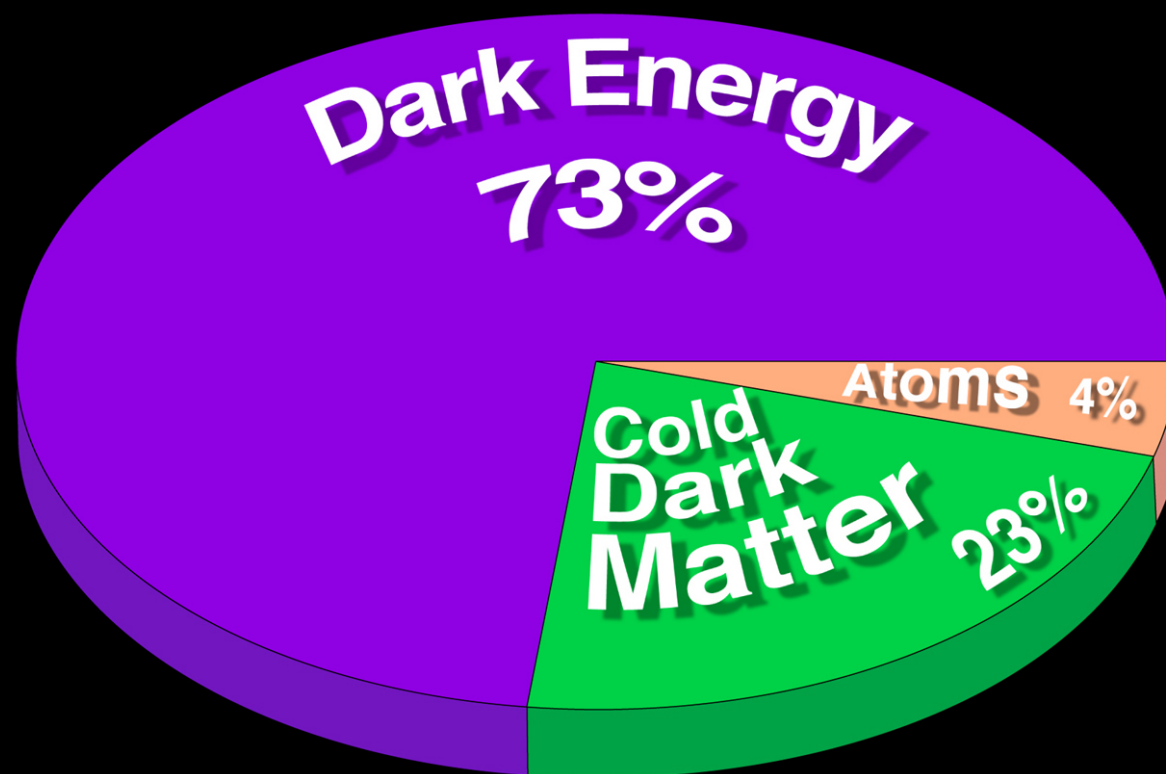


МФТИ - Астролицей

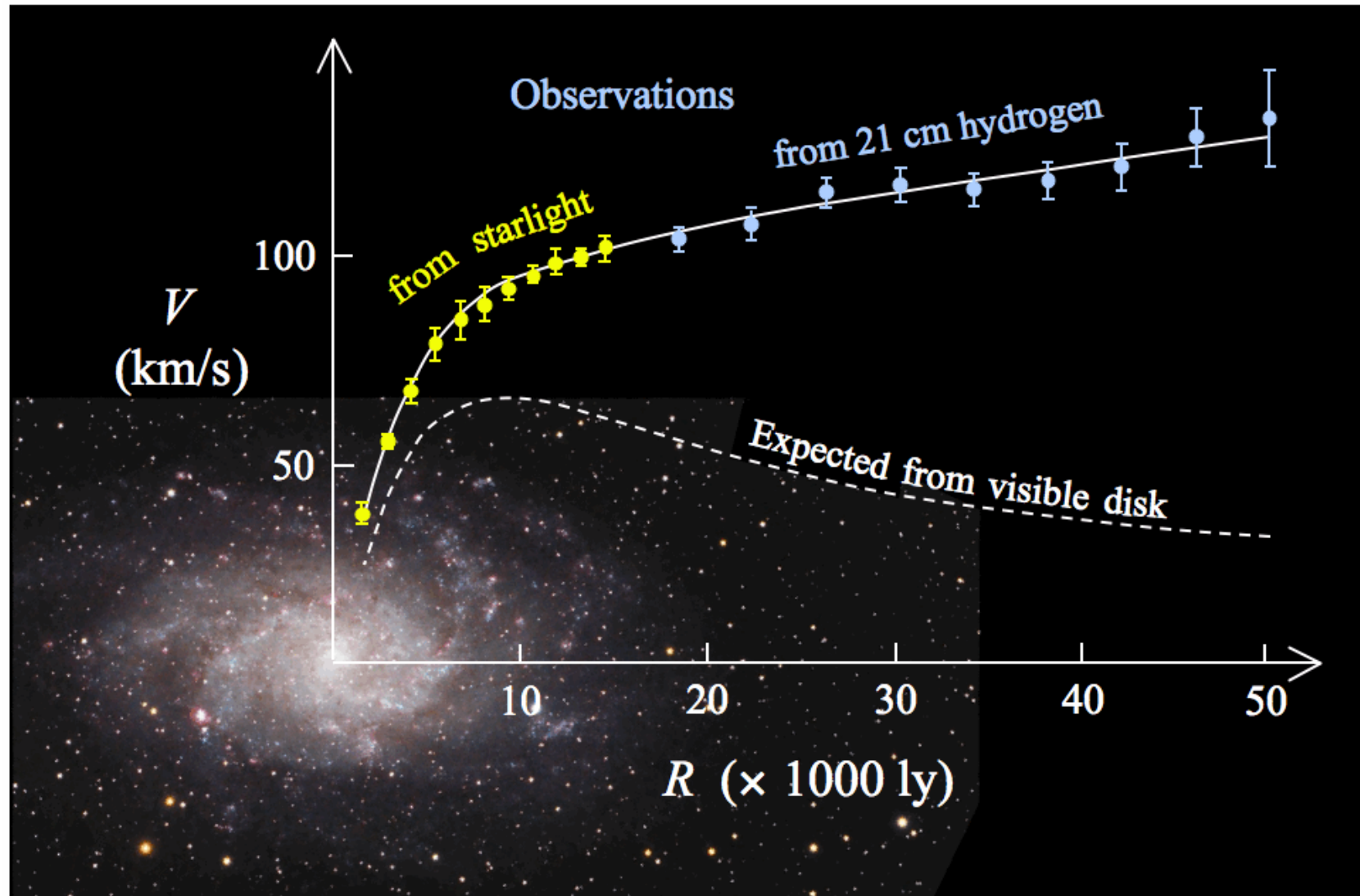
Крупномасштабная структура Вселенной и
темная материя

С.В. Пилипенко (АКЦ ФИАН)

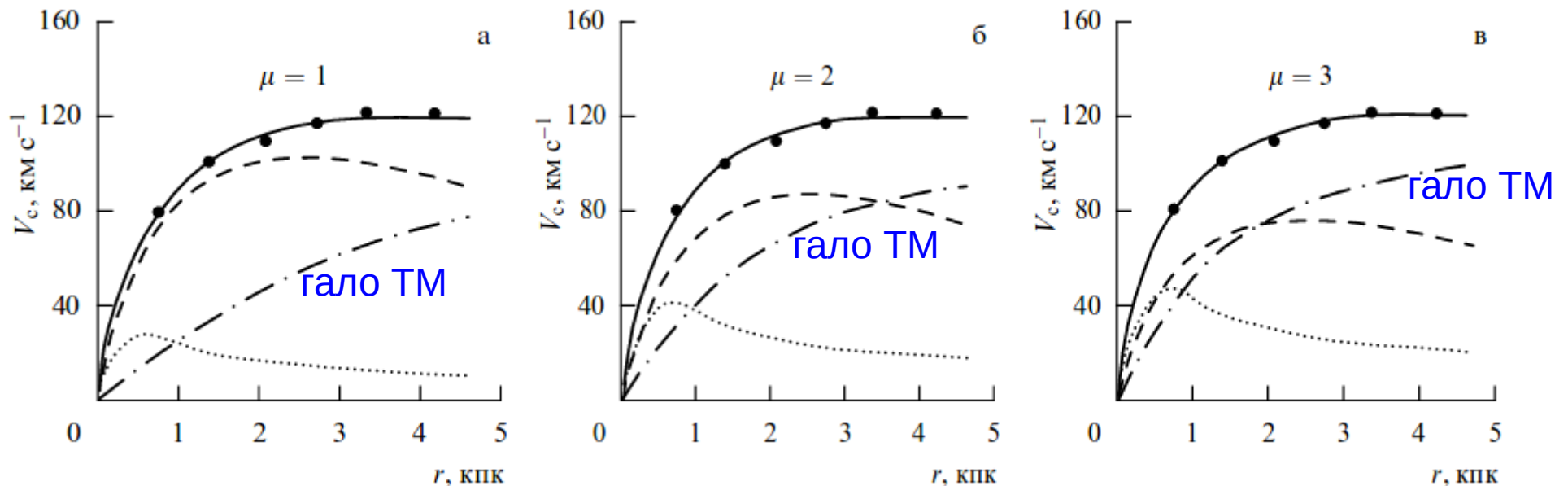
Состав Вселенной



Вращение галактик



Неоднозначность разделения компонент кривой вращения

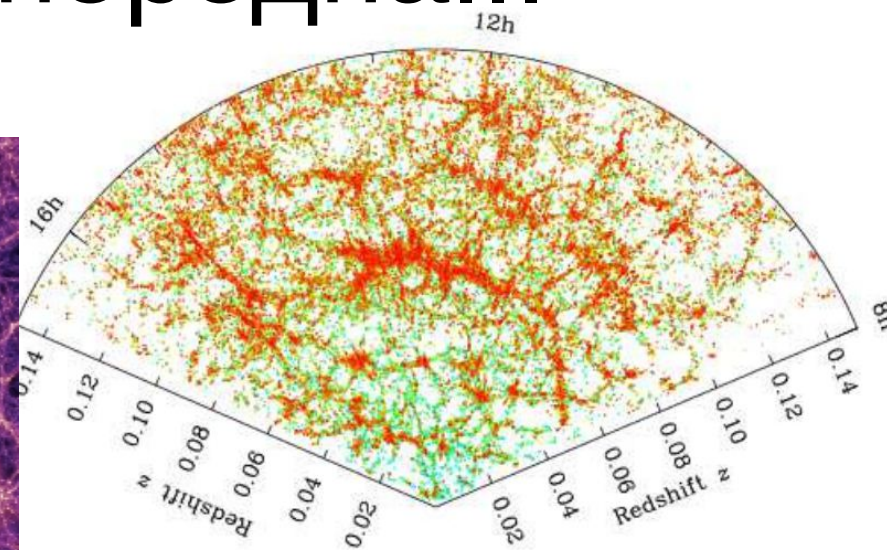
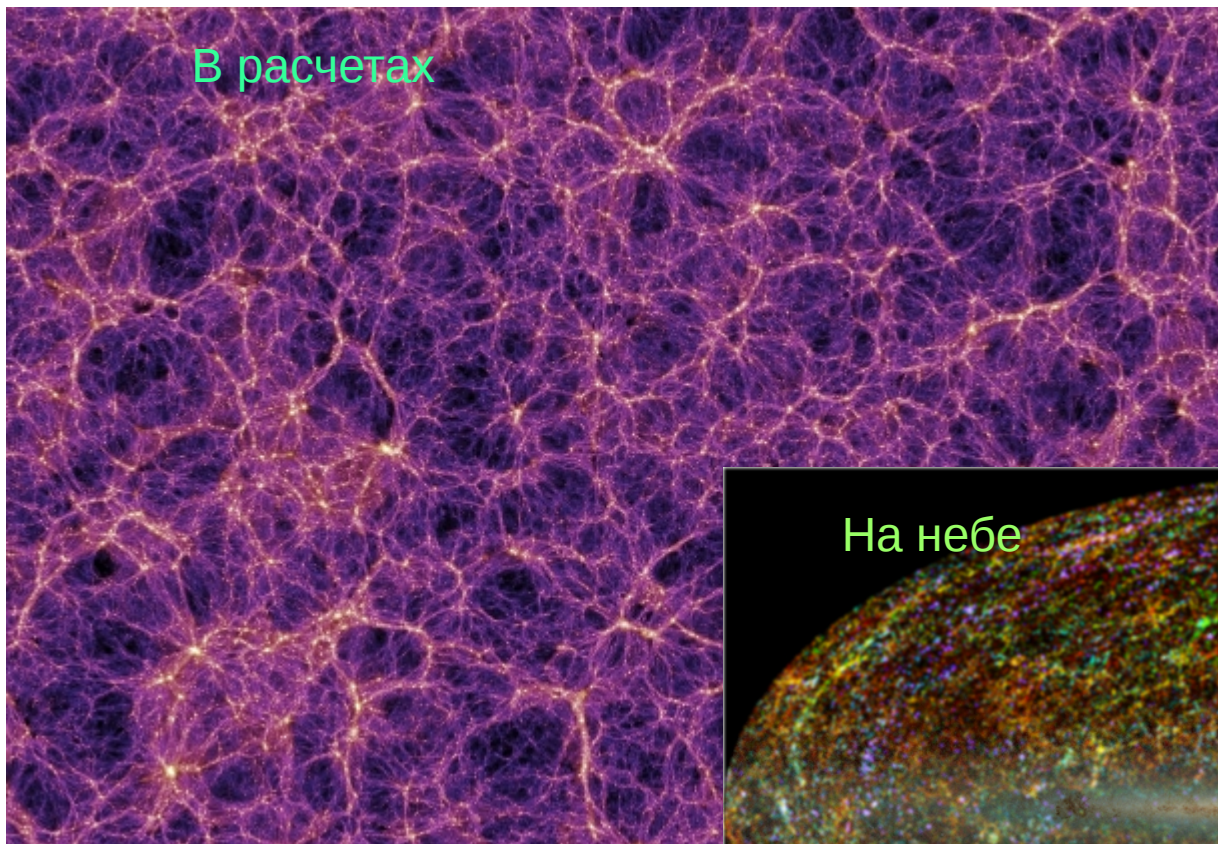


