

«Проблемы современной астрофизики
и геофизики»
МФТИ

КОСМОЛОГИЯ

Лекция 3

Сергей Пилипенко

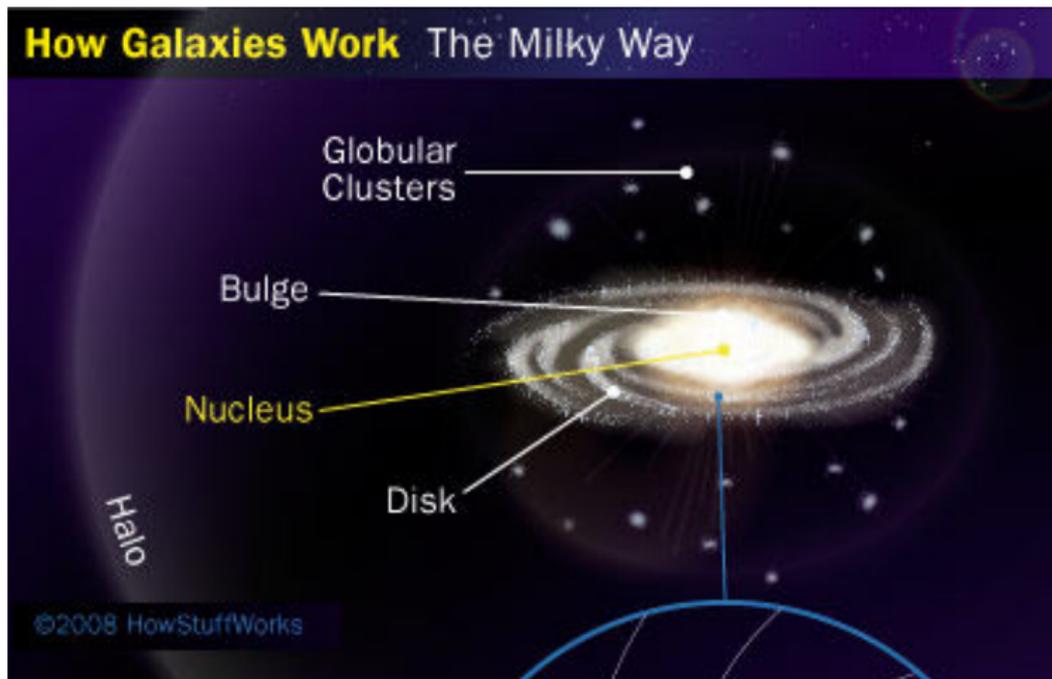
АКЦ ФИАН

Лекция 3: Эволюция галактик

1. Состав галактик
2. Разнообразие галактик
3. Гало темной материи
4. Бесстолкновительная релаксация
5. Численное моделирование Вселенной
6. Проблемы космологии

Состав галактик

Космология



Состав галактик

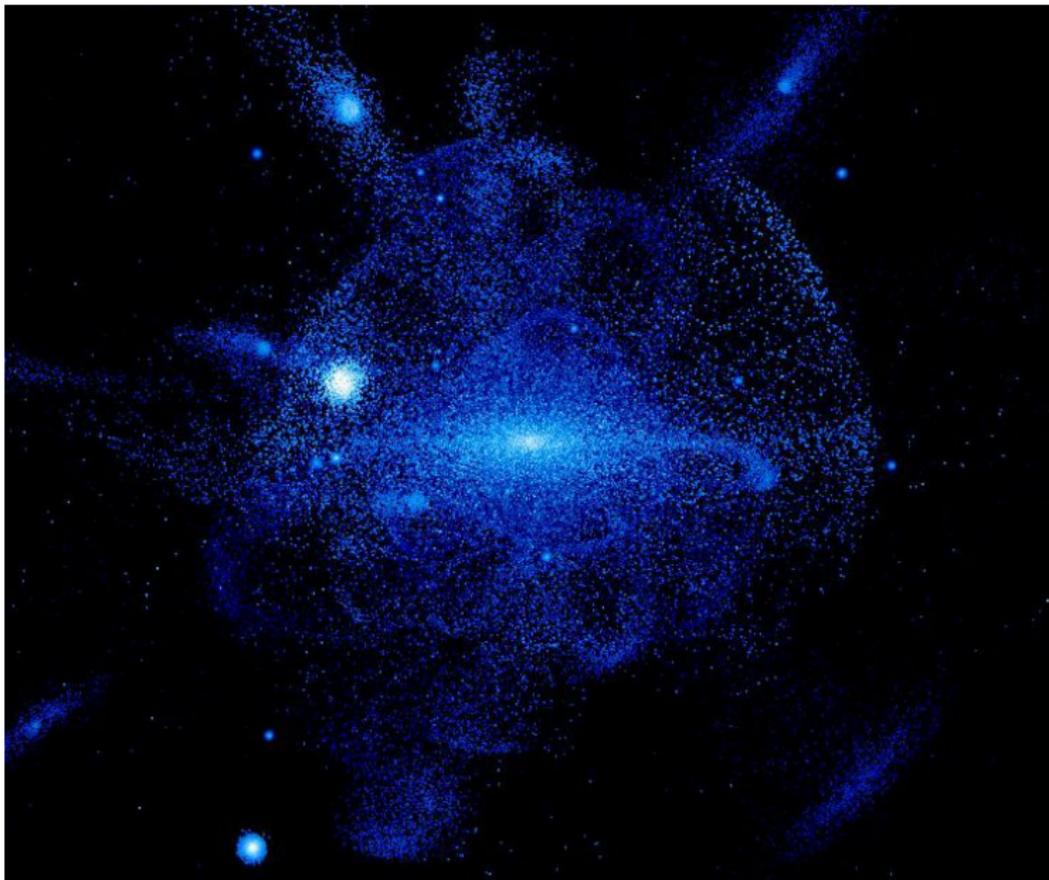
Разнообразие галактик

Гало ТМ

Релаксация

Численное моделирование

Проблемы космологии



Звездное гало (модель). Image by Johnston & Bullock.

