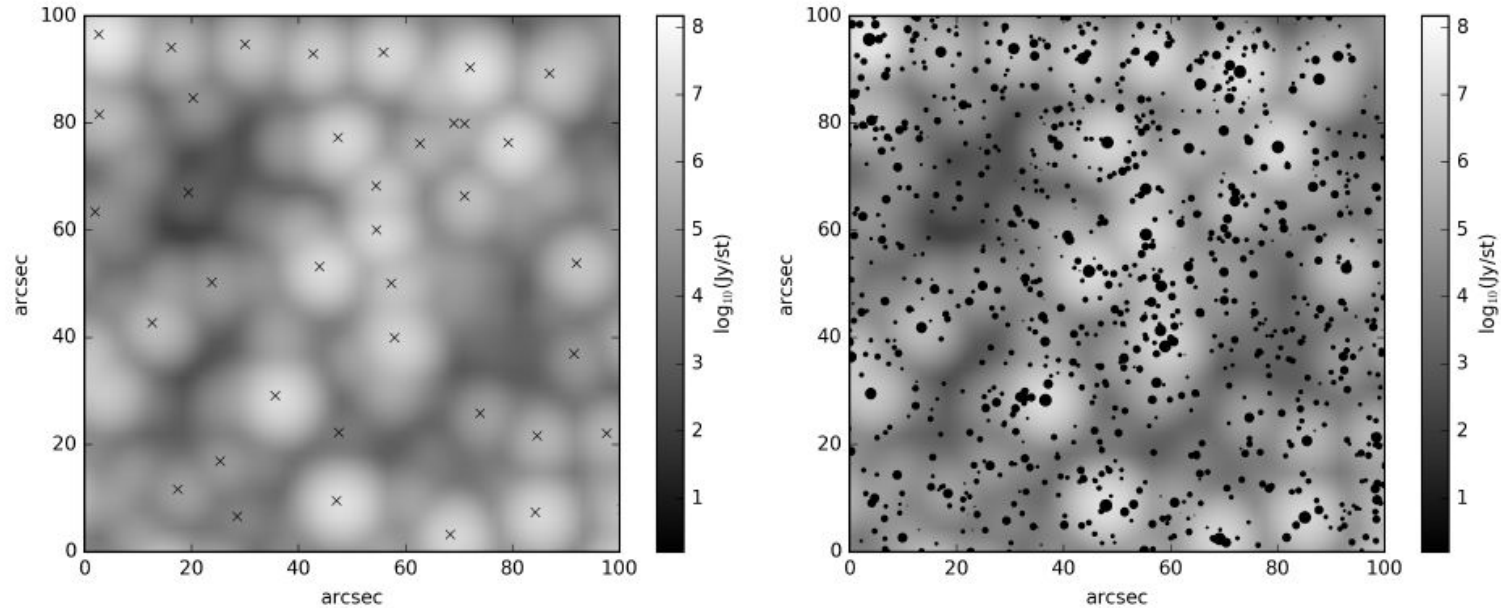
Использовано одно из наиболее часто применяемых соотношений массы гало M и светимости галактик L из работы Viero (APJ, 2013):

$$L(M, z) = L_0(1+z)^\eta \log(M) \exp\left(-\frac{(\log(M) - \log(M_0))^2}{2\sigma_L^2}\right),$$

Подсчеты числа источников в модели с учетом эффектов гравитационного линзирования (**сплошные линии**), без учета гравитационного линзирования (**пунктирная линия**) и в модели Betermin (A&A, 2011) (**штриховая линия**) на 70, 250, 500 и 1200 мкм



2.4: Практическое применение модели



Пример участка карты модельного фона неба размером 100 на 100 угловых секунд на длине волны 300 мкм. Слева крестами показаны пики интенсивности, найденные с помощью вторых производных. Справа точками показаны модельные галактики. Размер точки пропорционален логарифму потока от галактики.

2.5: Заключение по Главе 2

- Построена модель ИК-фона далеких галактик, учитывающая крупномасштабную структуру Вселенной и усиление потоков за счет гравитационного линзирования на галактиках и скоплениях галактик.
- Модель воспроизводит измеренный двумерный спектр мощности карт ИК фона, измеренный космической обсерваторией Herschel
- Данная модель может быть использована для определения предела путаницы для будущих космических телескопов дальнего ИК диапазона 10-метрового класса, а также для сравнения кластеризации пиков интенсивности фона с реальной крупномасштабной структурой.

Таблица 4 — Предел путаницы в дальнем ИК/субмиллиметровом диапазоне

Апертура/критерий	100 мкм	300 мкм	1000 мкм
3.5 м (Herschel)			
Плотность источников	80 мкЯн	10 мЯн	3 мЯн
Фотометрический (из подсчетов)	0	6 мЯн	5 мЯн
Фотометрический (из карты)	60 мкЯн	20 мЯн	13 мЯн
Полнота 50%:			
поиск максимумов	0.2 мЯн	9 мЯн	4 мЯн
getsources монохром	0.5 мЯн	14 мЯн	12 мЯн
getsources многоволновый	0.5 мЯн	3 мЯн	2 мЯн
10 м (Миллиметр)			
Плотность источников	1 нЯн	0.3 мЯн	1 мЯн
Фотометрический (из подсчетов)	0	0.3 мкЯн	1 мЯн
Фотометрический (из карты)	40 мкЯн	0.3 мЯн	4 мЯн
Полнота 50%:			
поиск максимумов	14 мкЯн	0.6 мЯн	1 мЯн
getsources монохром	9 мкЯн	0.7 мЯн	1 мЯн
getsources многоволновый	10 мкЯн	0.1 мЯн	1 мЯн