Засов и др. УФН 2017

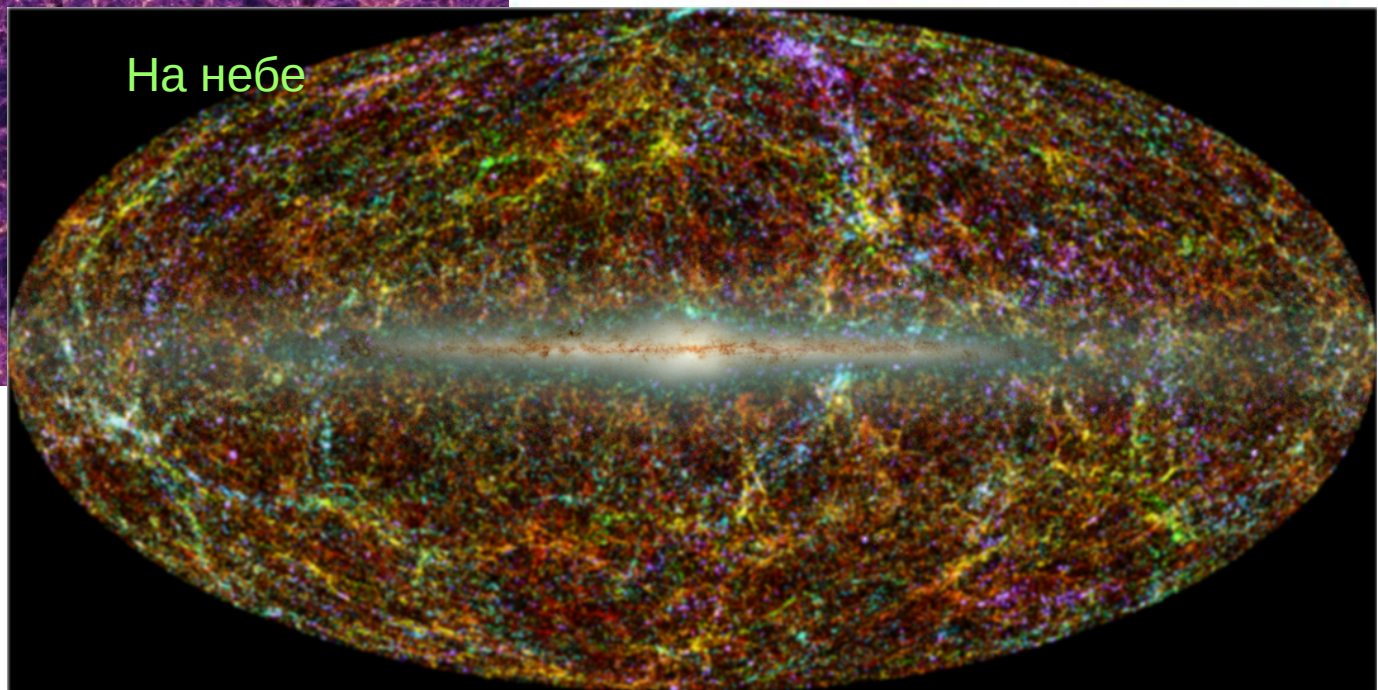
$$V = \sqrt{\frac{GM}{R}} \dots$$

Вселенная неоднородна...