Космология

Состав
галактик

Разнообразие
галактик

Гало ТМ

Релаксация

Численное
моделиро-
вание

Проблемы
космологии

Звездное гало

- ▶ Малая доля всех звезд ($< 1\%$).
- ▶ В основном старые звезды.



Балдж, диск со спиральными рукавами,
шаровые скопления.

Шаровые скопления

- ▶ $10^3 - 10^6$ звезд.
- ▶ Высокая плотность.
- ▶ Старые звезды.
- ▶ Поддерживаются самогравитацией.
- ▶ Сотни скоплений в Галактике.



Шаровое скопление M13 в Геркулесе.

Космология

Состав
галактик

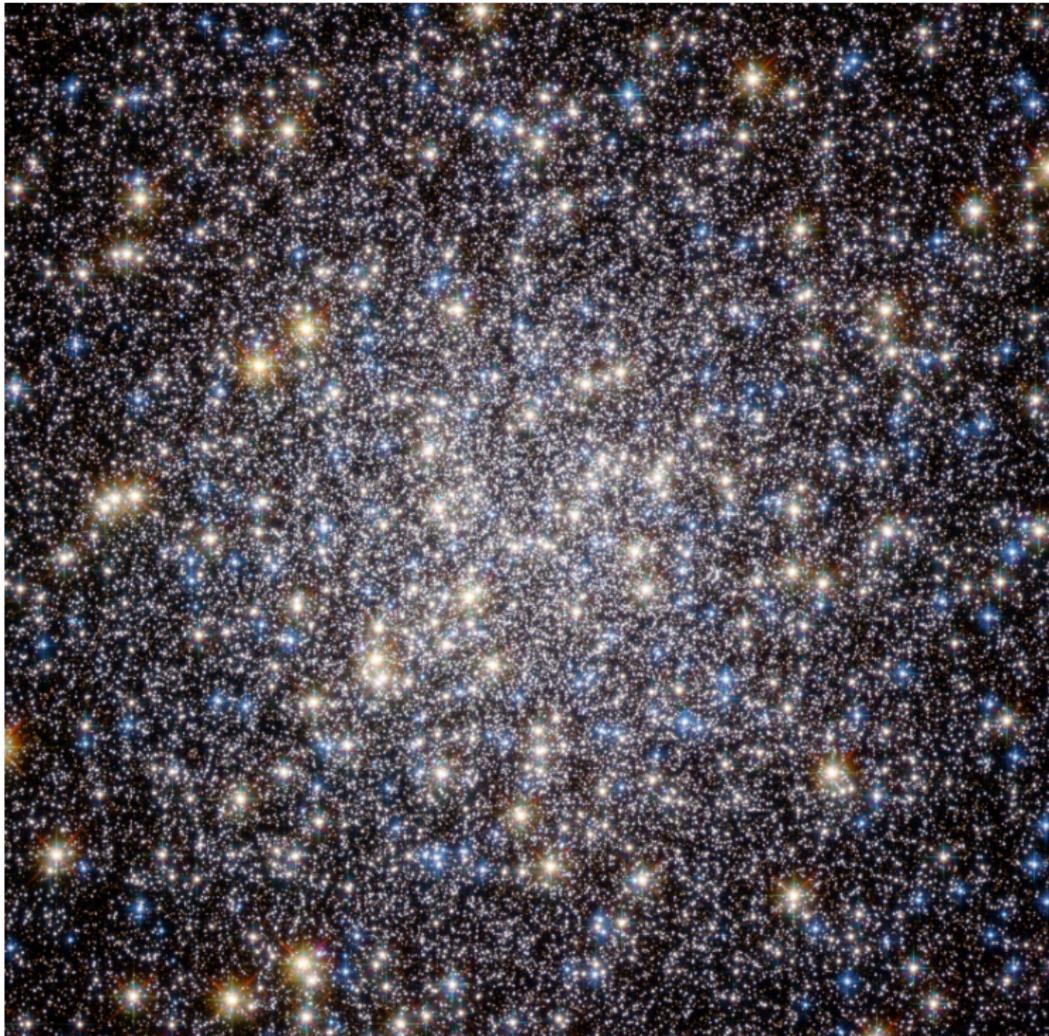
Разнообразие
галактик

Гало ТМ

Релаксация

Численное
моделиро-
вание

Проблемы
космологии



Космология

Состав
галактик

Разнообразие
галактик

Гало ТМ

Релаксация

Численное
моделиро-
вание

Проблемы
космологии



Диск. Спиральная структура.

Состав
галактик

Разнообразие
галактик

Гало ТМ

Релаксация

Численное
моделиро-
вание

Проблемы
космологии

Диски

- ▶ Звезды и газ.
- ▶ Газ: горячий и холодный (+пыль).
- ▶ Спиральные рукава.
- ▶ Ударные волны.
- ▶ Магнитные поля 10^{-5} Гс.



Туманность в Орле «Столпы творения».