Глава 3

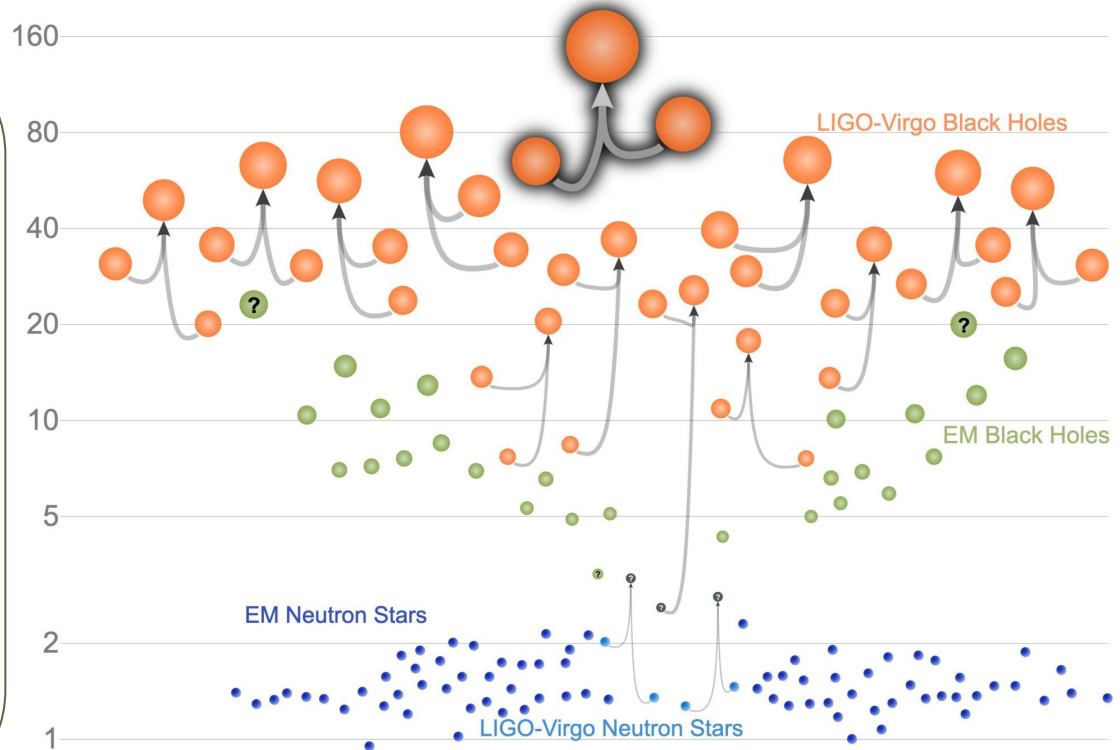
Первичные Черные Дыры в Ранней Вселенной: Симуляции Темной Материи

3.1: Введение в Главу 3

- Обнаружены ГВ, первое наблюдаемое слияние ЧД в истории, 14.09.2015
- Исследования природы ТМ продолжаются
- обнаружена ЧД массой 85 сол. масс. (pair instability gap)
- ПЧД является перспективным кандидатом в ТМ

LIGO Collaboration (2020)

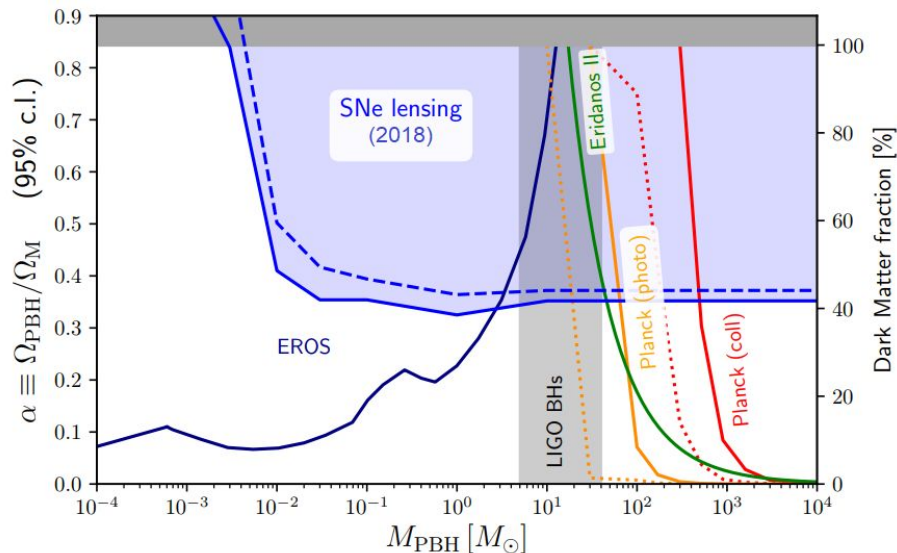
Masses in the Stellar Graveyard *in Solar Masses*



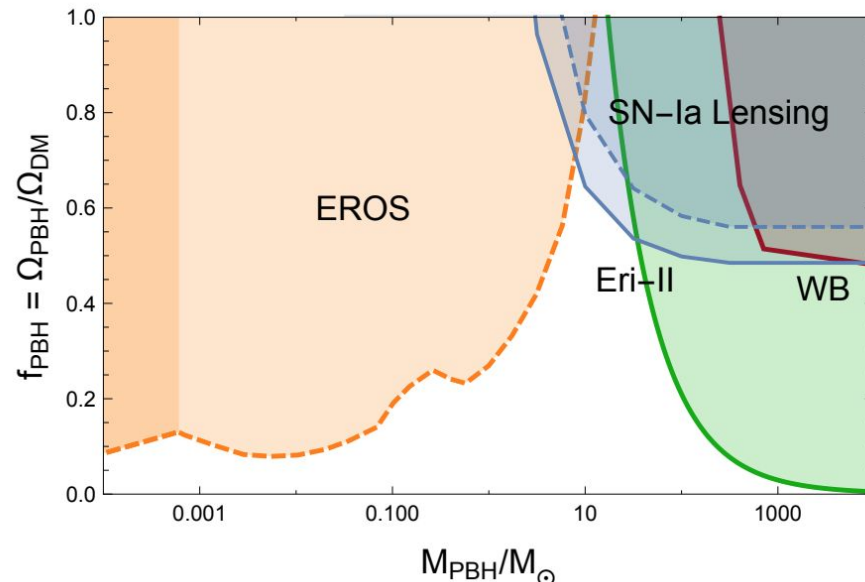
Updated 2020-09-02
LIGO-Virgo | Frank Elavsky, Aaron Geller | Northwestern

3.1: Ограничения на присутствие ПЧД в ТМ

M. Zumalacarregui,
U. Seljak (2017)



J. Garcia-Bellido, S. Clesse, P.
Fleury (2017)



Массы событий слияния ЧД, наблюдаемых LIGO (серым) довольно слабо ограничены данными предыдущих наблюдений (EROS - микролинзирование, Eridanus II - стабильность компактных звездных систем, Planck - CMB).