В расчетах

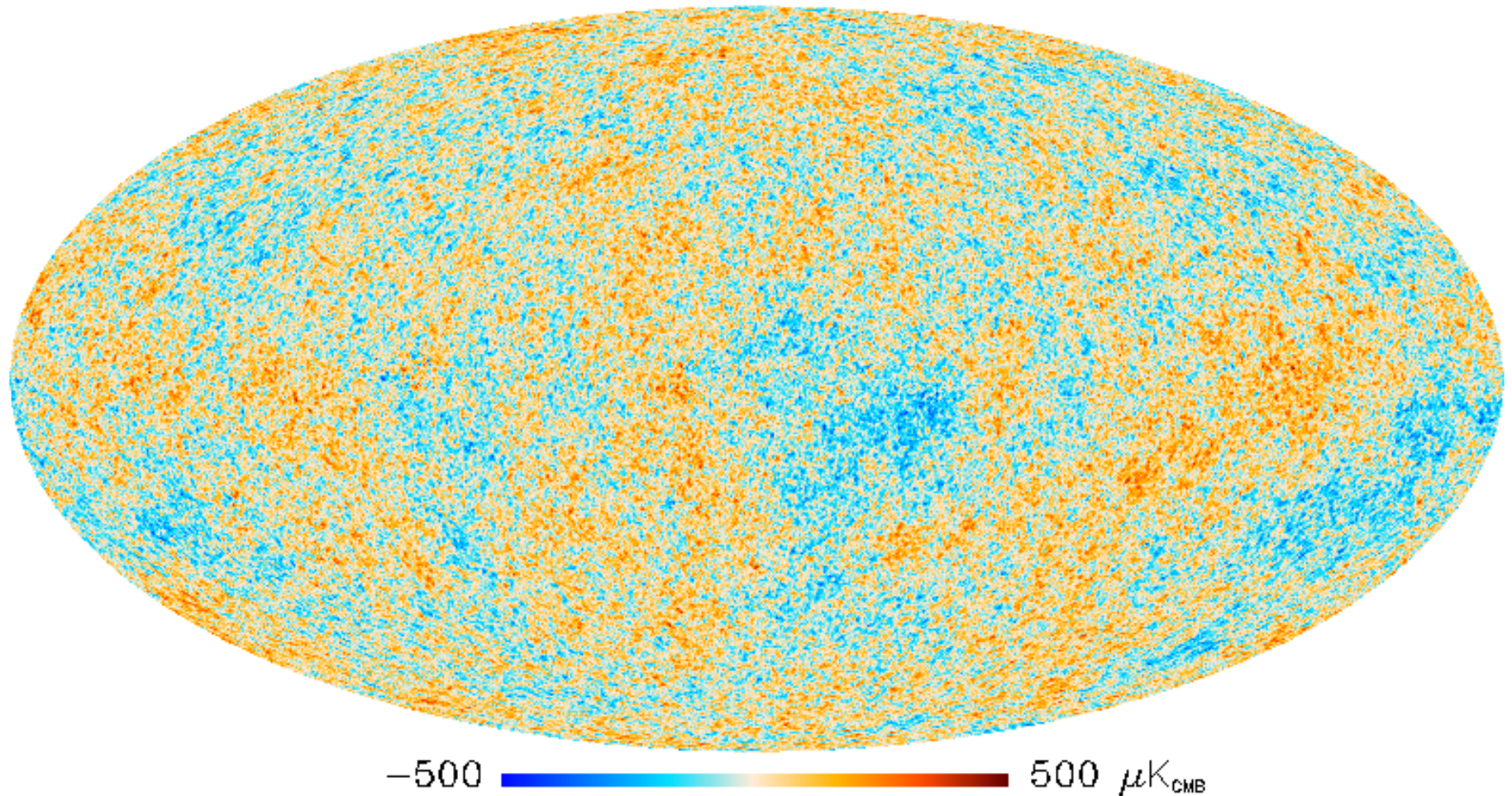


На небе



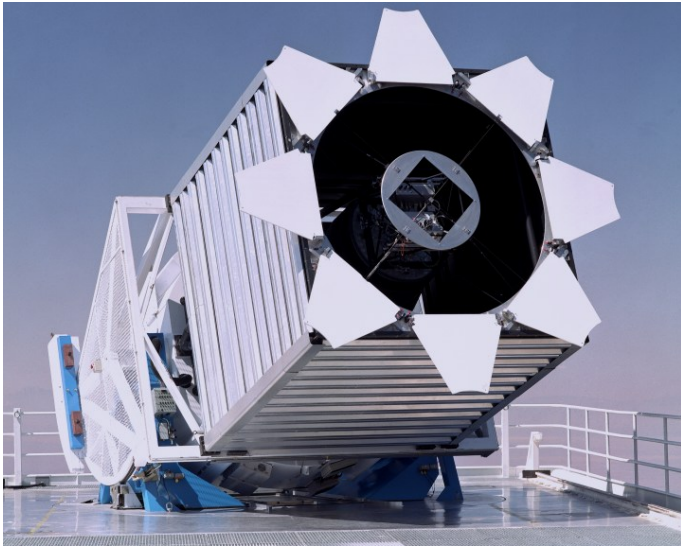
...В ранние эпохи

*(карта анизотропии реликтового излучения,
возраст 300 000 лет)*

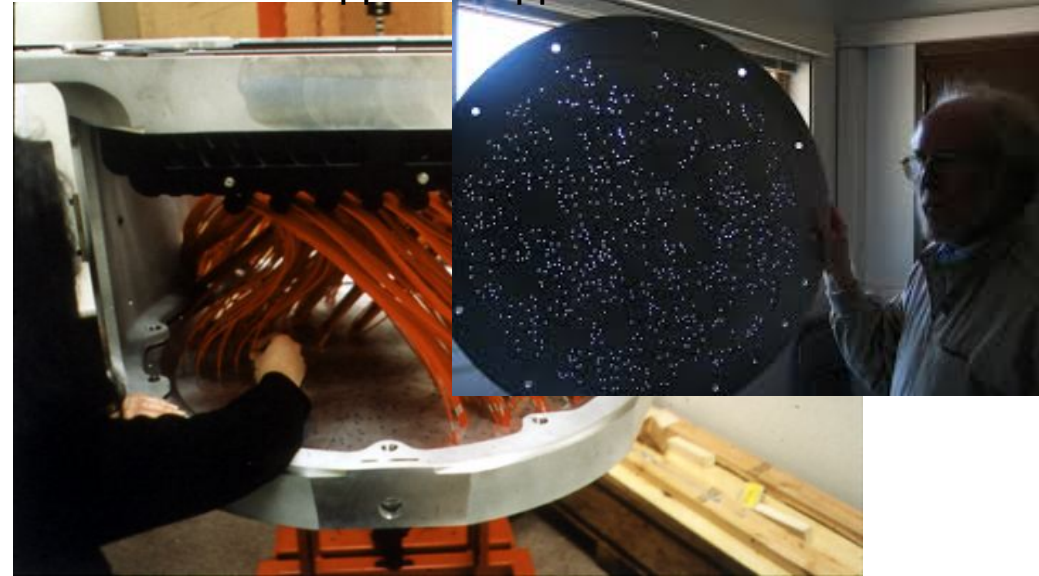


Цифровой обзор неба SDSS

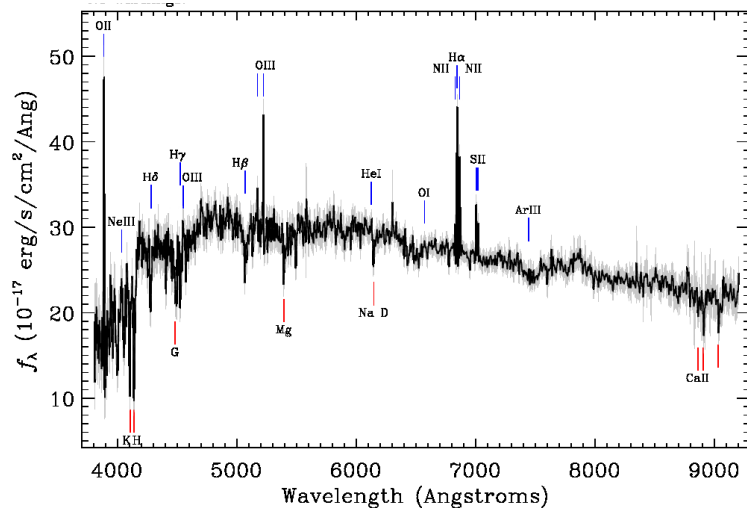
2.5-метровый телескоп



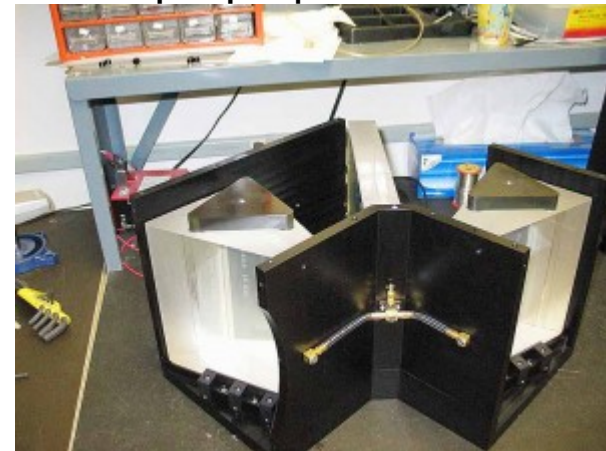
оптоволоконно для каждой галактики



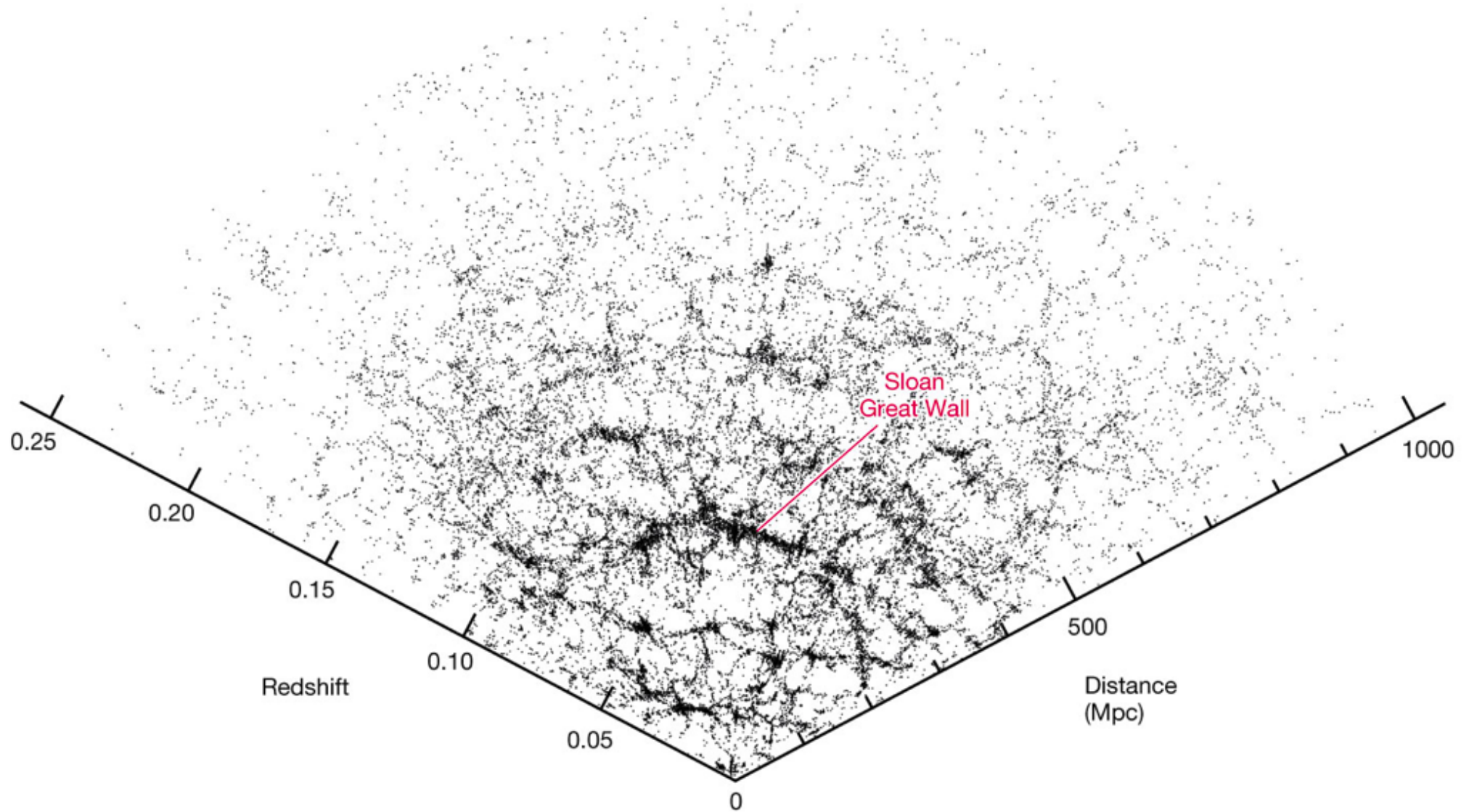
Определение красного смещения



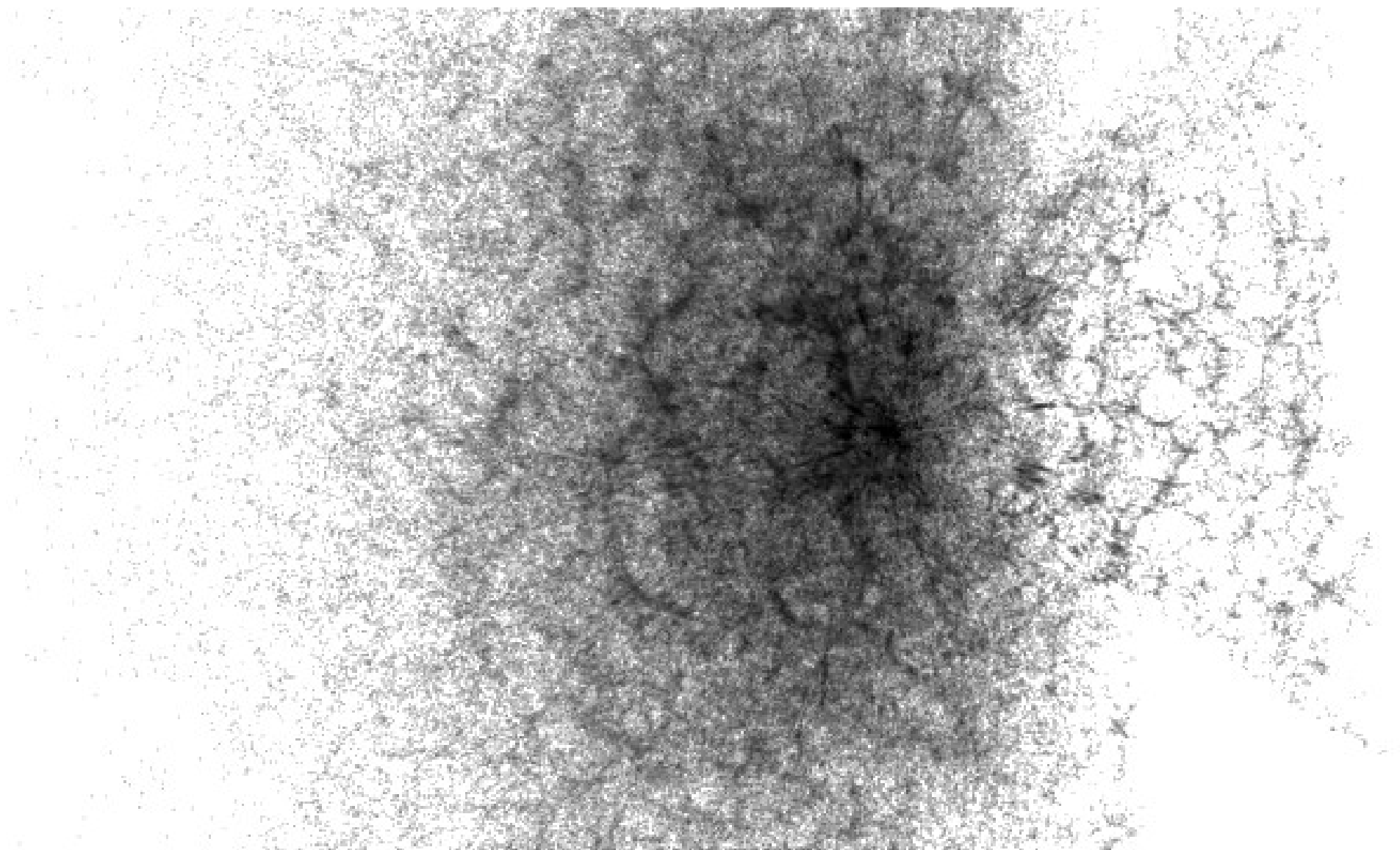
спектрограф



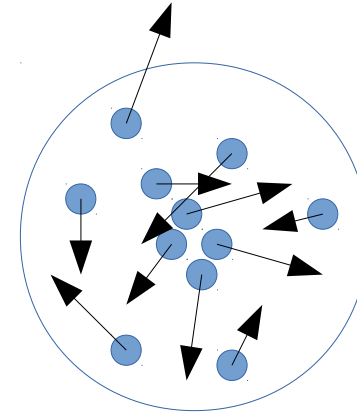
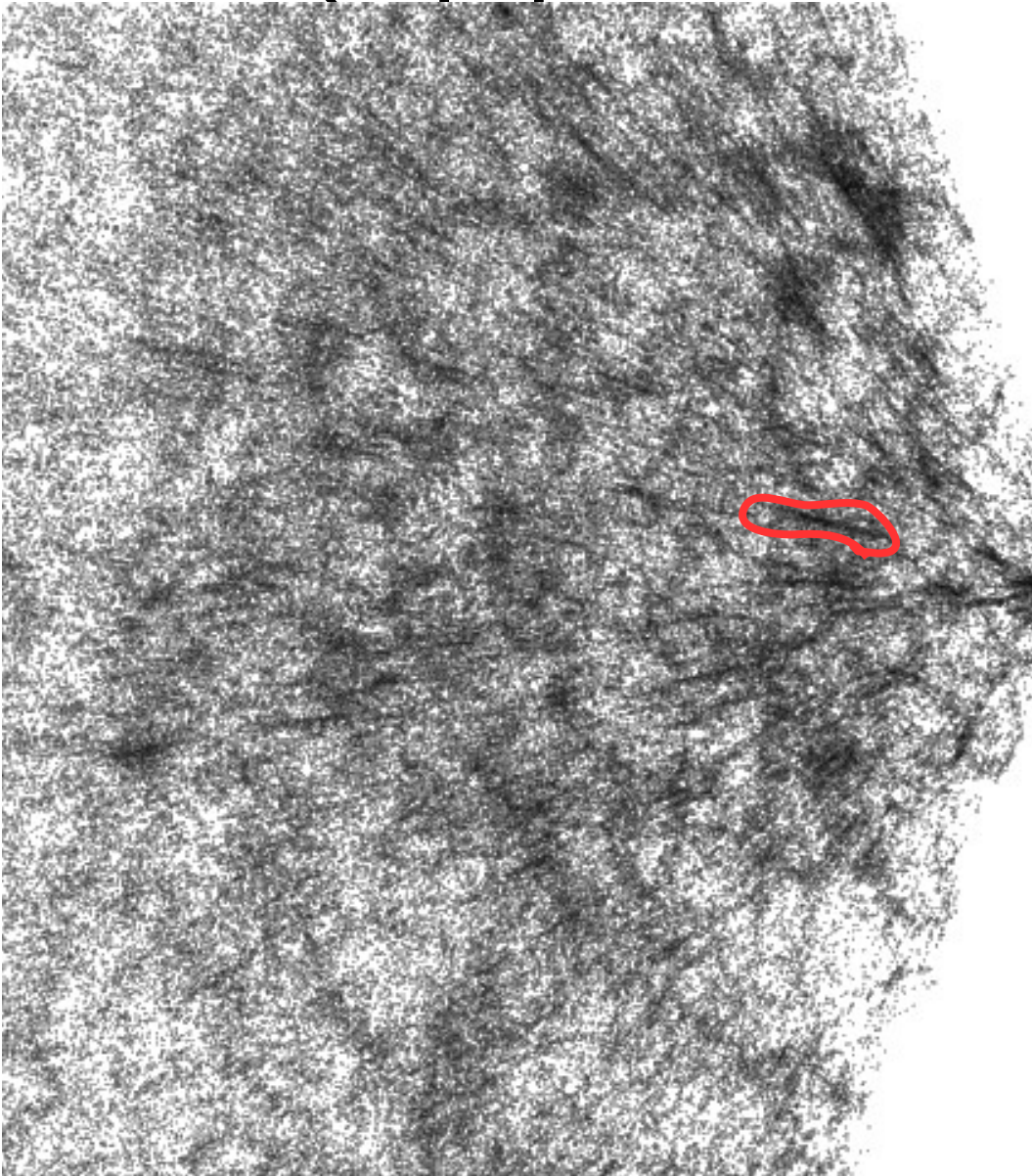
Крупномасштабная структура



Структура по данным SDSS (1 млн. галактик)



Скопления галактик (эффект «палец бога»)