Космология

Состав
галактик

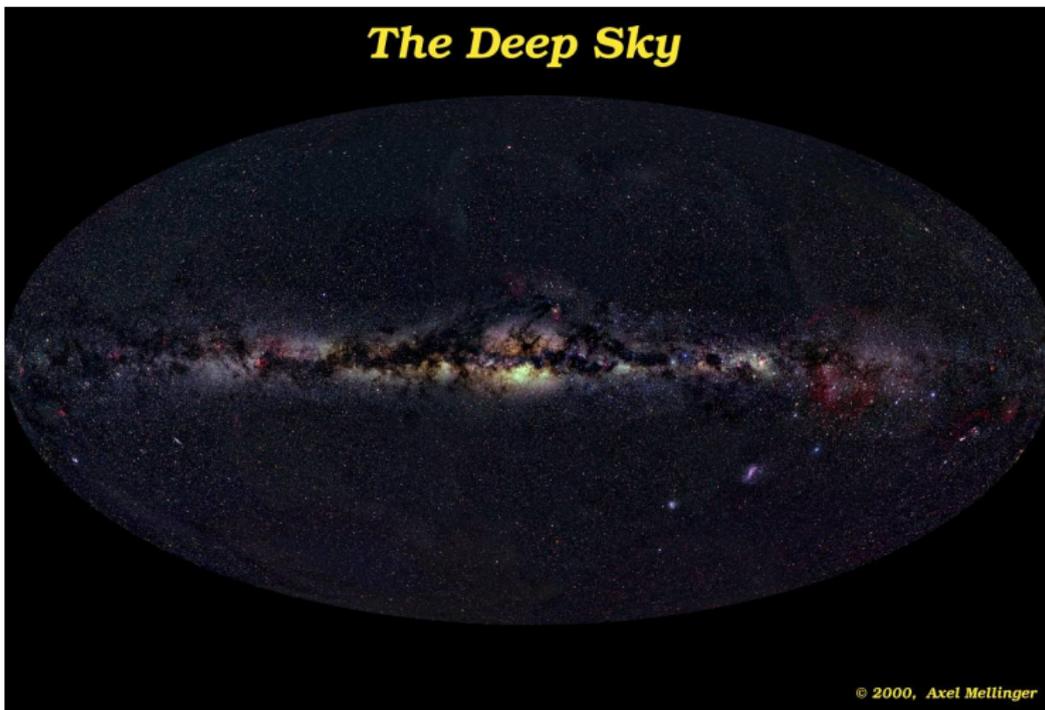
Разнообразие
галактик

Гало ТМ

Релаксация

Численное
моделиро-
вание

Проблемы
космологии



Проекция нашей Галактики.

Состав
галактик

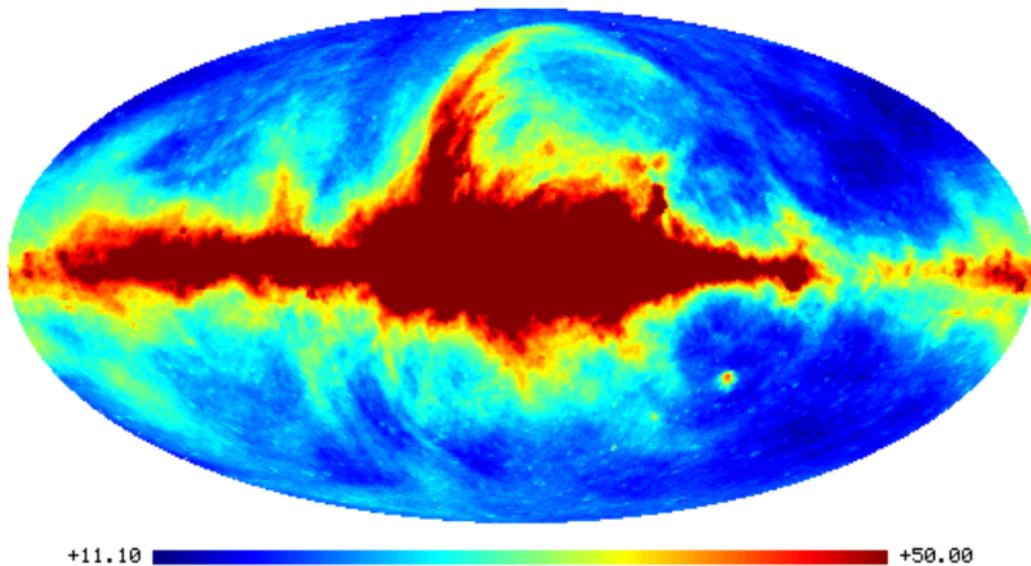
Разнообразие
галактик

Гало ТМ

Релаксация

Численное
моделиро-
вание

Проблемы
космологии



Синхротронное излучение.

В магнитном поле 10^{-5} Гс частицы с $E < 10^{15}$ эВ не покидают Галактику.