3.2: Параметры численной модели

Модификация **GADGET-2**:

- Учет радиационно-доминированной стадии

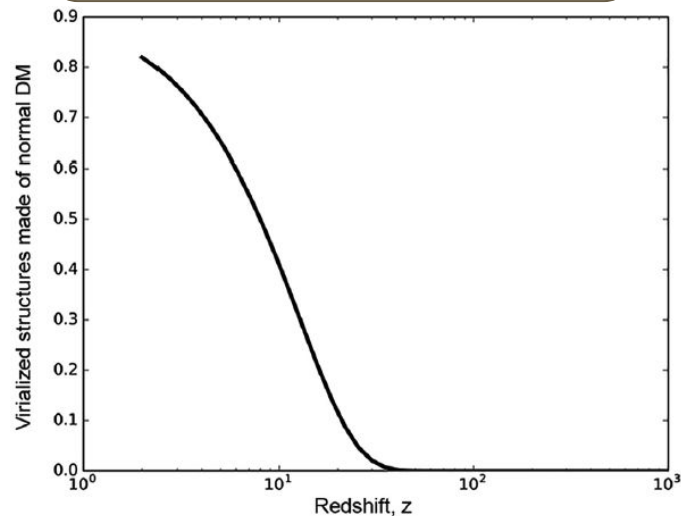
$$H(z) = H_0[\Omega_{\Lambda,0} + \Omega_{m,0}(1+z)^3 + \Omega_{r,0}(1+z)^4]^{\frac{1}{2}}$$

$$\Omega_{m,0} = \Omega_{PBH,0} + \Omega_{DM,0}$$

$$f_{PBH} = \frac{\Omega_{PBH,0}}{\Omega_{DM,0}}$$

Модификация **GADGET-2**:

- ПЧД как фракция ТМ



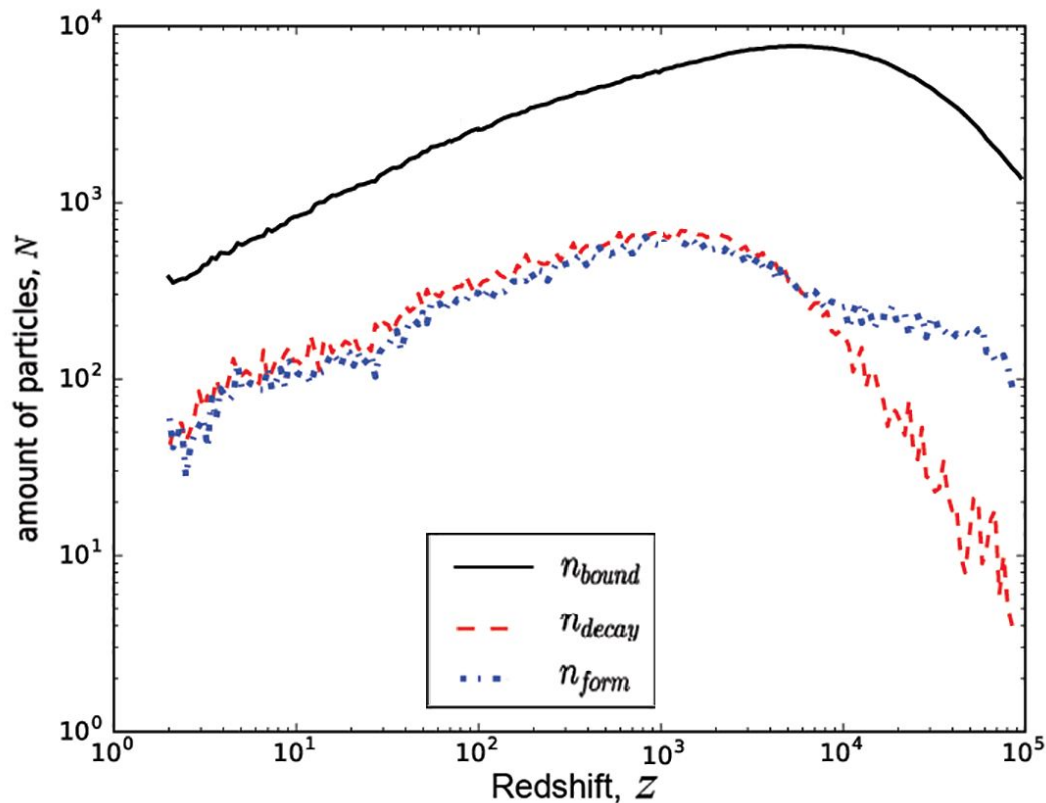
Фракция f_{PBH}	1.0	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-4}
Размер куба (кпк/h)	15.21	32.77	152.11	327.71	706.04	1521.12
Число частиц N_{total}	10^4	10^4	10^5	10^5	10^5	10^6