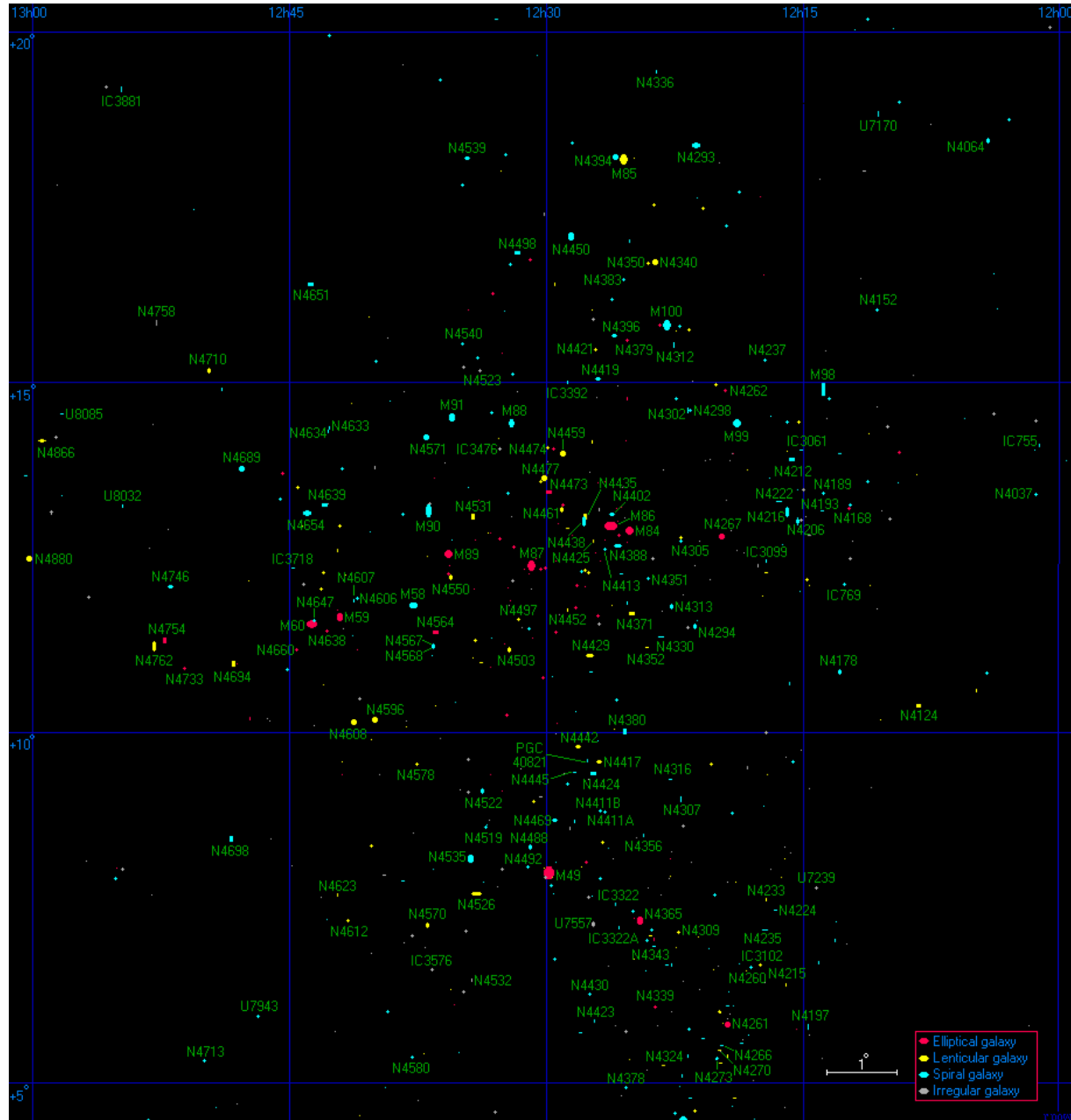


Движения галактик
в скоплении влияют
на их красные
смещения,
 $V \neq Hr$

Скопление в Деве, 20 Мпк от нас, масса 10^{15} масс Солнца

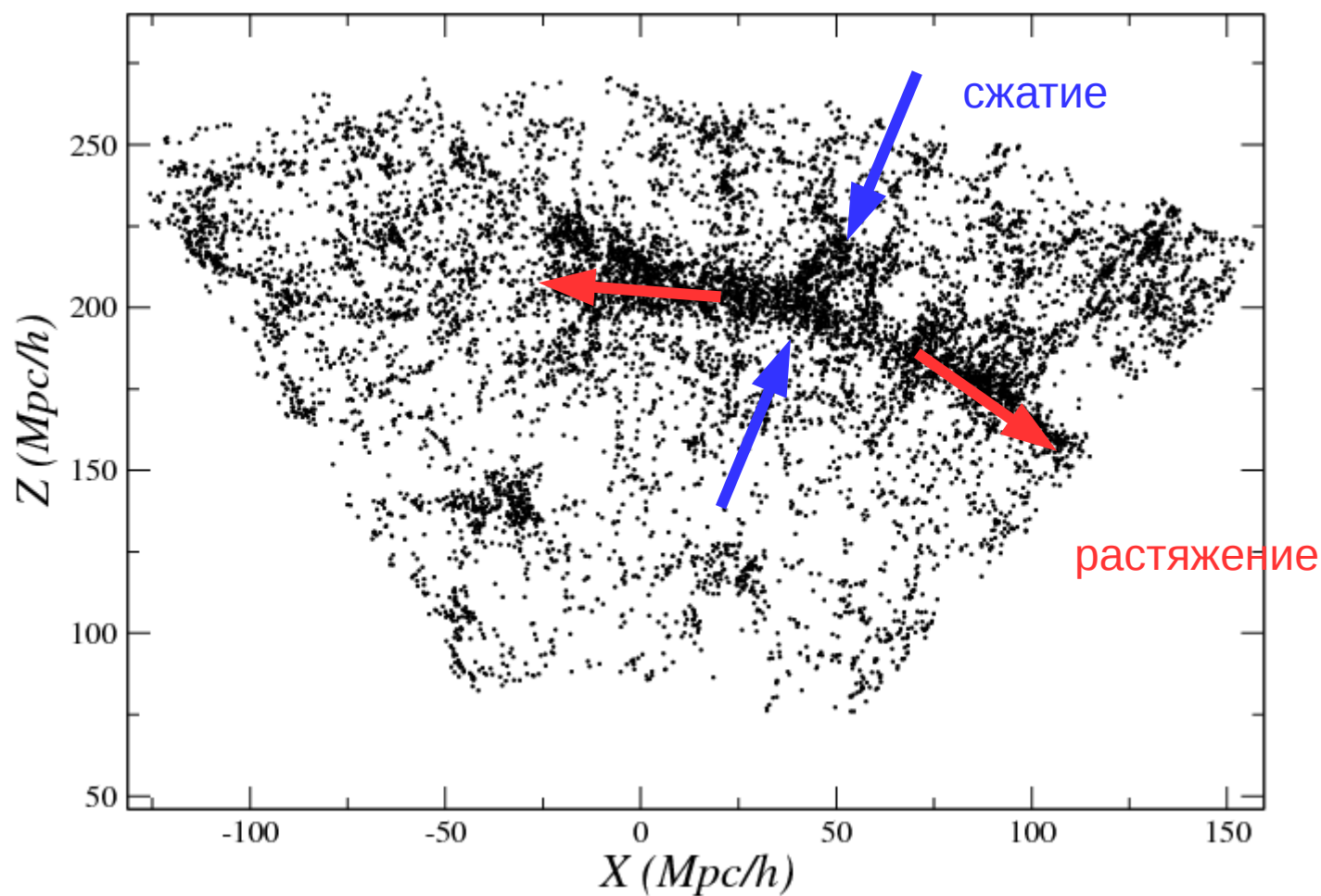


Скопление в Деве, 20 Мпк от нас,
масса 10^{15} масс Солнца

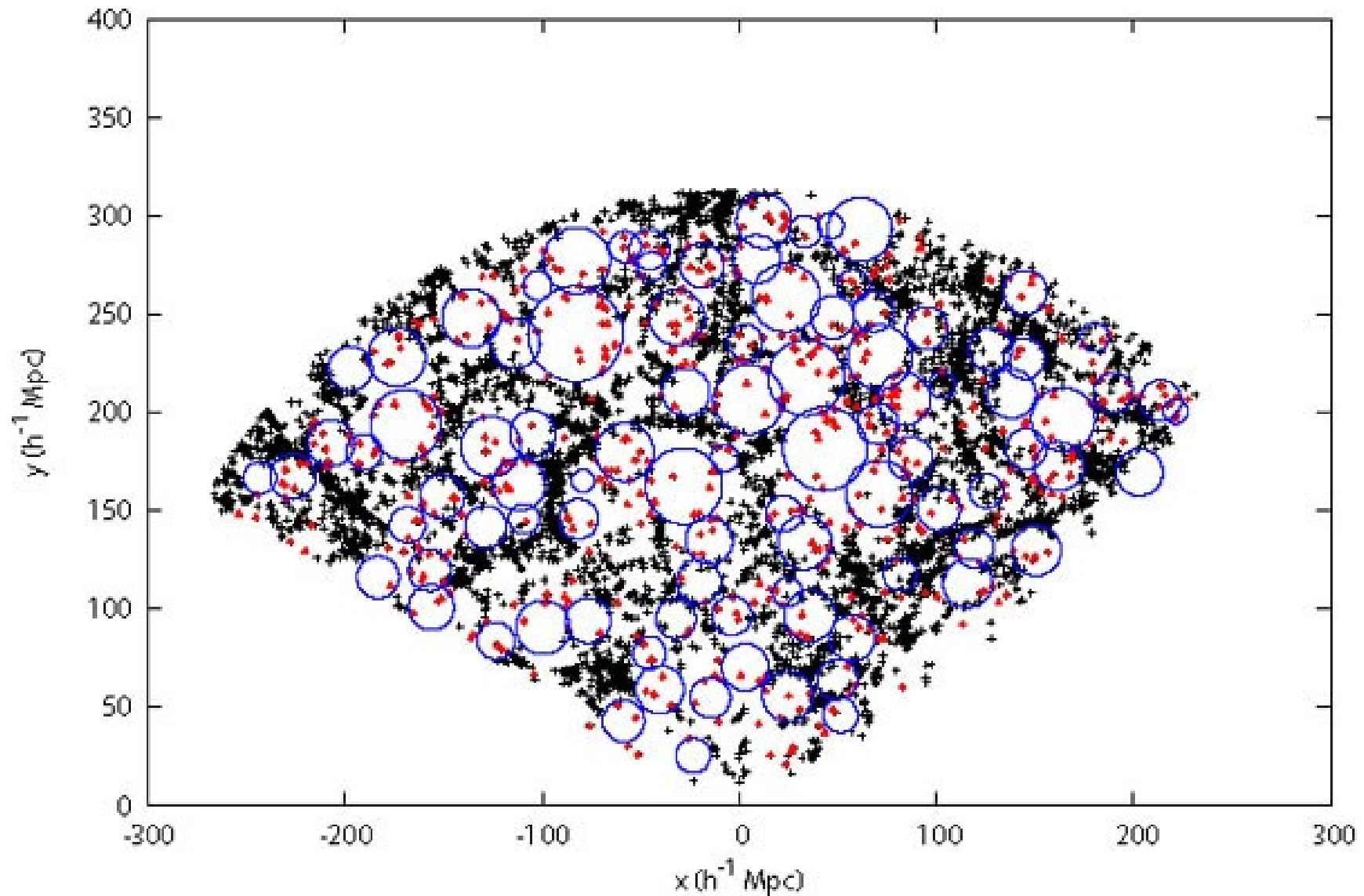


Содержит
около 10 000
галактик

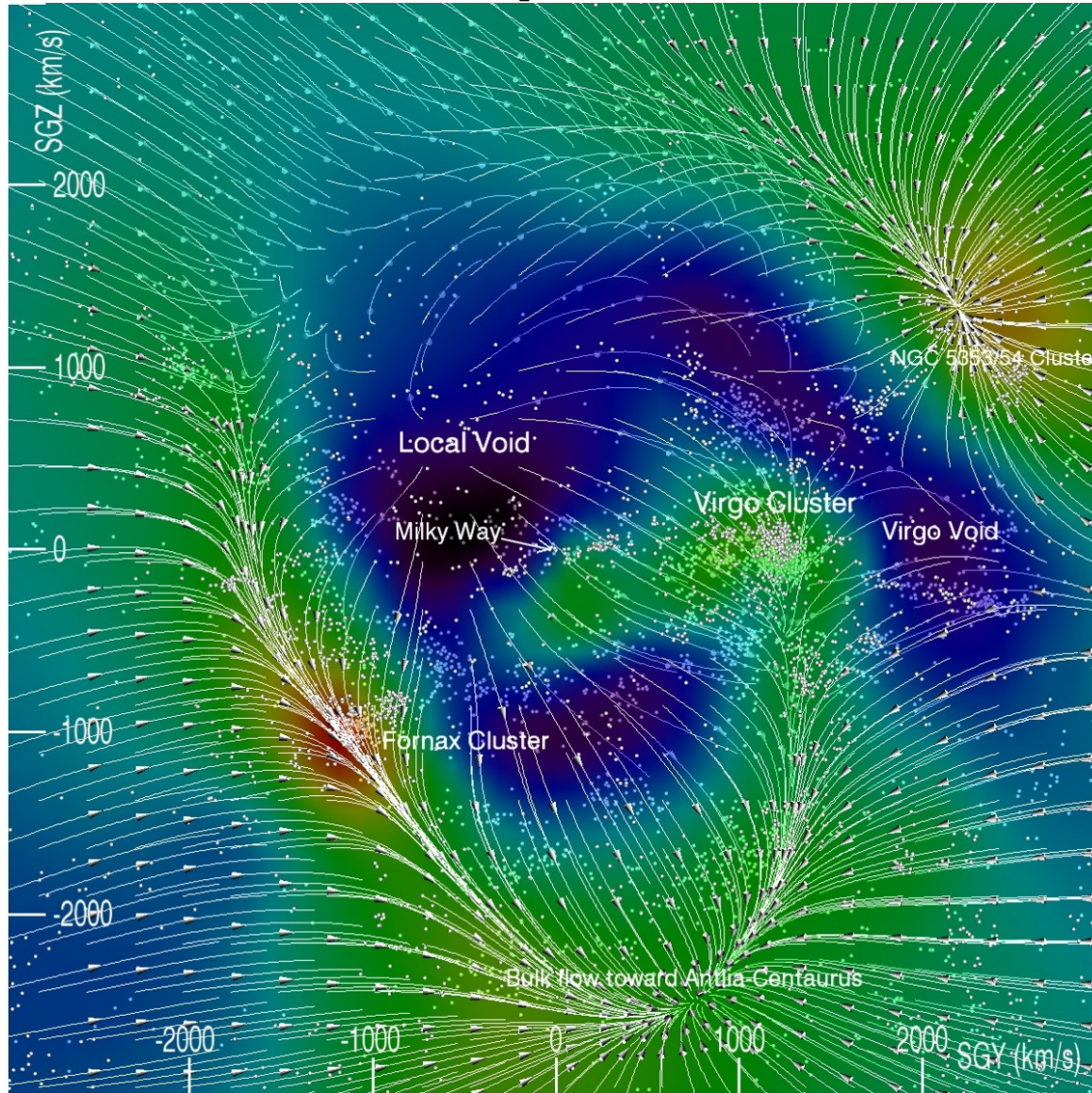
«Стенки» («блины») и филаменты



Гигантские пустоты



Представление в виде поля скоростей



каталог
CFA-3

Флуктуации плотности в зависимости от масштаба

Радиус сферы, мегапарсек	дисперсия $\Delta\rho/\rho$
2	2
10	0.9
100	0.11
1000	0.007