Состав
галактик

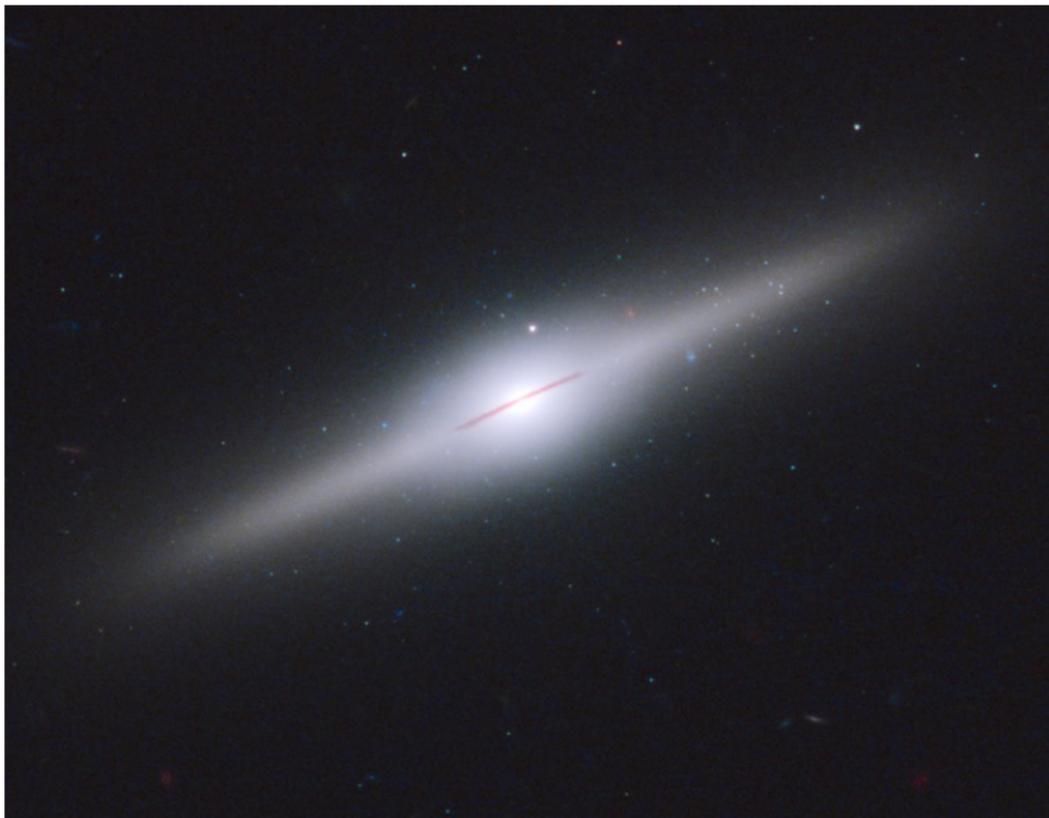
Разнообразие
галактик

Гало ТМ

Релаксация

Численное
моделиро-
вание

Проблемы
космологии



Галактика с балджем.

Космология

Состав
галактик

Разнообразие
галактик

Гало ТМ

Релаксация

Численное
моделиро-
вание

Проблемы
космологии



Черная дыра (модель).

Космология

Состав
галактик

Разнообразие
галактик

Гало ТМ

Релаксация

Численное
моделиро-
вание

Проблемы
космологии

Параметры Галактики

- ▶ Число звезд $\sim 10^{11}$.
- ▶ Полная масса $\sim 10^{12} M_{\odot}$.
- ▶ Характерная плотность $10^6 \rho_c$.
- ▶ Среднее расстояние между звездами около Солнца ~ 1 пк.
- ▶ Радиус диска 20 кпк.
- ▶ Радиус темного гало 100 кпк.
- ▶ Центральная ЧД $M = 10^6 M_{\odot}$, $R = 10^7$ км.

Масса Солнца $M_{\odot} = 2 \cdot 10^{33}$ г.

Состав
галактик

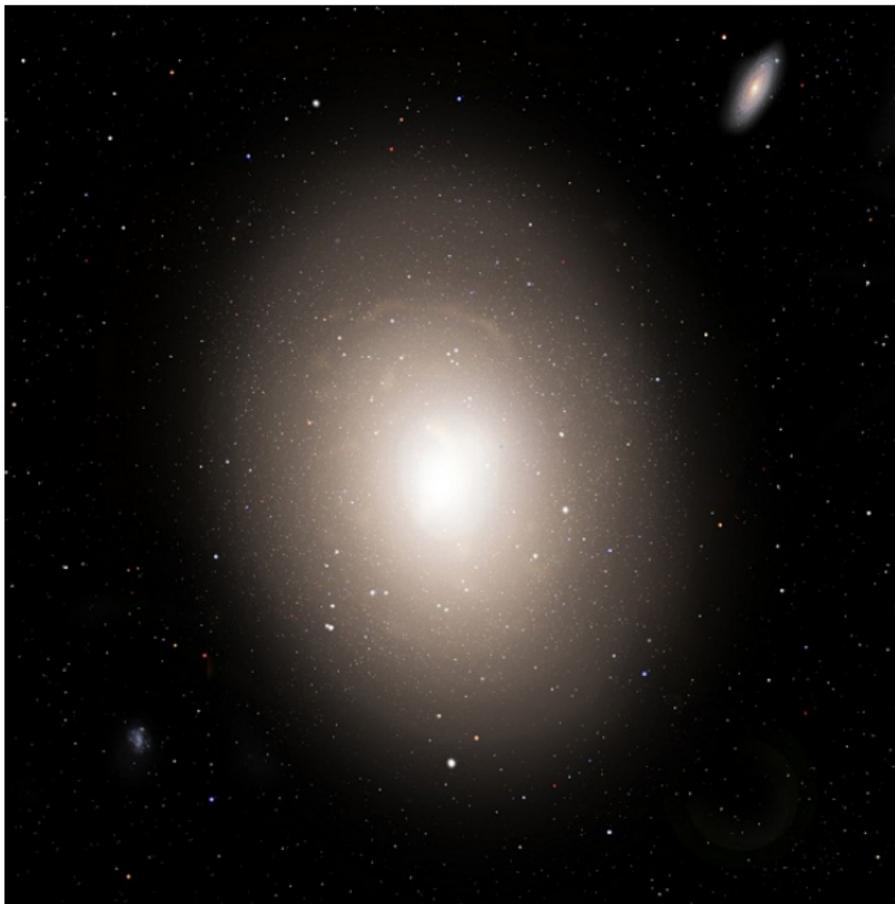
Разнообразие
галактик

Гало ТМ

Релаксация

Численное
моделиро-
вание

Проблемы
космологии



Эллиптическая галактика.

Космология

Состав
галактик

Разнообразие
галактик

Гало ТМ

Релаксация

Численное
моделиро-
вание

Проблемы
космологии



Неправильная галактика.

Космология

Состав
галактик

Разнообразие
галактик

Гало ТМ

Релаксация

Численное
моделиро-
вание

Проблемы
космологии



Слияние галактик.

