

Наблюдательные основы космологии

ЛЕКЦИЯ 8

Планетные системы, галактики. Крупномасштабная структура Вселенной

д.ф.-м.н. Сажина Ольга Сергеевна
(cosmologia@yandex.ru)

Государственный астрономический институт им. П.К.
Штернберга Московского государственного университета им.
М.В. Ломоносова

Пять ключевых наблюдательных тестов Стандартной космологической модели

Λ CDM

1. Расширение Вселенной

2. Реликтовое излучение

3. Крупномасштабная структура Вселенной

4. Распространенность легких химических элементов

5. Анизотропия реликтового излучения

6*. Темная материя

7*. Темная энергия

8*. Гравитационные волны



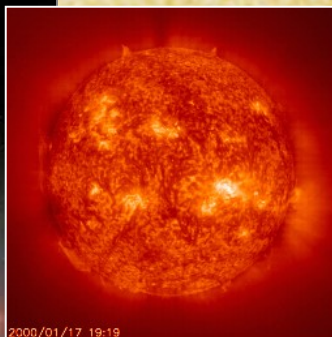
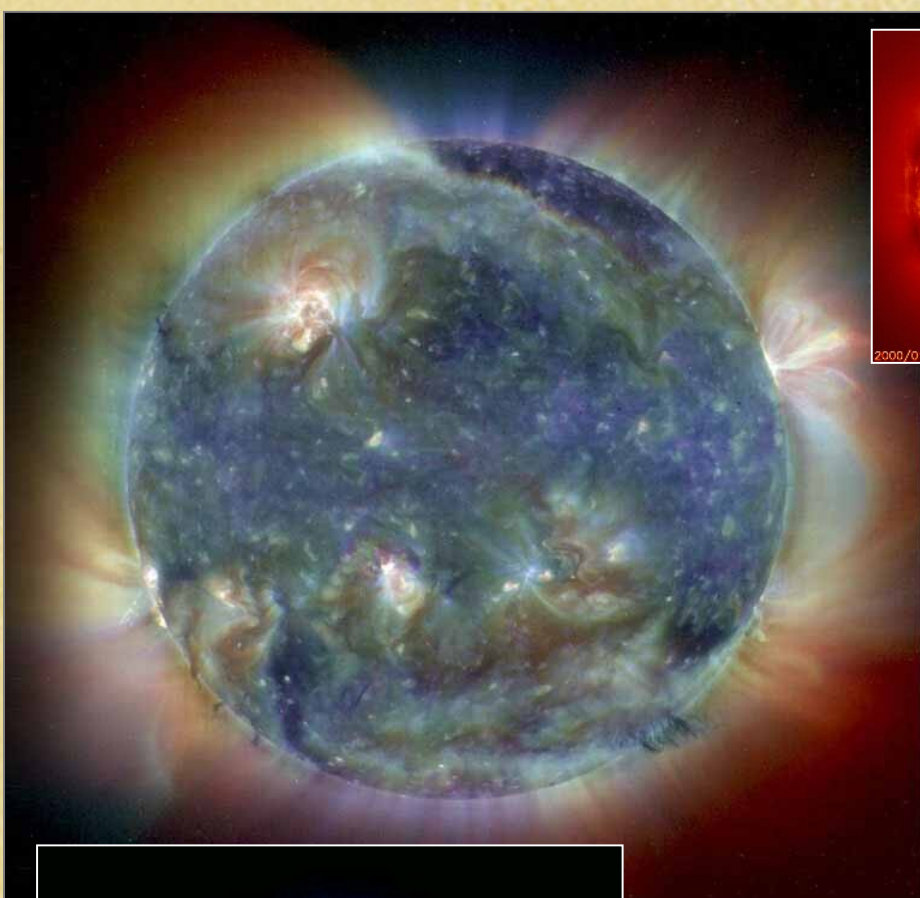
Крупномасштабная структура Вселенной – особенность распределения вещества во Вселенной на сверхбольших масштабах

Космические структуры образуют следующую иерархию:

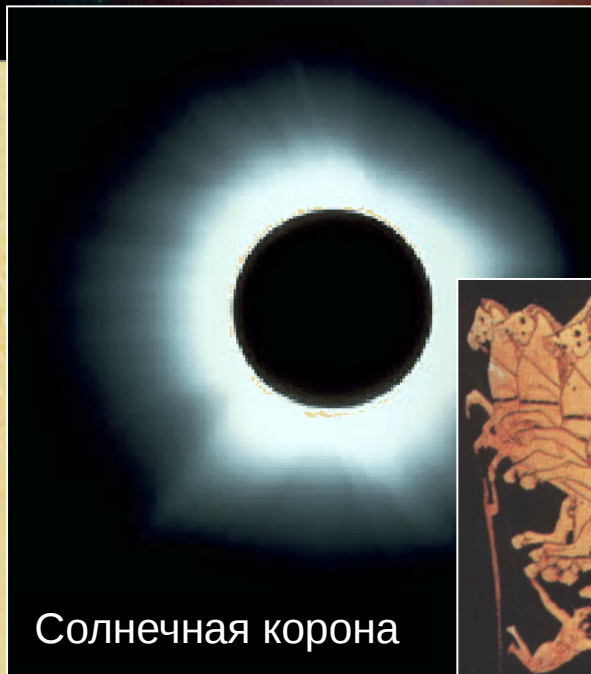
- 1. планетные системы и мелкие космические тела,**
- 2. галактики,**
- 3. скопления галактик,**
- 4. сверхскопления галактик (собственно крупномасштабная структура)**