Теория (упрощенная)

Закон сохранения энергии $\frac{(\dot{a})^2}{2} - \frac{GM}{a} = E$ $M = 4\frac{\pi}{3}\rho a^3$, a — радиус шара

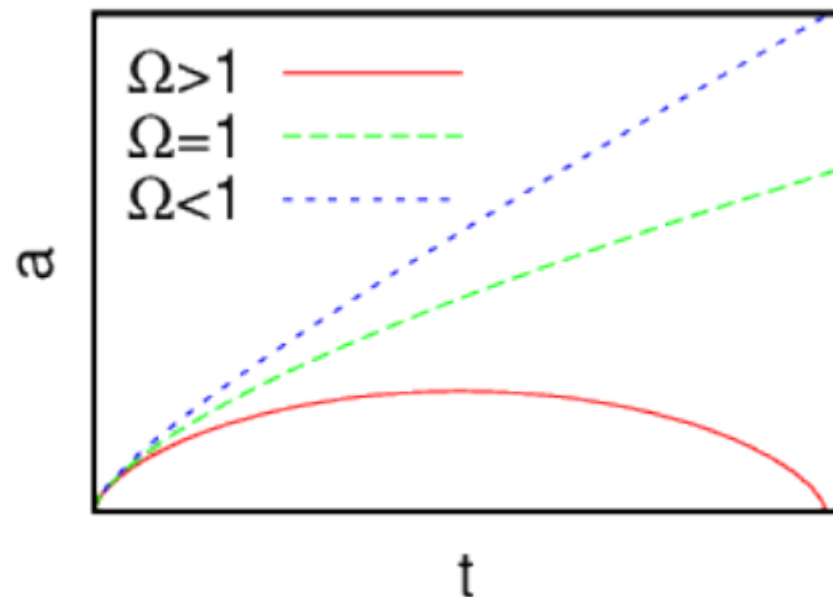
Из условия $E=0$ находим критическую плотность: $\rho_c = \frac{3(\dot{a}/a)^2}{8\pi G}$, $\dot{a}/a \equiv H$

Для $E=0$ (плоский мир) решение: $a_c \propto t^{2/3}$

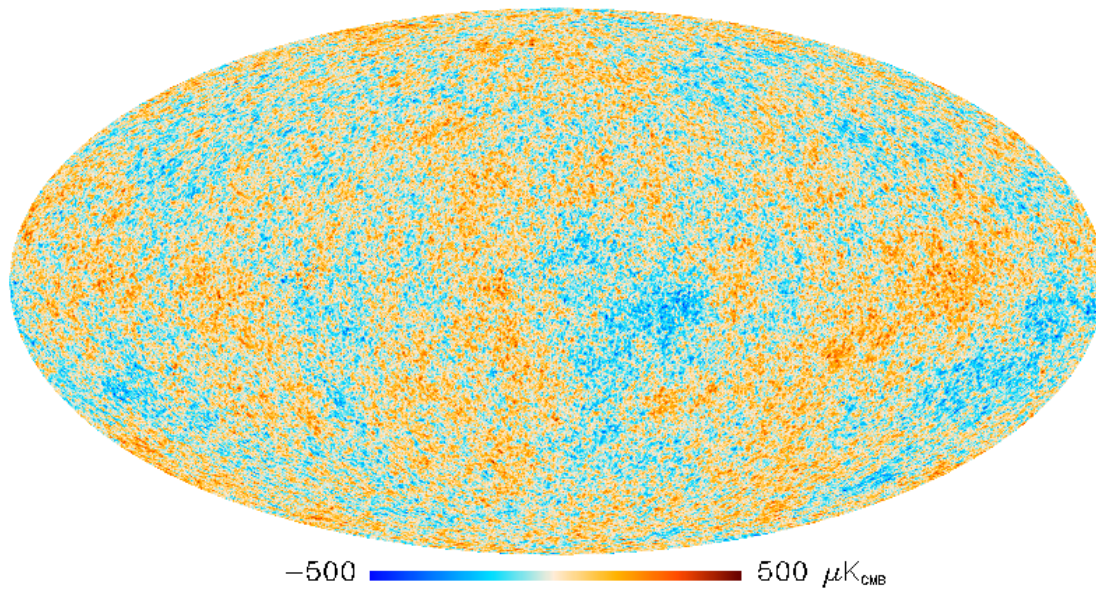
$$\Omega \equiv \frac{\rho}{\rho_c}$$

Малые возмущения: $\rho = \rho_c + \Delta\rho$, $a = a_c + \Delta a$

$$\frac{\Delta\rho}{\rho_c} \propto a_c(t)$$



Свойства возмущений плотности в ранней Вселенной



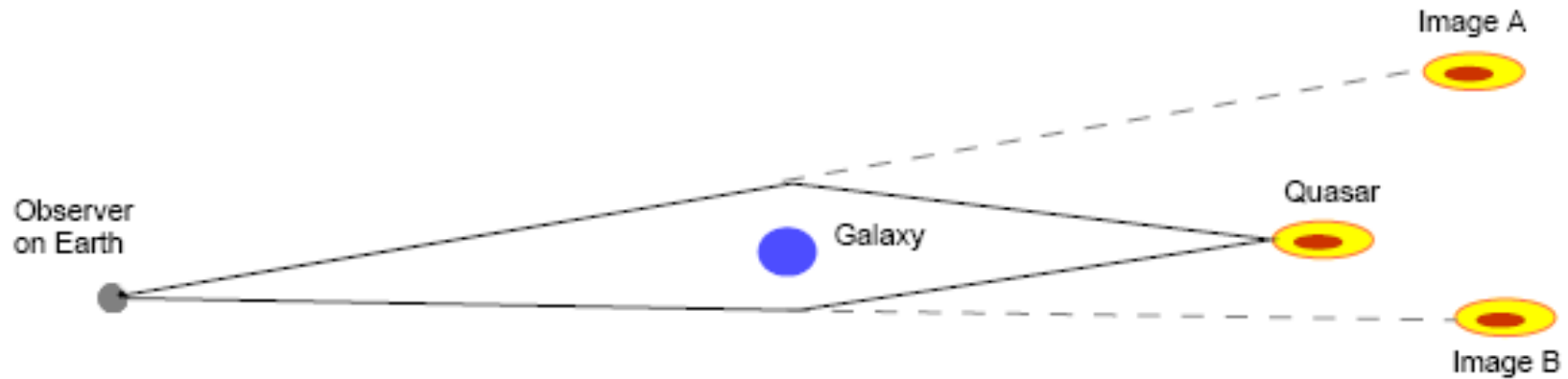
- Мы видим возмущения плотности газа (обычной материи)
- Амплитуда возмущений на масштабе неск. Мпк $\Delta\rho/\rho \sim 10^{-5}$
- Масштабный фактор $a \sim 10^{-3}$

$$\frac{\Delta\rho}{\rho_c} \propto a_c(t) \Rightarrow \text{на сегодня амплитуда должна быть } 10^{-2}!$$

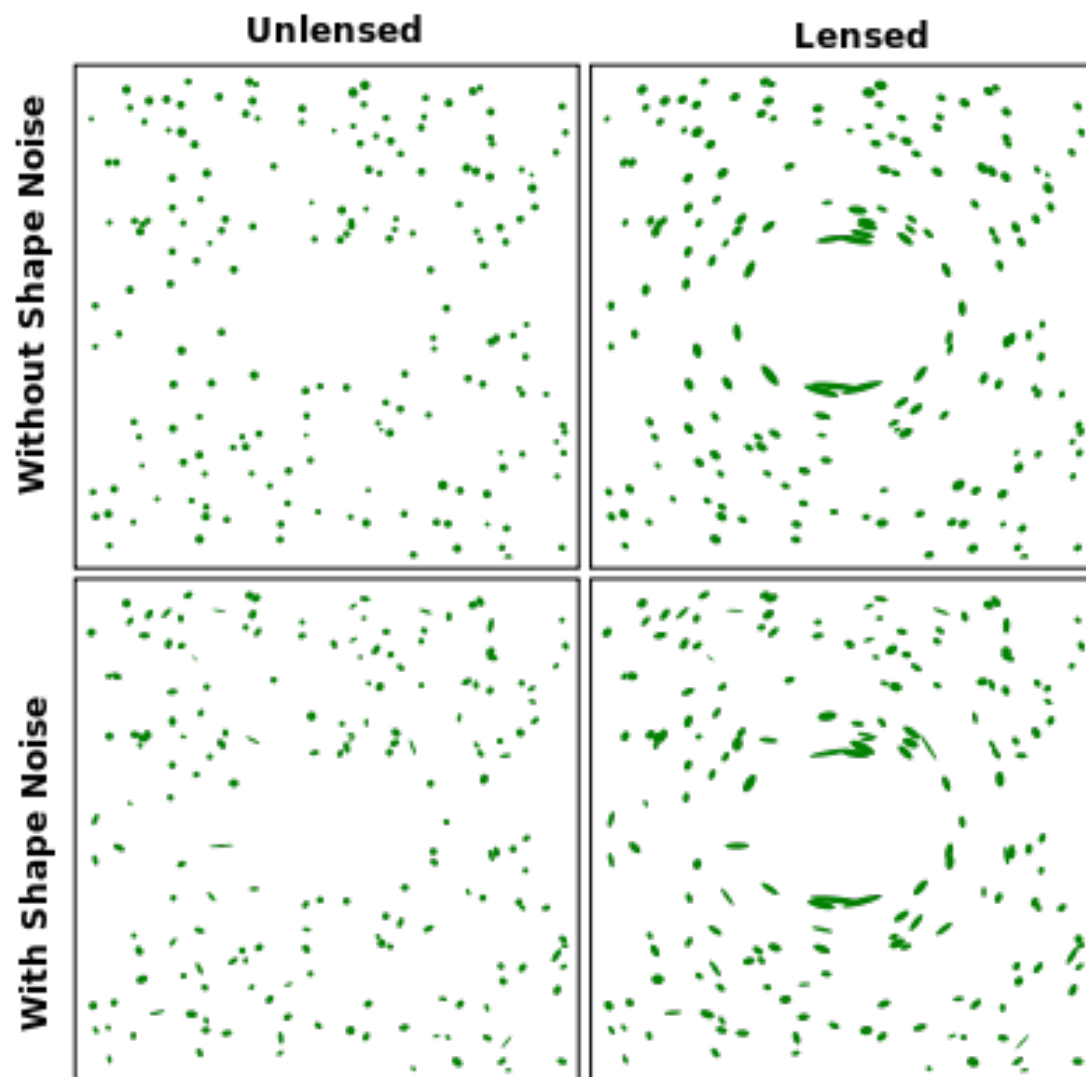
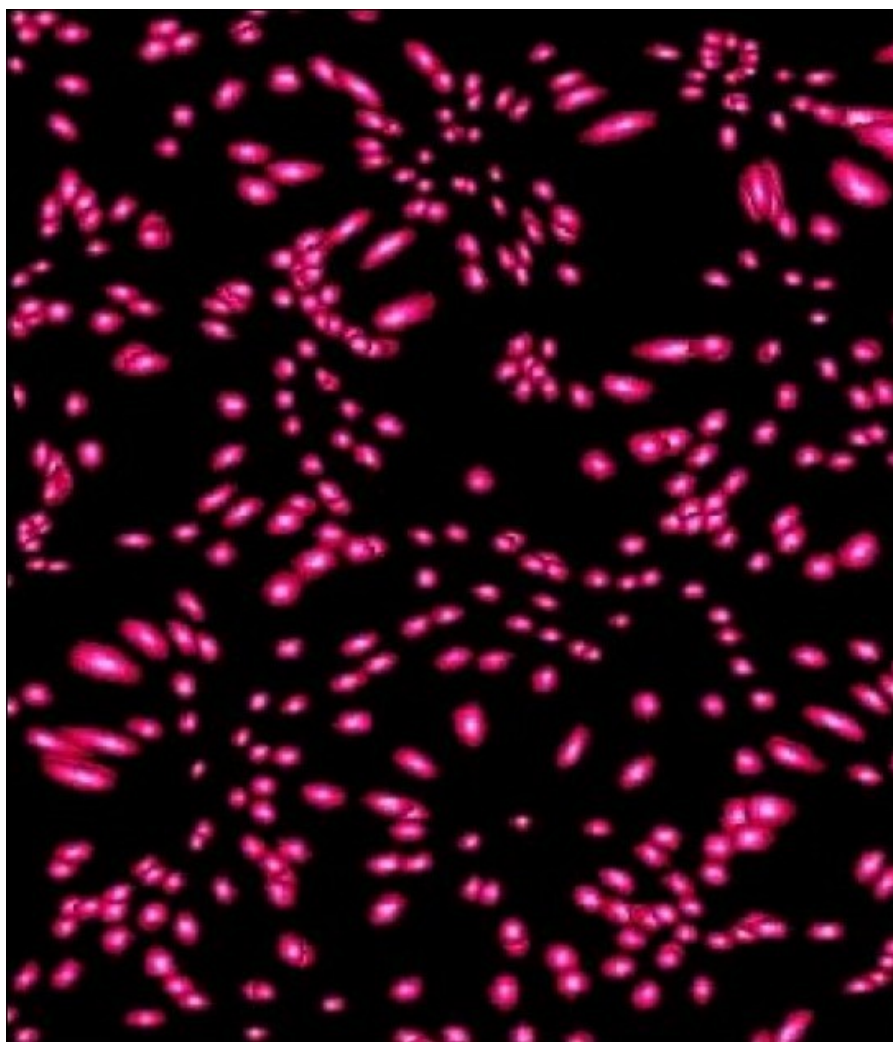
Свойства возмущений плотности в ранней Вселенной

- До рекомбинации для газа необходимо учитывать давление излучения. Оно препятствует нарастанию возмущений плотности.
- Для темной материи давления нет, амплитуда возмущений 10^{-3} на момент рекомбинации. Эти возмущения накладывают отпечаток на возмущения в газе – наблюдаемый эффект.