Состав
галактик

Разнообразие
галактик

Гало ТМ

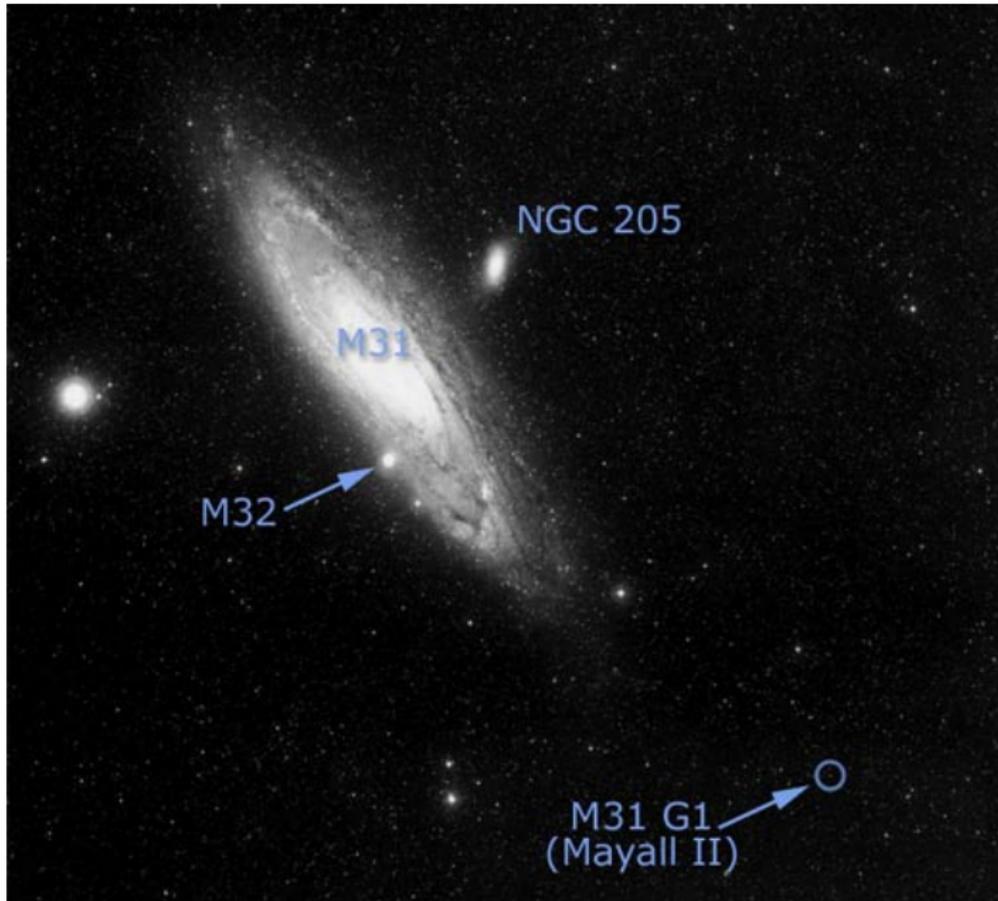
Релаксация

Численное
моделиро-
вание

Проблемы
космологии

Разнообразие галактик

- ▶ Массы $10^7 - 10^{13} M_{\odot}$.
- ▶ Дисковые – поддерживаются вращением.
- ▶ Эллиптические – поддерживаются дисперсией скоростей. Содержат меньше холодного газа и молодых звезд.



Спутники галактик.

Космология

Состав
галактик

Разнообразие
галактик

Гало ТМ

Релаксация

Численное
моделиро-
вание

Проблемы
космологии

Вращение галактик

Космологические возмущения: $V_{rot} \rightarrow 0$.

Вращение вызывают:

- ▶ Приливное взаимодействие протогалактик.
- ▶ Слияния с прицельным параметром $b \neq 0$.

Следствие: ориентация моментов относительно крупномасштабной структуры.

Спиральная структура

Поверхностная плотность:

$$\Sigma(r, \phi) = \Sigma_0(r) + \Sigma_1(r) \cos[m\phi + a \ln(r)]$$



1. Долгоживущие бегущие волны.
2. Бар.
3. Растущая мода.

Космология

Состав
галактик

Разнообразие
галактик

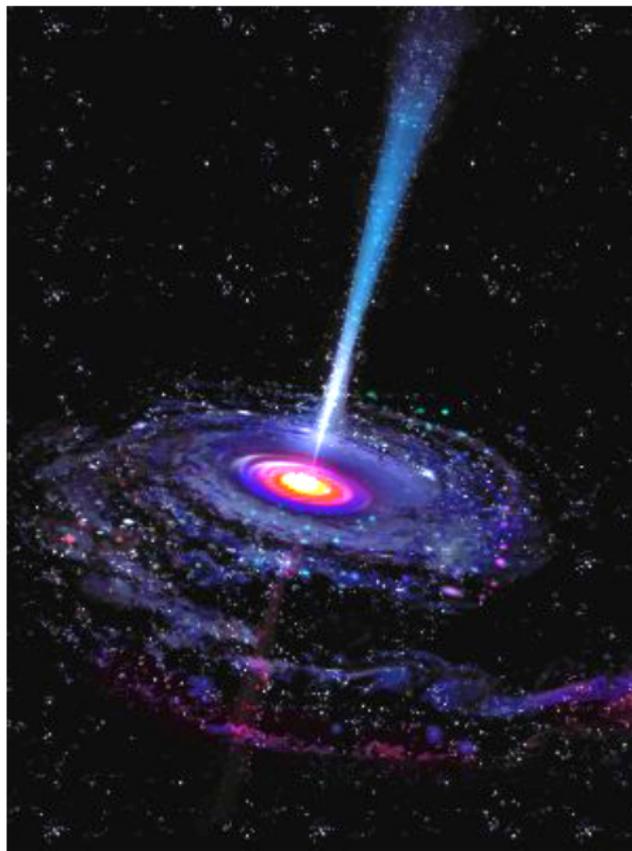
Гало ТМ

Релаксация

Численное
моделиро-
вание

Проблемы
космологии

Квезары



Космология

Состав
галактик

Разнообразие
галактик

Гало ТМ

Релаксация

Численное
моделиро-
вание

Проблемы
космологии

Квazarы

- ▶ Точечные, «квазизвездные» объекты с $z > 1$.
- ▶ Светимость $10^{11} - 10^{13}$ солнечных.
- ▶ Природа: аккреция на ЧД.
- ▶ Масса ЧД $10^8 - 10^{10} M_{\odot}$.
- ▶ Темп аккреции $10 - 10^3 M_{\odot}/\text{год}$.
- ▶ Джеты – мощные выбросы вещества.