3.3: Формирование и разрушение пар ПЧД

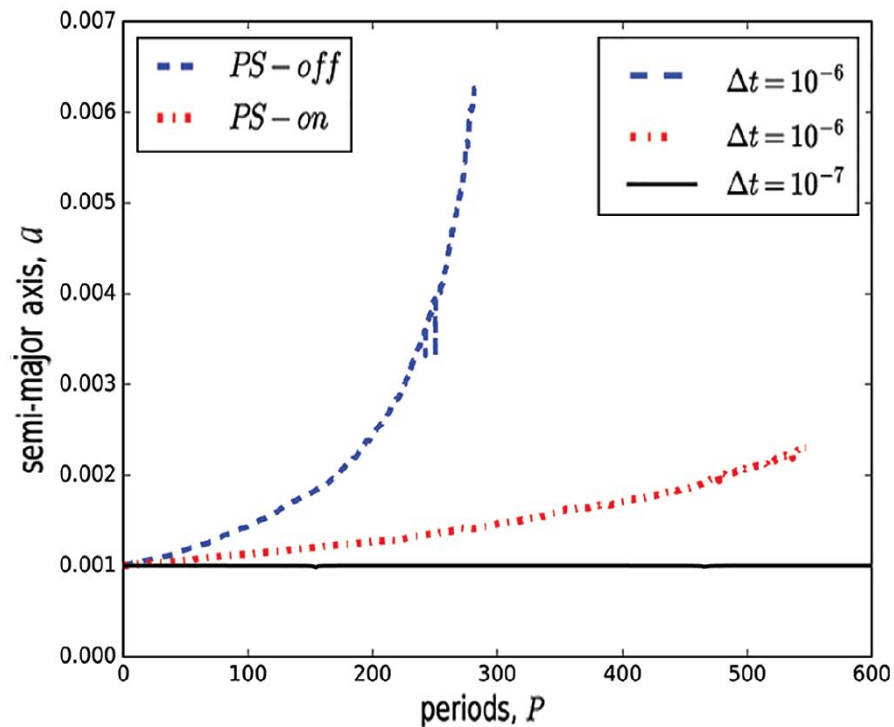
Число пар ПЧД в зависимости от красного смещения при $f = 1.0$.

- полное число грав.-связанных пар (**черным**)
- число формирующихся пар (**синим**)
- число разрушающихся пар (**красным**)

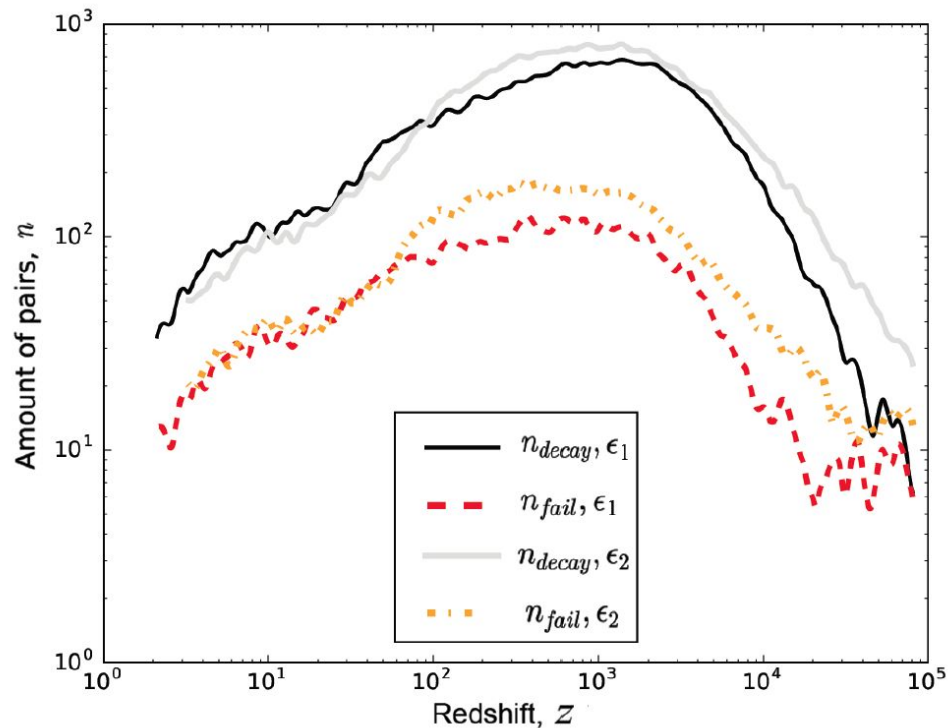
Спад вызван физическим процессом или численными эффектами?



3.4: Учет численных эффектов



Изменение б. п-оси отдельной пары в зависимости от кол-ва периодов обр.