Гравитационное линзирование



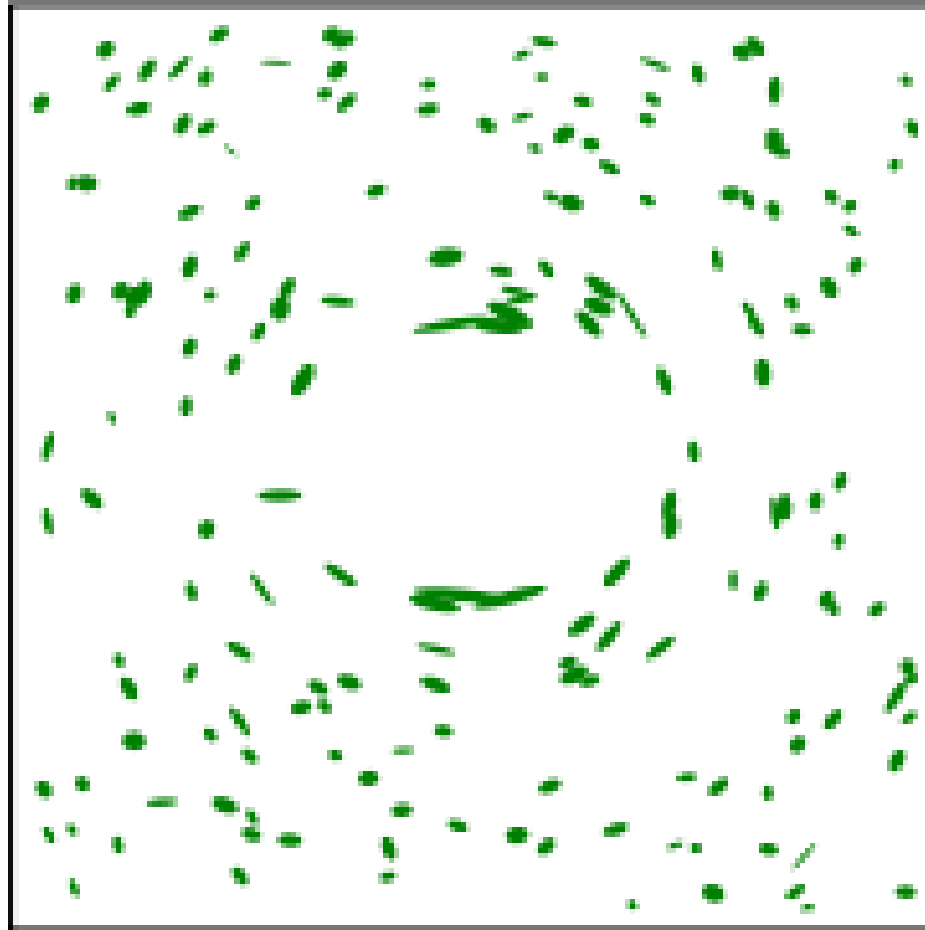
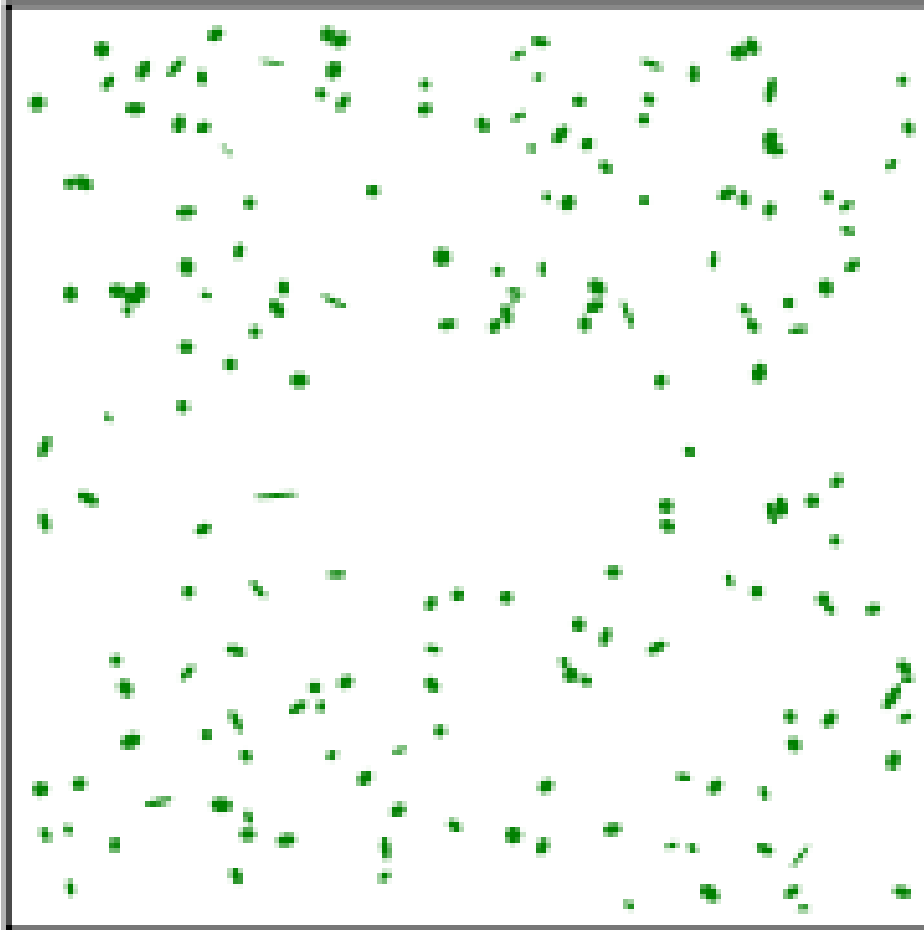
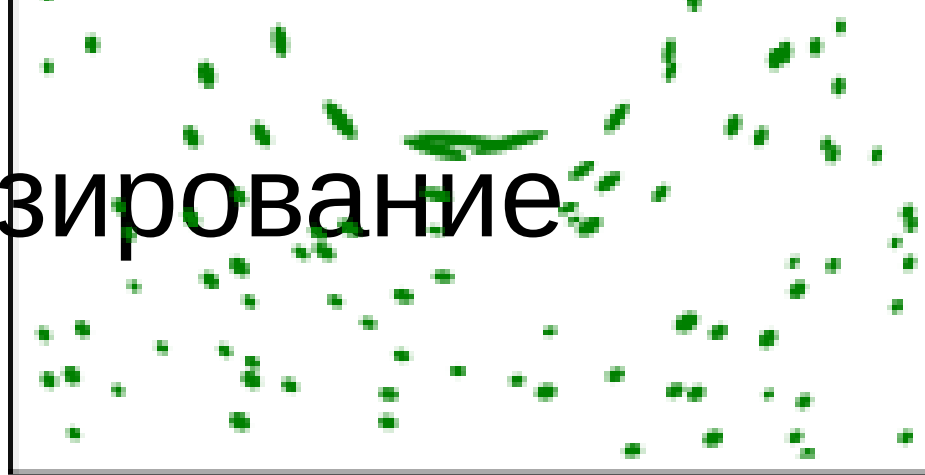
Слабое линзирование