«Активные галактические ядра» – меньше светимость, ближе.



Космология

Состав
галактик

Разнообразие
галактик

Гало ТМ

Релаксация

Численное
моделиро-
вание

Проблемы
космологии

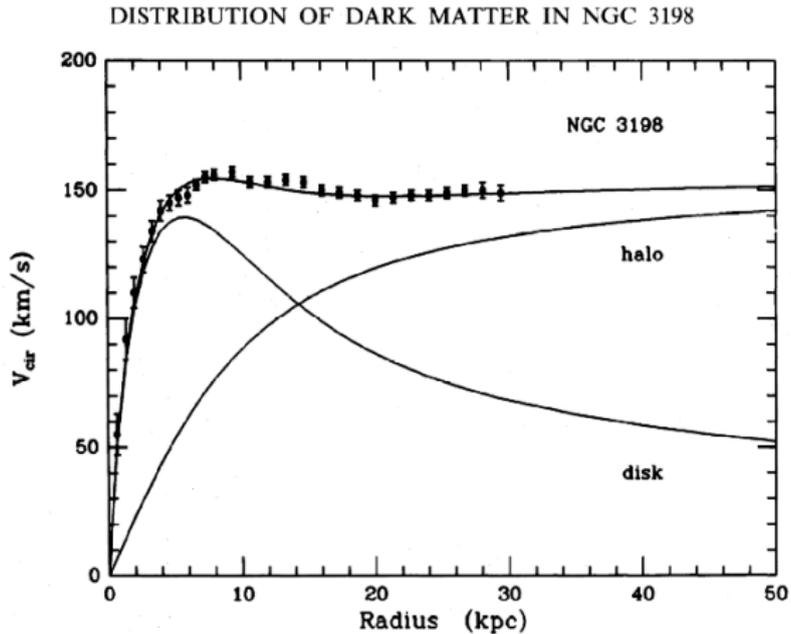
Скопления галактик

- ▶ Массы $10^{14} - 10^{15} M_{\odot}$.
- ▶ 10^4 галактик.
- ▶ В центре – огромная эллиптическая галактика.
- ▶ $\frac{GMm}{R} \sim \text{кэВ}$ – рентгеновский газ.
- ▶ Гравитационное линзирование.

Эволюция галактик

- ▶ $z \sim 15 - 20$ – первичные звезды из H и He.
- ▶ $z \sim 6 - 10$ – звезды и черные дыры ионизуют Вселенную.
- ▶ $z \sim 2 - 4$ – максимум активности квазаров, максимум частоты слияний.
- ▶ $z < 1$ – образуются скопления галактик.

Гало ТМ



Состав
галактик

Разнообразие
галактик

Гало ТМ

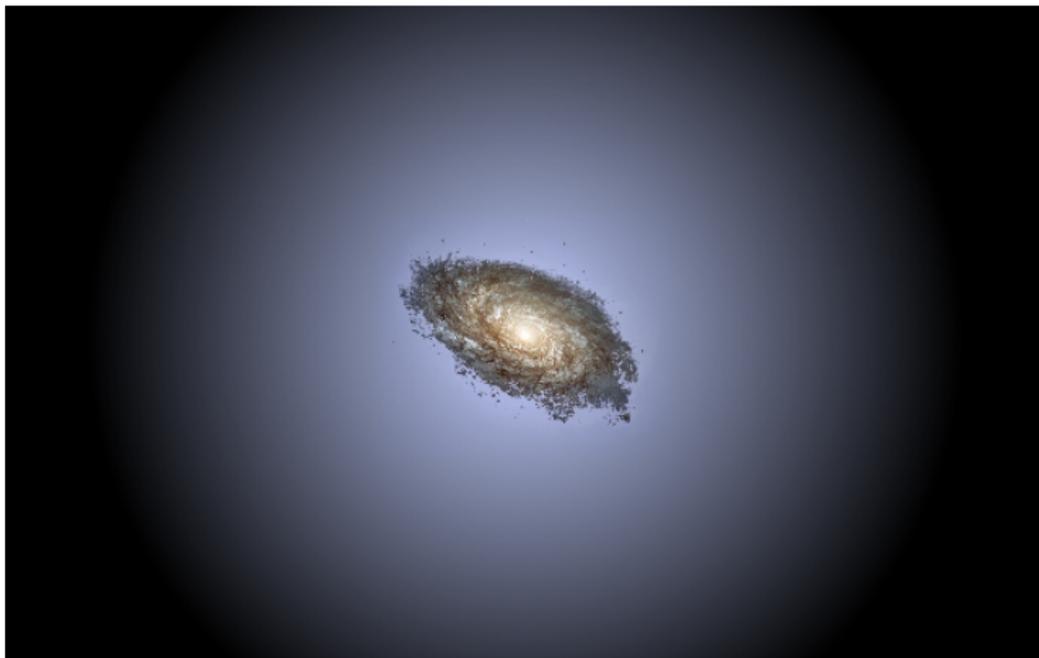
Релаксация

Численное
моделиро-
вание

Проблемы
космологии

Кривая вращения. $V = \sqrt{\frac{GM}{R}}$

Гало ТМ



Впечатления художника

Космология

Состав
галактик

Разнообразие
галактик

Гало ТМ

Релаксация

Численное
моделиро-
вание

Проблемы
космологии

Гало ТМ



Реальность (Aquarius Simulation, V.Springel)

Космология

Состав
галактик

Разнообразие
галактик

Гало ТМ

Релаксация

Численное
моделиро-
вание

Проблемы
космологии

Профиль плотности

$$\rho_{NFW} = \frac{\rho_s}{\frac{r}{r_s} \left(1 + \frac{r}{r_s}\right)^2}$$

ρ_s , r_s – параметры.

NFW=Navarro, Frenk, White.