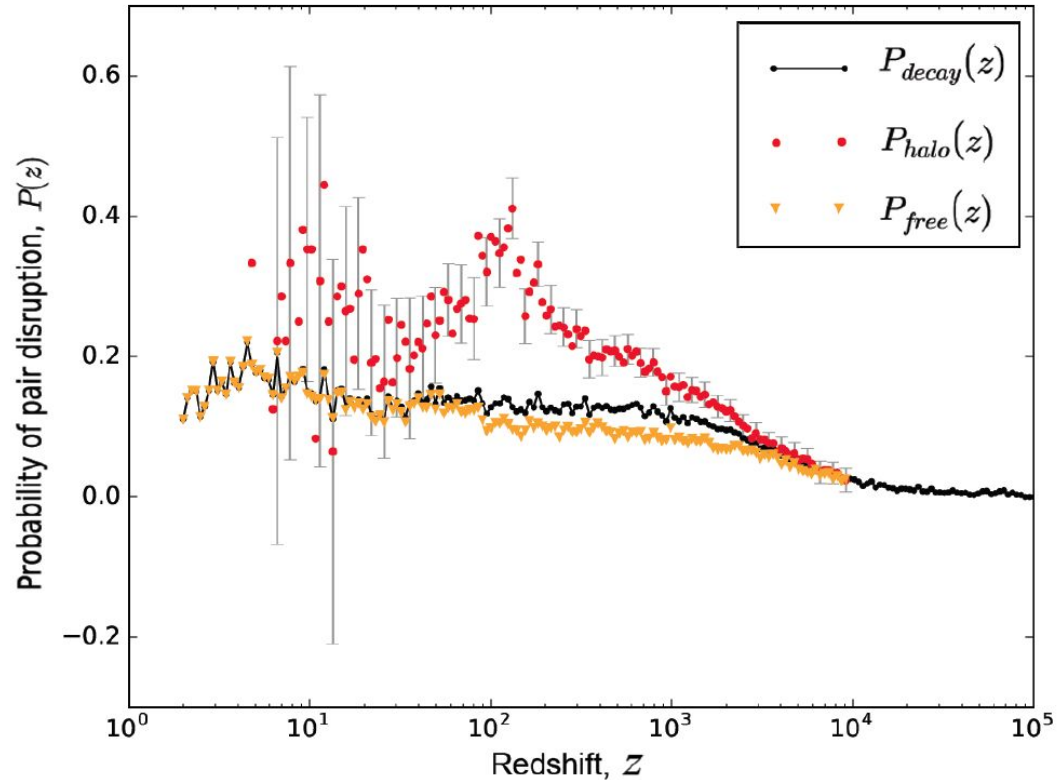


Сравнение численных моделей с разными длинами сглаживания

3.4: Вириализация материи

- **AHF** Halo finder
- ПЧД образуют гало при фракциях **0.1** и **1.0** при ($z \approx 3k$)
- При $z \approx 10$ большая часть частиц находится в вириализованных структурах

Вероятность разрушения пары ПЧД
(**внутри** гало, **снаружи** гало и
суммарная)

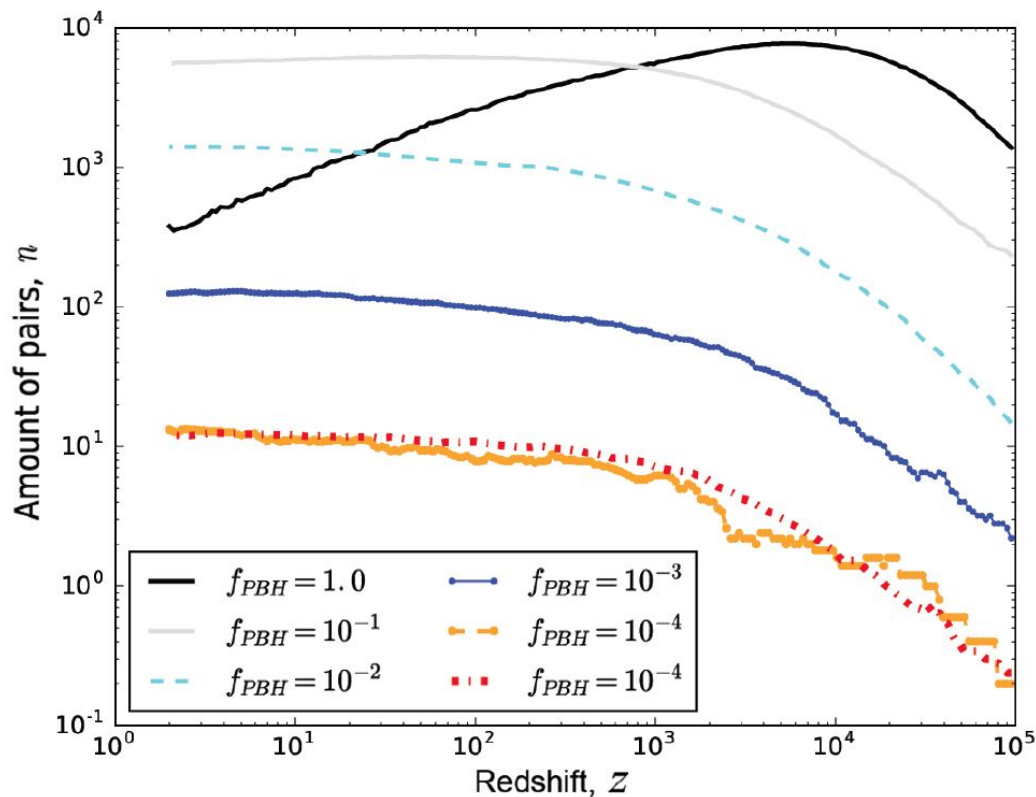


3.5: Результаты: число связанных пар ПЧД

Число гравитационно-связанных пар для разных значений фракции ПЧД:

- **Черная** сплошная -- $f_{PBH} = 1.0$, $N = 1e4$
- **Серая** сплошная -- $f_{PBH} = 1e-1$, $N = 1e4$
- **Голубая** штриховая -- $f_{PBH} = 1e-2$, $N = 1e5$
- **Синяя** сплошная -- $f_{PBH} = 1e-3$, $N = 1e5$
- **Оранжев.** штриховая -- $f_{PBH} = 1e-4$, $N = 1e5$,
- **Красная** штрих-пунктирная -- $f_{PBH} = 1e-4$, $N = 1e6$

Число пар линейно зависит от фракции f_{PBH} , (Kavanagh et al., 2018)