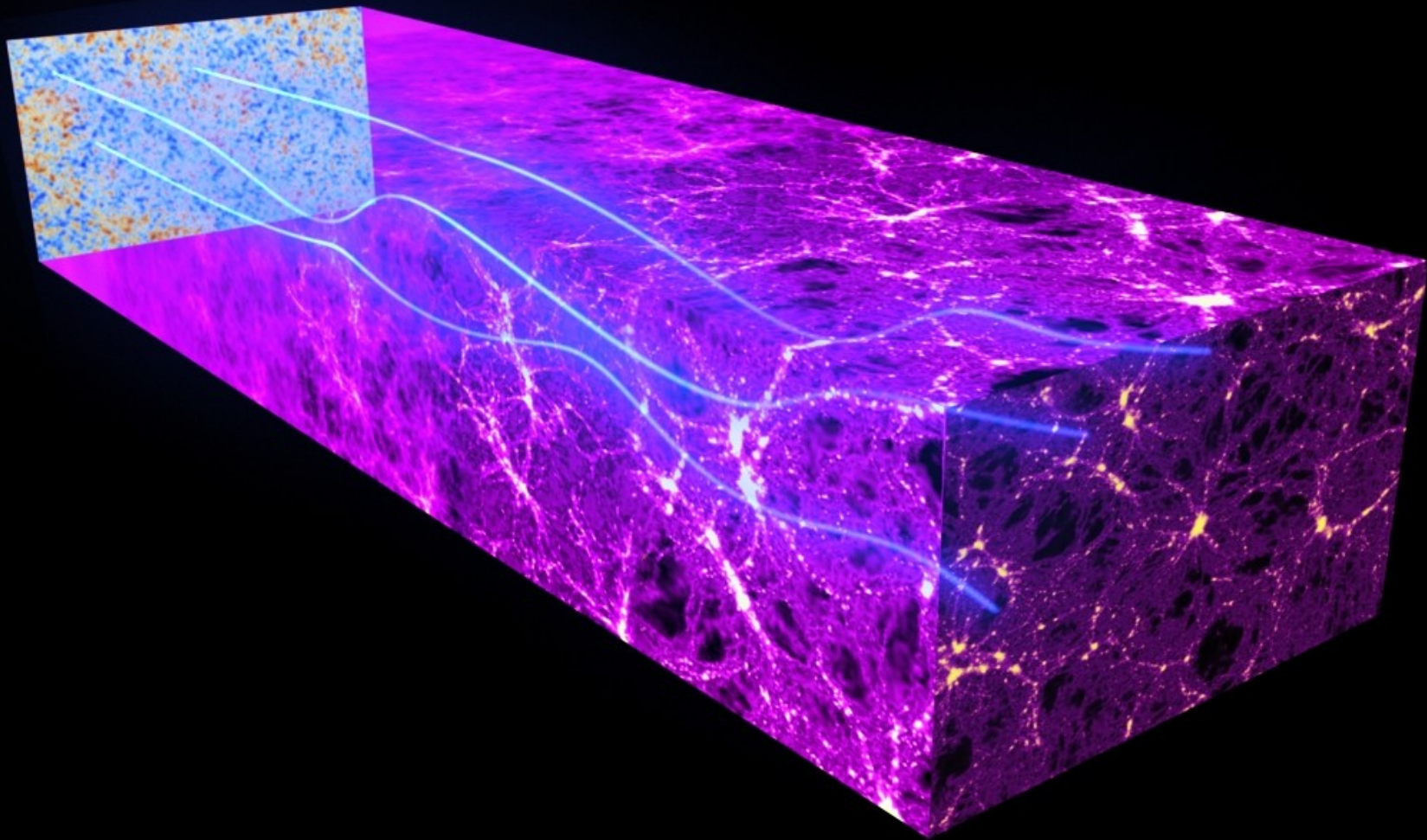
Without S

With Shape Noise

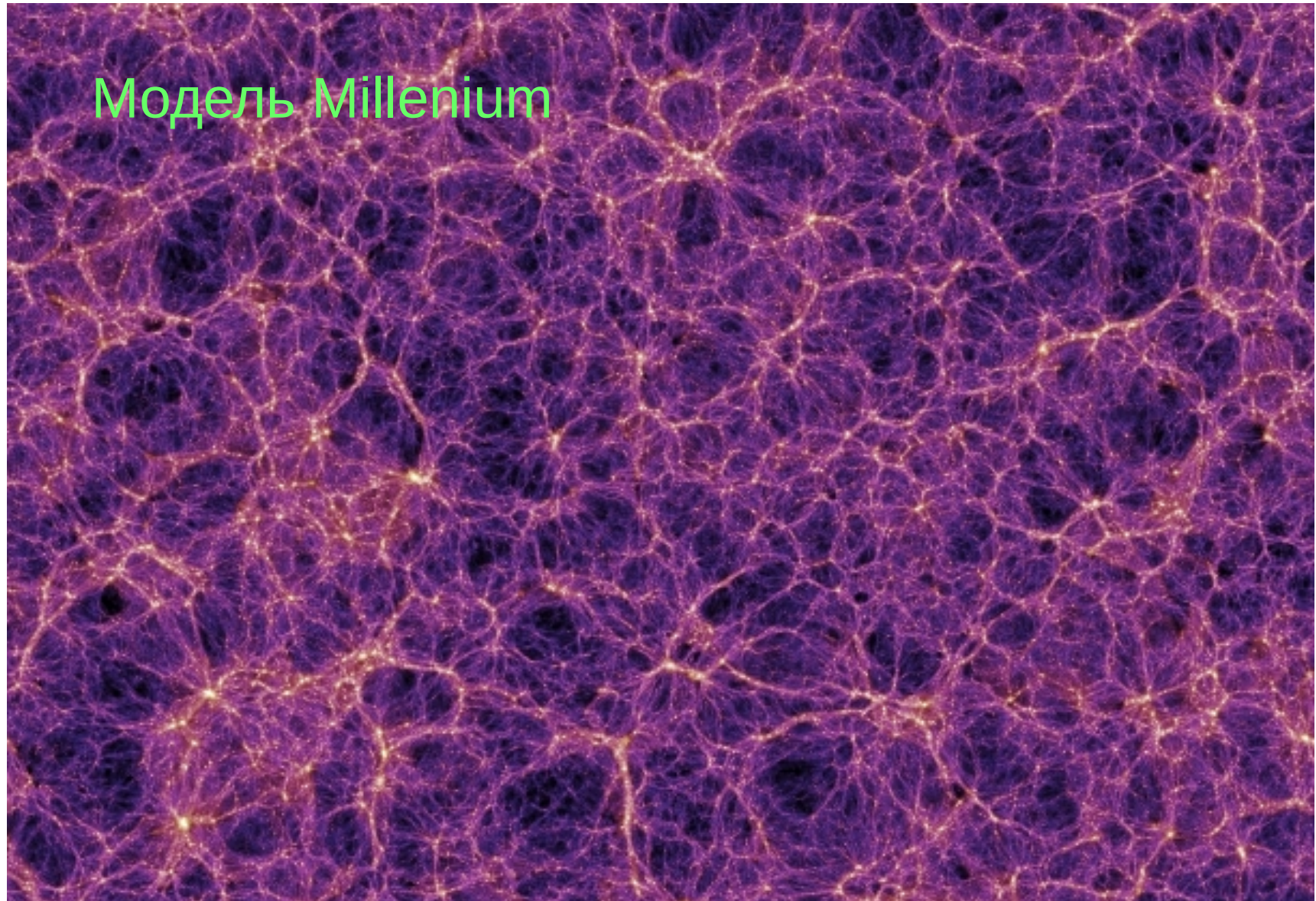
Слабое линзирование



Линзирование реликтового излучения



Численное моделирование структуры



Численное моделирование

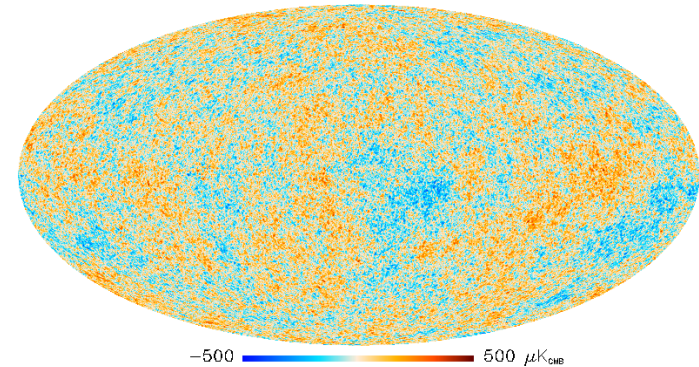
- Решаемые уравнения
- Начальные условия
- Граничные условия
- Методы обработки

Численное моделирование

- Решаемые уравнения $\vec{F} = -\frac{GM}{r^3} \vec{r}$ (N-body)
- Начальные условия
- Граничные условия
- Методы обработки

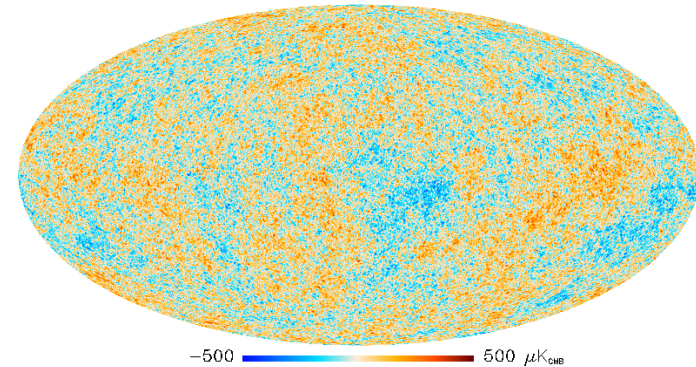
Численное моделирование

- Решаемые уравнения $\vec{F} = -\frac{GM}{r^3} \vec{r}$ (N-body)
- Начальные условия
- Граничные условия
- Методы обработки



Численное моделирование

- Решаемые уравнения $\vec{F} = -\frac{GM}{r^3} \vec{r}$ (N-body)
- Начальные условия
- Граничные условия
- Методы обработки

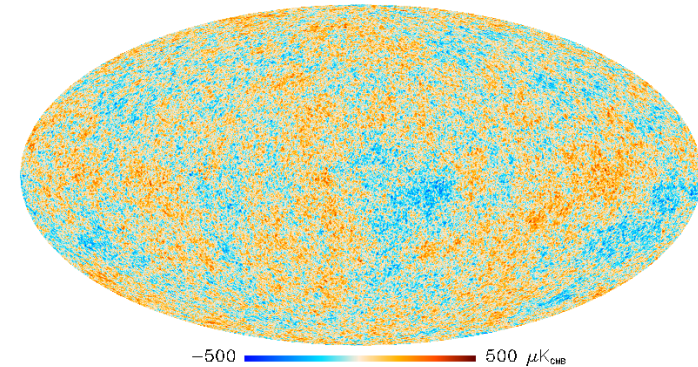


периодические

Численное моделирование

- Решаемые уравнения $\vec{F} = -\frac{GM}{r^3} \vec{r}$ (N-body)