Космология

Состав
галактик

Разнообразие
галактик

Гало ТМ

Релаксация

Численное
моделиро-
вание

Проблемы
космологии

Профиль плотности

В скоплениях галактик профиль можно восстановить по распределению температуры газа или грав. линзированию.

При этом легко разделить ТМ и барионы.

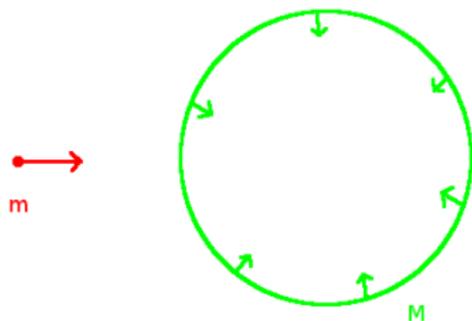
Релаксация

– переход в энергетически более выгодное состояние.

Барионная материя: излучение.

Темная материя: «бурная релаксация».

Бурная релаксация



Взаимодействие частицы и оболочки.
Частица приобретает энергию:

$$\Delta E = GMm \left(\frac{1}{R_{in}} - \frac{1}{R_{out}} \right),$$

где R_{in} , R_{out} – радиусы оболочки при входе и выходе частицы.

Характерные времена

Динамическое время (бурная релаксация):

$$t_d = \sqrt{G\rho}.$$

Время полной релаксации:

$$t_R \sim Nt_d.$$

Для шарового скопления $t_R < t_H$, для гало $t_R \gg \gg t_H$.

Состав галактик

Разнообразие галактик

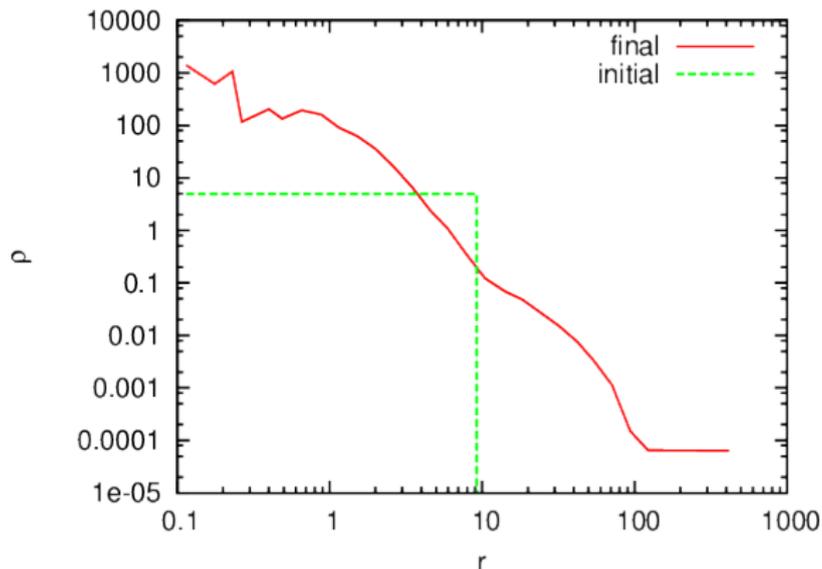
Гало ТМ

Релаксация

Численное моделирование

Проблемы космологии

Моделирование



Моделирование N-body. Сжатие облака из 2000 частиц.

Космология

Состав галактик

Разнообразие галактик

Гало ТМ

Релаксация

Численное моделирование

Проблемы космологии

Вывод

При сжатии хаотически распределенного темного вещества образуется гравитационно-связанный сгусток – гало, который существует значительное время.

Космология

Состав
галактик

Разнообразие
галактик

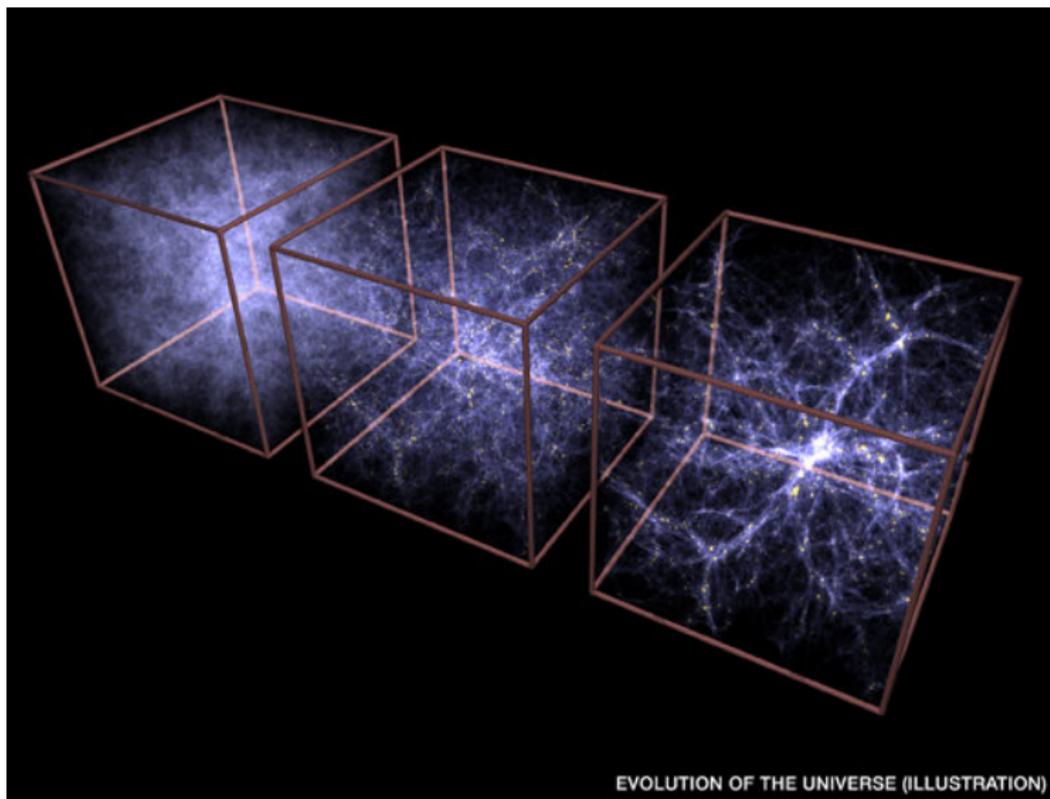
Гало ТМ

Релаксация

Численное
моделиро-
вание

Проблемы
космологии

Численное моделирование



Космология

Состав
галактик

Разнообразие
галактик

Гало ТМ

Релаксация

**Численное
моделиро-
вание**

Проблемы
космологии

Численное моделирование

Вселенную из ТМ легко моделировать:

- ▶ Начальные условия – космологический спектр мощности.
- ▶ Граничные условия – периодические.
- ▶ Уравнения: законы Ньютона.
- ▶ Сглаженный потенциал.
- ▶ Приближенное решение N-body.

Численное моделирование

Можно ли моделировать **непрерывную** среду частицами с массой $10^3 - 10^{10} M_{\odot}$?

Да, если сгладить потенциал на масштабе $s < \langle \ell \rangle$:

$$\frac{1}{r} \rightarrow \frac{1}{r + s}$$

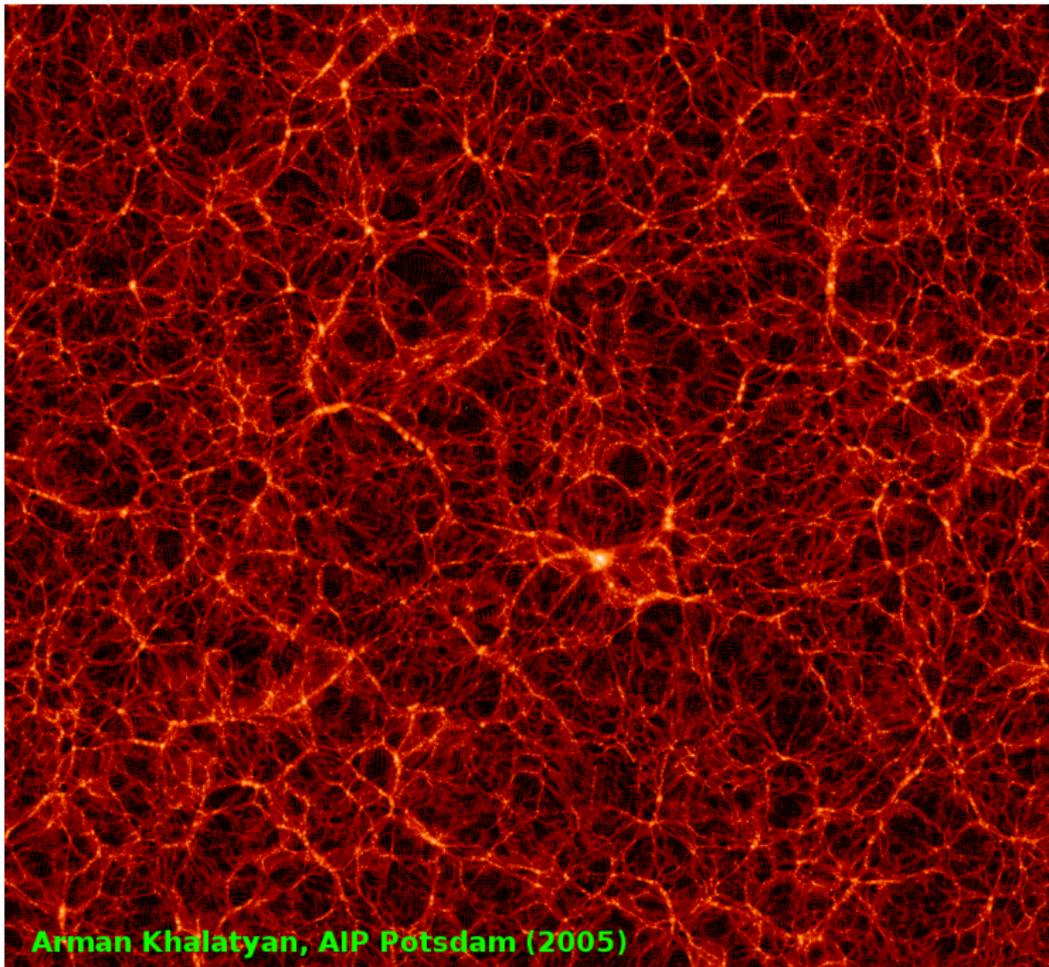
Приближение

Метод Particle-Mesh:

1. Из координат частиц получить $\rho(x, y, z)$.
2. Решить уравнение $\Delta\phi = 4\pi G\rho$ методом FFT.
3. Рассчитать силы, действующую на частицы.
4. Сдвинуть частицы.
5. GOTO 1

Возможности

- ▶ Сторона куба $1 - 10^3$ Мпк.
- ▶ Число частиц на ПК: до 10^7 .
- ▶ На суперкомпьютере: до 10^{10} .



Arman Khalatyan, AIP Potsdam (2005)

Космология

Состав
галактик

Разнообразие
галактик

Гало ТМ

Релаксация

Численное
моделиро-
вание

Проблемы
космологии

Результаты

- ▶ Иерархическое образование гало: сначала образуются малые, затем сливаются в большие.
- ▶ Функция масс скоплений галактик – тест космологической модели.
- ▶ Универсальный профиль Наварро-Френка-Уайта.

Проблемы космологии

- ▶ Природа ТМ и ТЭ.
- ▶ Космогенезис. Инфляция.
- ▶ Первые звезды.
- ▶ Первые ЧД.
- ▶ Объяснение разнообразия галактик.
- ▶ Профиль плотности гало, спутники галактик.