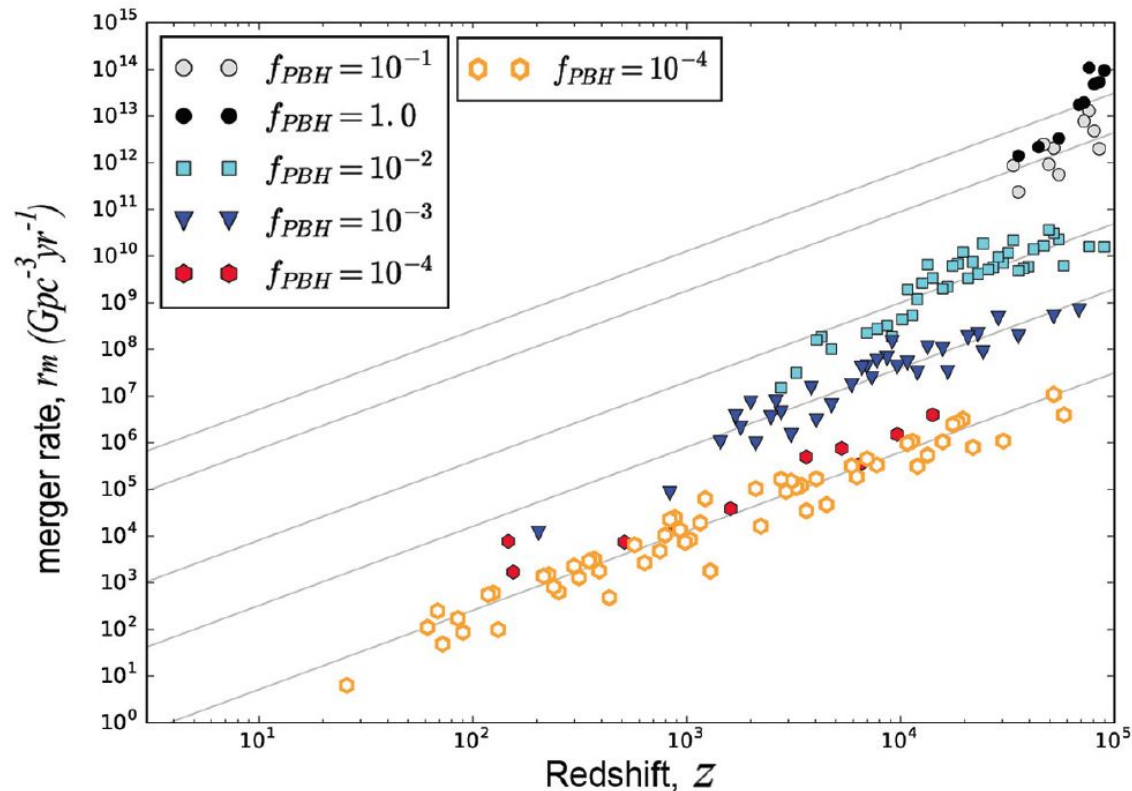


3.6: Результаты: частота слияния пар ПЧД

Частота слияния пар ПЧД, r_m от красного смещения z :

- **Черные** точки -- $f_{PBH} = 1.0$, $N = 1e4$
- **Серые** точки -- $f_{PBH} = 1e-1$, $N = 1e4$
- **Голубые** квадраты -- $f_{PBH} = 1e-2$, $N = 1e5$
- **Синие** треуг. -- $f_{PBH} = 1e-3$, $N = 1e5$
- **Оранжев.** шестиуг. -- $f_{PBH} = 1e-4$, $N = 1e5$,
- **Красные** шестиуг -- $f_{PBH} = 1e-4$, $N = 1e6$

только 0.77% от всех слияний в 6 симуляциях имели гиперболическую траекторию



3.7: Заключение по Главе 3

- Формирование крупномасштабной структуры (гало) сильно влияет на поведение пар ПЧД
- Учет гиперболических пролетов не очень влияет на результат (0.77% от всех слияний)
- Для $f_{\text{РВН}} = 10^{-3}$, частота слияний примерно соответствует ~100 событий на куб. Гпк в год на красном смещении $z = 3$, что соответствует оценкам других исследователей
- Требуется разработка более детальных численных моделей (напр., “обычная” ТМ в качестве N-Body частиц)

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Путем проведения численных экспериментов образования гало темной материи показано, что касп в гало возникает из областей начального распределения материи, имеющих энтропию на порядок ниже, чем в среднем по Вселенной для случайно выбранной сферы с массой каспа.
2. Построена модель ИК-фона далеких галактик, учитывающая крупномасштабную структуру Вселенной и усиление потоков за счет гравитационного линзирования на галактиках и скоплениях галактик. Модель воспроизводит двумерный спектр мощности карт ИК-фона, измеренный космической обсерваторией Herschel.
3. С использованием серии космологических численных моделей N-тел, которые включали как частицы обычной темной материи, так и переменную долю частиц темной материи (f_{PBH}), состоящей из первичных черных дыр (ПЧД), в диапазоне от $f_{PBH} = 10^{-4}$ до $f_{PBH} = 1$ получены оценки темпов формирования, разрушения и слияния пар ПЧД. Показано, что эти оценки хорошо согласуются с ограничениями на содержание ПЧД, полученными другими исследовательскими группами на основе данных LIGO, и соответствуют скорости слияния приблизительно $10^2 \text{ Гпк}^{-3} \cdot \text{год}^{-1}$ для доли ПЧД $f_{PBH} = 10^{-3}$.
4. Обнаружено, что стабильность пар ПЧД, являясь основным фактором, определяющим скорость слияния пар, в значительной степени зависит от процессов образования гало темной материи и кластеризации. Показано, что в гравитационно-связанных объектах пары ПЧД разрушаются быстрее, чем происходит их слияние. Количество гравитационно-связанных образований из ПЧД сильно зависит от доли ПЧД в составе темной материи.

Научная новизна и практическая значимость:

1. Был разработан оригинальный способ оценки «фоновой» энтропии и оценено ее влияние на формирование внутренней структуры гало ТМ. Впервые было показано, что касп в гало возникает из областей начального распределения материи, имеющих энтропию на порядок ниже, чем в среднем по Вселенной (внутри случайно выбранной сферы с массой каспа)
2. Впервые при построении полуаналитической модели ИК-фона неба, были учтены данные космологического расчета крупномасштабной структуры Вселенной, а также получены модельные карты ИК-фона, к которым можно применять различные алгоритмы поиска источников. Данная модель может быть использована для определения предела путаницы для будущих космических телескопов дальнего ИК-диапазона 10-метрового класса, а также для сравнения кластеризации пиков интенсивности фона с реальной крупномасштабной структурой.
3. Впервые получены оценки темпов формирования, слияния и разрушения пар ПЧД, учитывающие взаимодействие с другими ПЧД и образовавшимися из них структурами. Также впервые было показано, что основным фактором, ответственным за процессы формирования, разрушения и слияния пар ПЧД, является возникновение гравитационно-связанных структур при красных смещениях, примерно соответствующих эпохе равномерного распределения излучения и вещества. В свою очередь, оценки влияния численных эффектов могут оказаться полезными для будущих исследований выполненных данным методом.