- Начальные условия



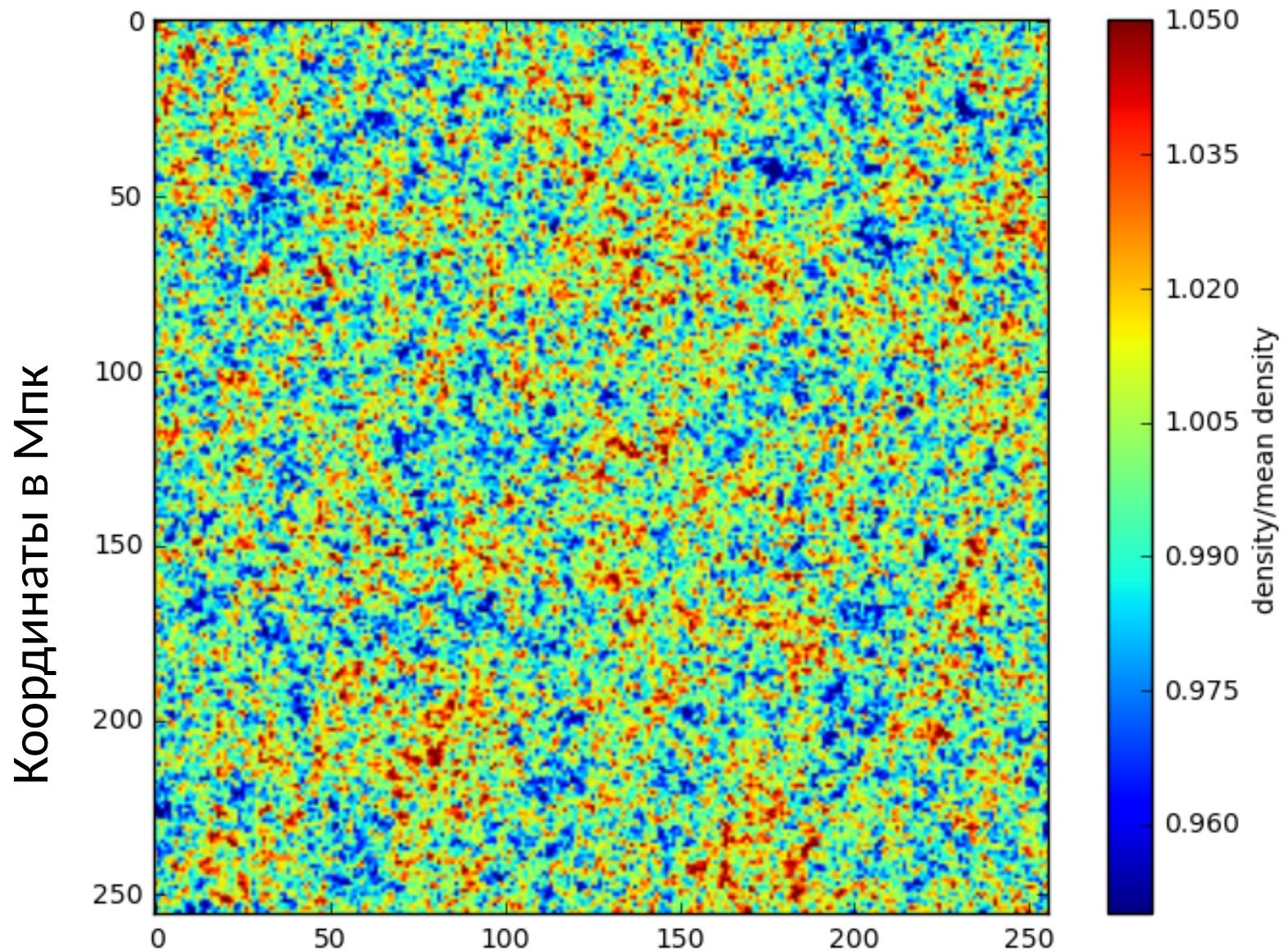
- Граничные условия

периодические

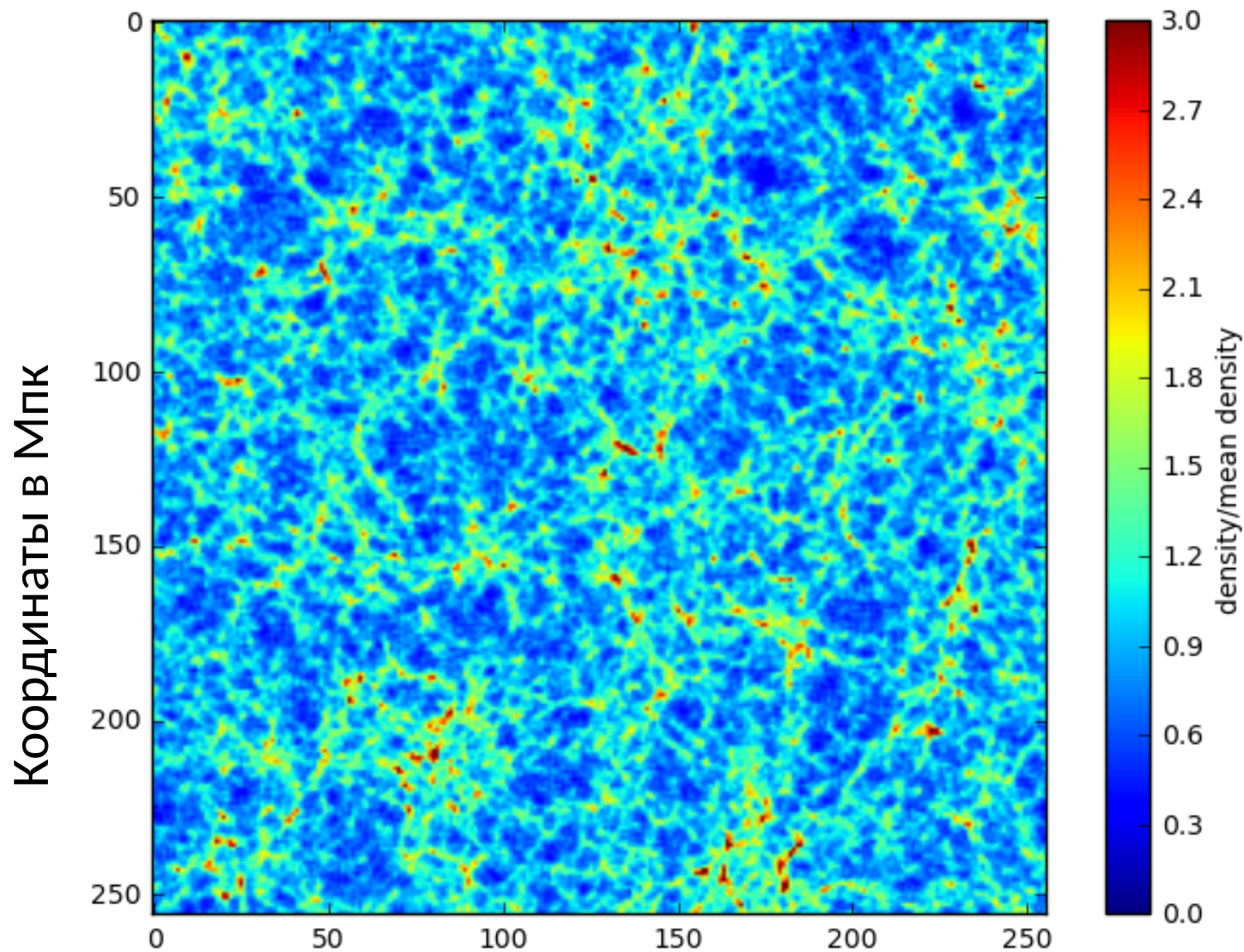
- Методы обработки

Визуализация полей
плотности и скорости,
моделирование
наблюдений

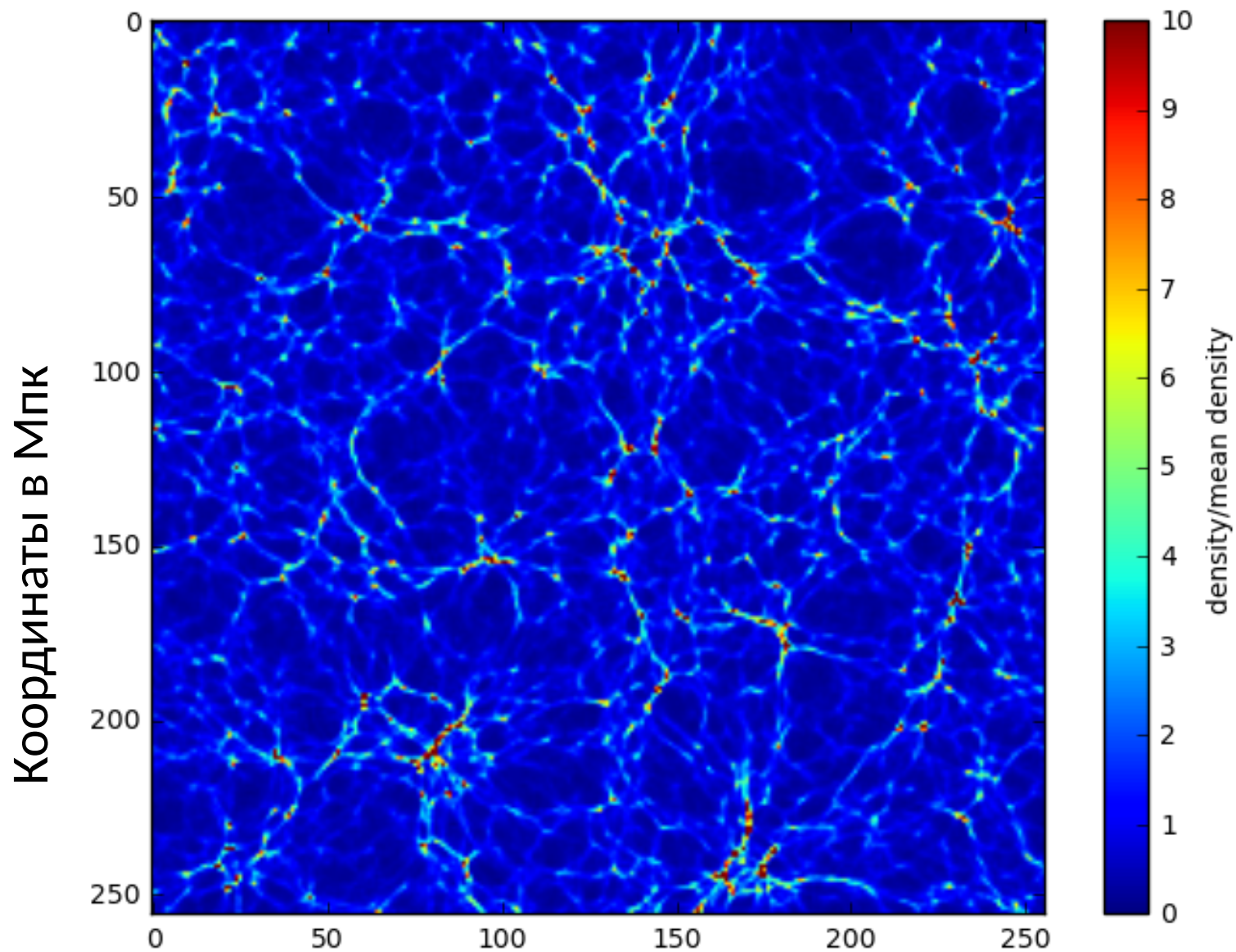
Распределение плотности



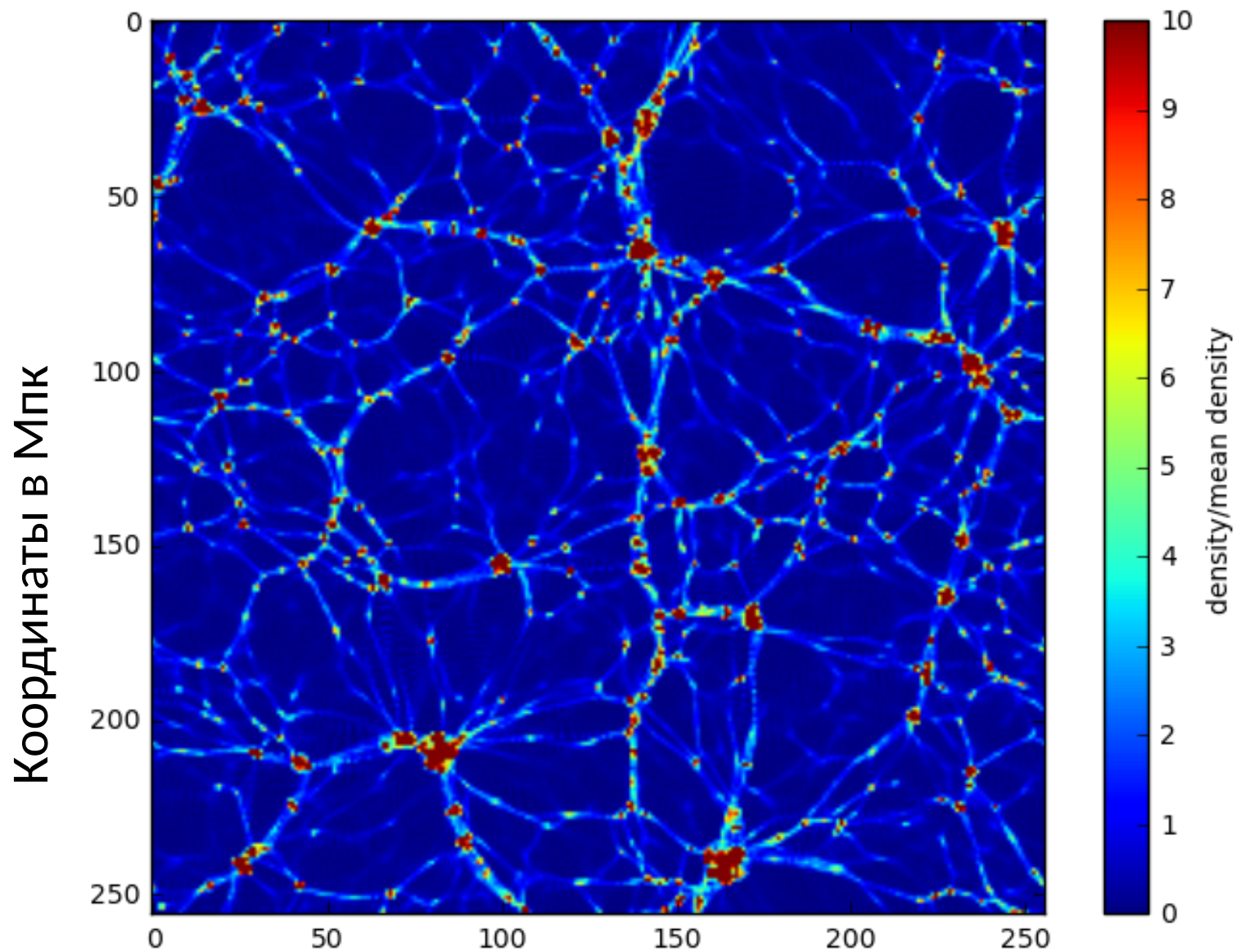
Распределение плотности



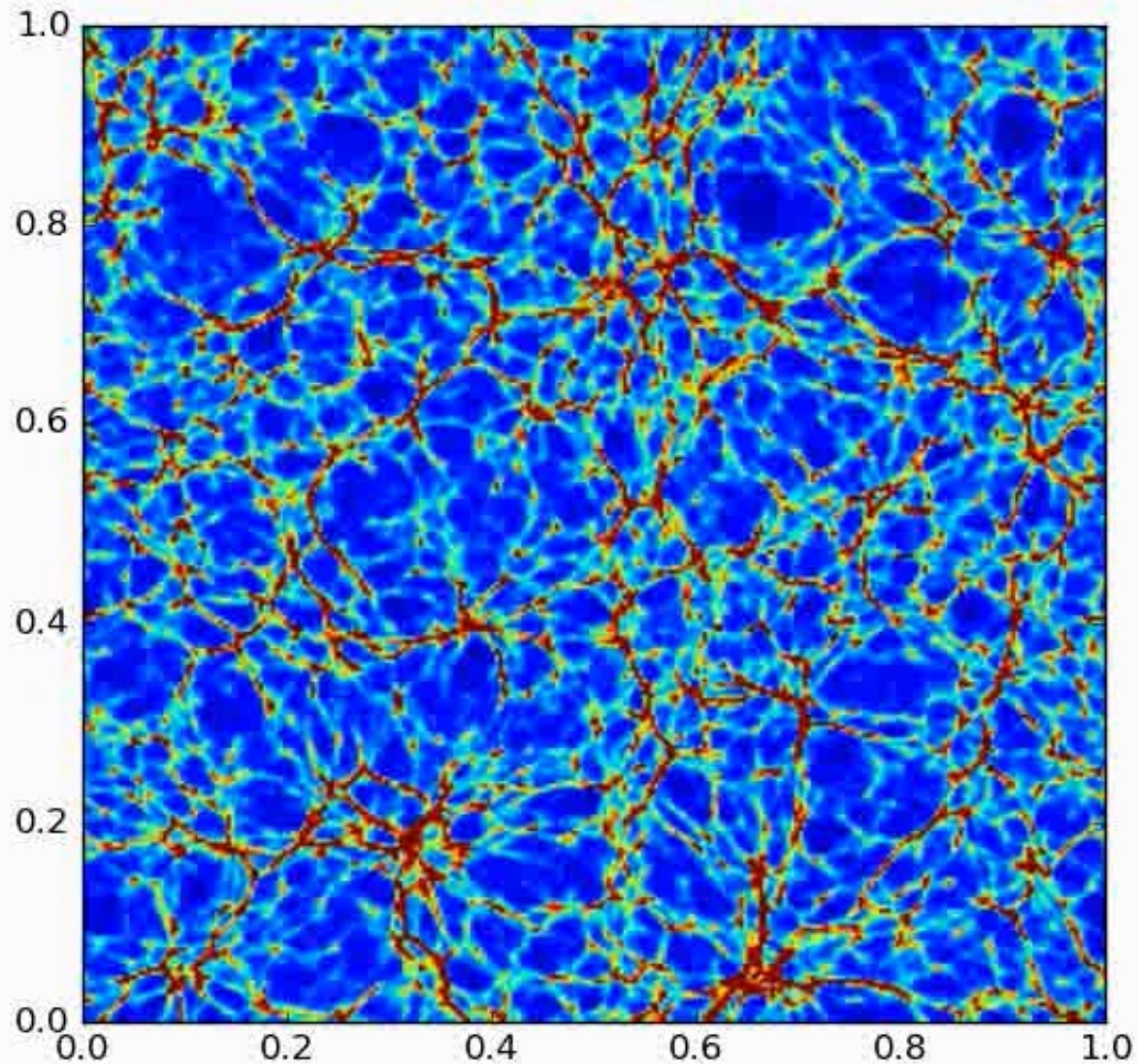
Распределение плотности



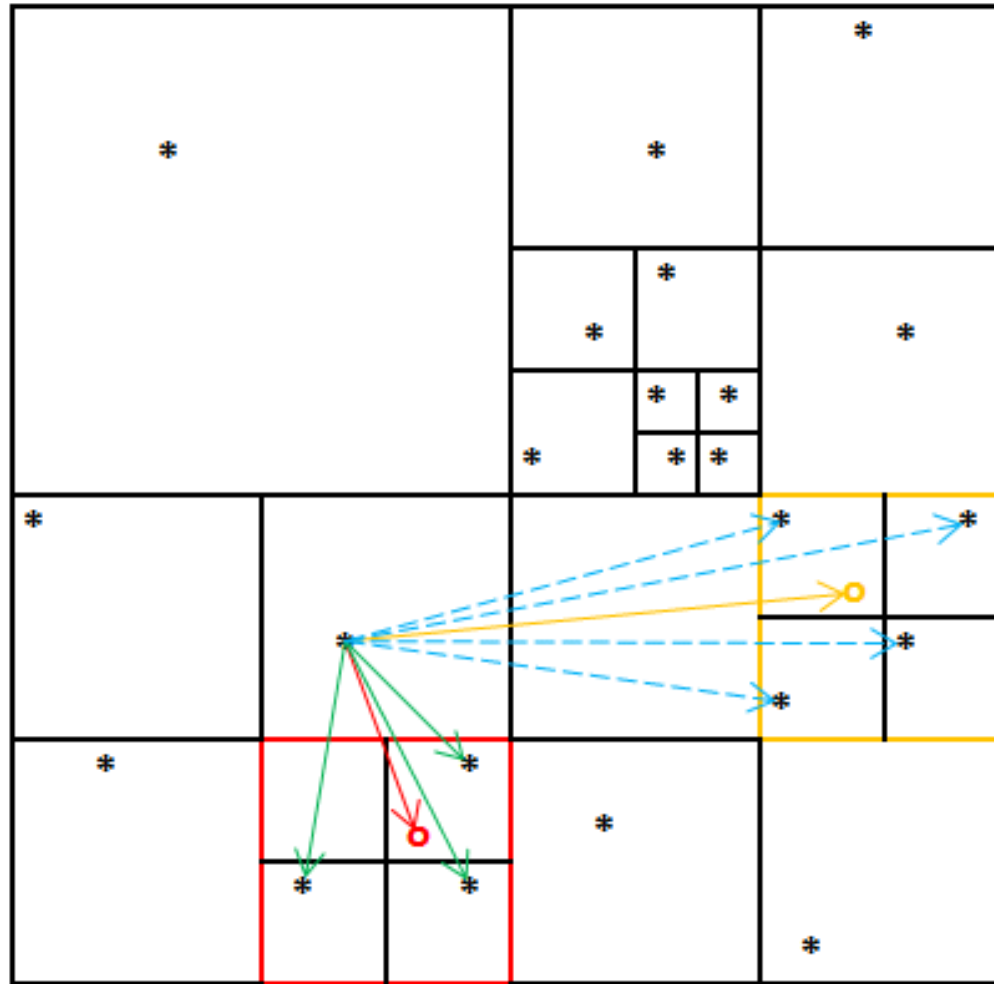
Распределение плотности



Эволюция флуктуаций плотности



Приближенное решение задачи N тел — древесный алгоритм



Задачи

1. Масса скопления галактик 10^{15} масс Солнца, радиус 2 Мпк. На сколько мегапарсек оно будет вытянуто по расстоянию от наблюдателя, если расстояния до галактик измерены по красным смещениям?

*2. Вывести закон роста малых возмущений плотности, $\Delta\rho/\rho \sim a$, используя закон сохранения энергии и фридмановское решение для плоской Вселенной