Публикации:

1. Ткачев М.В., Пилипенко С.В., Карлеси Э. “Моделирование гало темной материи: проверка энтропийного подхода к проблеме каспов”, **“Астрономический журнал”**, т. 96, №5, стр 374-379, 2019
2. С. В. Пилипенко, М. В. Ткачев, А. А. Ермаш, Т. И. Ларченкова, Е. В. Михеева, В. Н. Лукаш “Модель инфракрасного фона неба, созданного далекими галактиками”, **“Письма в Астрономический Журнал”**, т. 43, №10, стр.715-726, 2017
3. Tkachev M. V., Pilipenko S. V., Yepes G. "Dark matter simulations with primordial black holes in the early Universe", **“Monthly Notices of the Royal Astronomical Society”** т. 499, № 4. Стр. 4854—4862, 2020

Конференции:

1. XXXII конференция “Актуальные проблемы внегалактической астрономии” (20.04.2015, г. **Пушино**, ПРАО АКЦ ФИАН). Тема: “Эволюция массы и других характеристик гало темной материи.” (М.В. Ткачев, С.В. Пилипенко). Стендовый доклад.
2. Семинаре отдела теоретической астрофизики АКЦ ФИАН (22.10.2015, г. **Москва**, АКЦ ФИАН). Тема: “Методы моделирования гало темной материи” (М.В. Ткачев, С.В. Пилипенко). Устный доклад.
3. XXXIII конференции “Актуальные проблемы внегалактической астрономии” (21.04.2016, г. **Пушино**, ПРАО АКЦ ФИАН). Тема: “Моделирование гало темной материи: вариации начальных условий” (М.В. Ткачев, С.В. Пилипенко). Устный доклад.
4. Конференции “Cosmic Clues from the Near Field Universe” (05.06.2016, г. **Хайфа, Израиль**, университет “Технион”) Тема: “Variances of the small scale part of the perturbation spectrum” (М.Ткачев, S. Pilipenko). Устный доклад.
5. Конференции “Galaxy Clusters 2017” (03.07.2017, г. **Сантандер, Испания**). Тема: “Dark matter halo simulations: verifying entropy approach to the core-cusp problem” (М.Ткачев, S. Pilipenko). Устный доклад.
6. Конференции “Statistical Challenges in 21-st Century Cosmology” (22.05.2018, г. **Валенсия, Испания**). Тема: “Dark matter halo simulations: verifying entropy approach to the core-cusp problem” (М.Ткачев, S. Pilipenko).
7. XXXVI конференции “Актуальные проблемы внегалактической астрономии” (21.04.2019, г. **Пушино**, ПРАО АКЦ ФИАН). Тема: “Симуляции темной материи: первичные черные дыры в ранней Вселенной.” (М.В. Ткачев, С.В. Пилипенко). Устный доклад.
8. Семинаре отдела теоретической астрофизики АКЦ ФИАН (11.03.2021, г. **Москва**, АКЦ ФИАН). Тема: “Dark matter simulations: primordial black holes in the early Universe.” (М.В. Ткачев, С.В. Пилипенко). Устный доклад.

Ответы на отзывы оппонентов:

- Применение термодинамической логики к б-столкн. системам
- См. **D. Lynden-Bell (1966)** (Грубая фазовая плотность f – не возрастает для замк. из. системы)

- На линейной стадии развития возмущений $\mathcal{E}$ растет:

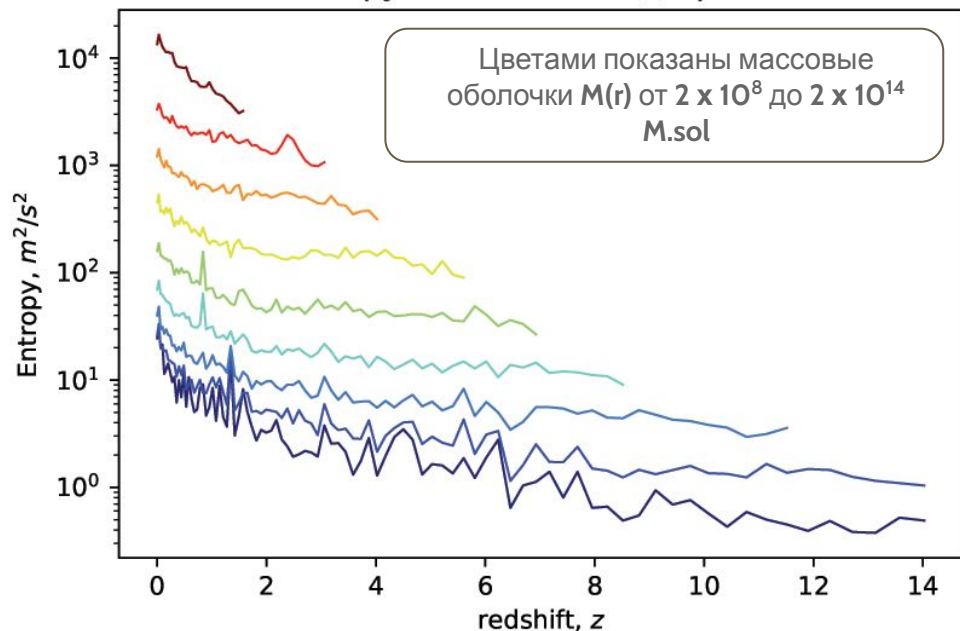
$$E = \sigma^2 \left(\frac{m}{\rho} \right)^{2/3} \begin{cases} \sigma \sim a \\ \rho \sim \frac{1}{a^3} \end{cases}$$

Одно из свойств настоящей энтропии:

Теорема Пригожина (1947):

- В стационарном состоянии производство энтропии внутри неравновесной термодинамической системы при неизменных внешних параметрах является минимальным и постоянным.

Entropy: evolution of M(r) spheres

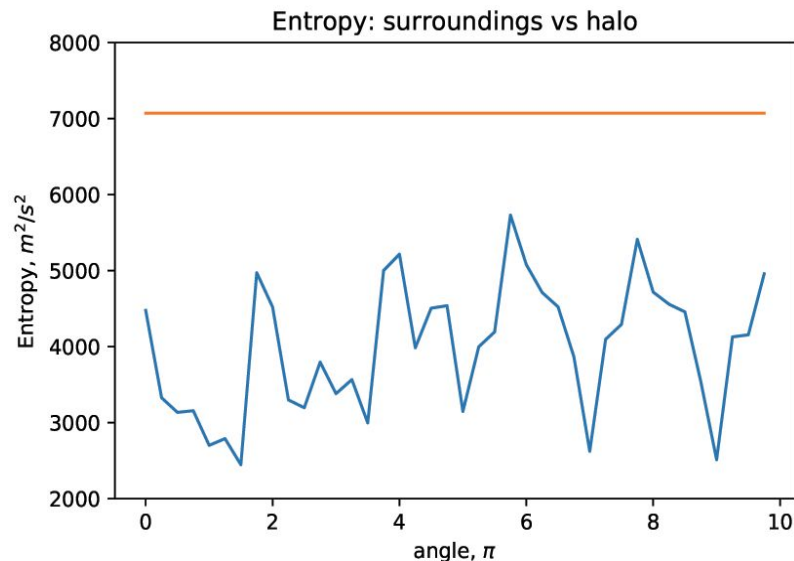
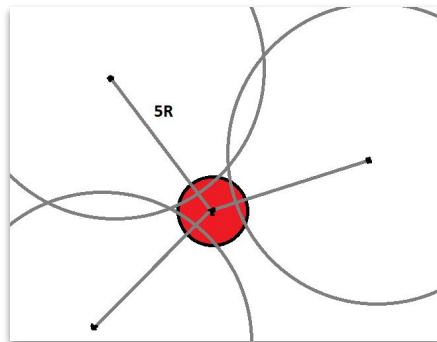


Ответы на отзывы оппонентов

- Сформировавшееся стац. гало соответствует максимуму. Э:

- Про аксионы и WIMP-ы: аналогия только в том, что и те и другие – кандидаты в не-барионную CDM

- О физическом механизме образования пар ПЧД – см. например, Sasaki, PRL 2016



- Мотивация применения «энтропийного» подхода к описанию формирования гало скрытой массы:
 - Симуляции высокого разрешения способны вносить добавочную фоновую энтропию и, таким образом, решить проблему каспов (см. Дорошкевич, Лукаш, Михеева; УФН 2012)

- Не учитываются какие-либо динамические эффекты скрытой массы в образовании, разрушении и слиянии ПЧД:
 - См. нашу свежую работу: [arXiv 2205.10792](https://arxiv.org/abs/2205.10792)

Ответы на отзыв вед. организации:

- Расчеты фоновой энтропии (серым), имеют знач. больший разброс по сравнению с расч. для модели Местной группы (черным)
- Это ошибки кросс-идентификации гало малых масс, а модель MareNostrum имеет гораздо более высокое разрешение
- Размеры основания конуса:
- На самом деле это не конус а пирамида с квадратным основанием

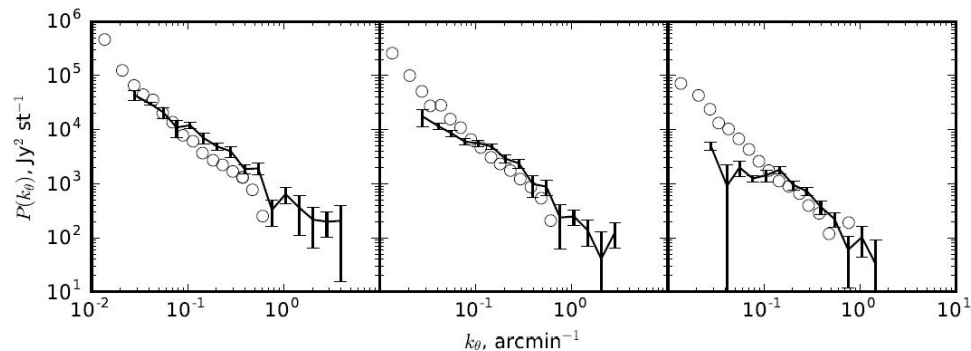
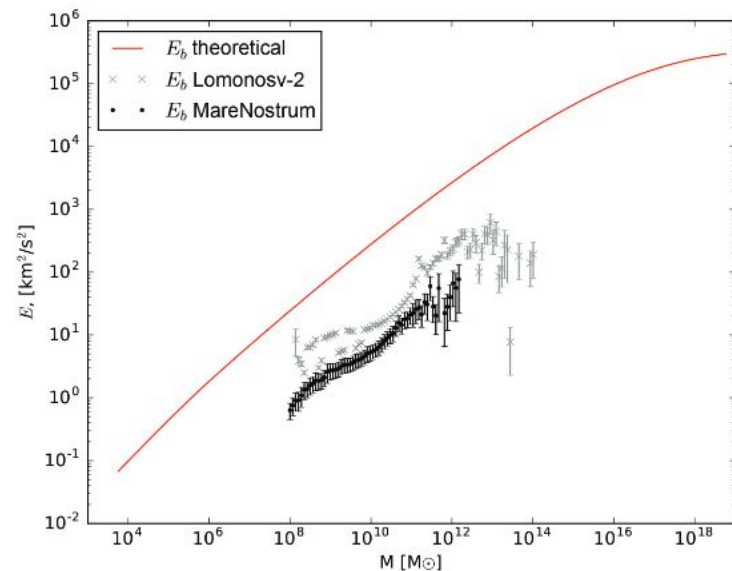


Рисунок 2.4 — Спектр мощности пространственной анизотропии ИК-фона неба на длинах волн 250, 350 и 500 мкм (слева направо). Круги – результаты работы [139] (ошибки не показаны), сплошная линия – данная работа.



- Рисунок про спектр анизотропии фона. Согласие между моделью и наблюдениями для больших длин волн:
- может быть много причин: например, слишком малый размер куба (т.е. плохая статистика, нужен ~1 ГПк), или ошибки в наблюдениях?

Спасибо за внимание!