Формально космологии принадлежит только последний пункт, однако кратко остановимся на всей иерархии в целом.

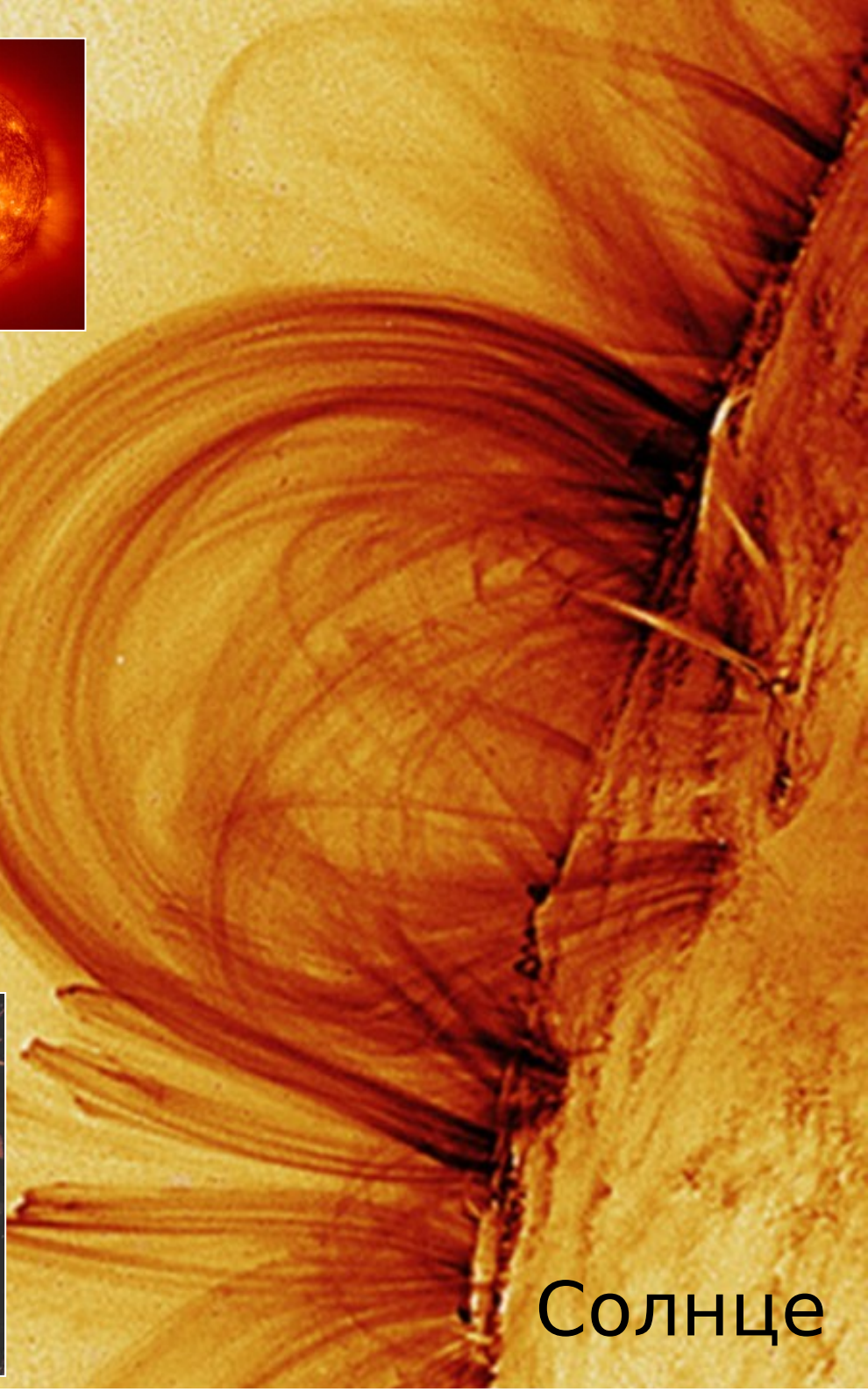
Солнце и планеты солнечной системы



2000/01/17 19:19

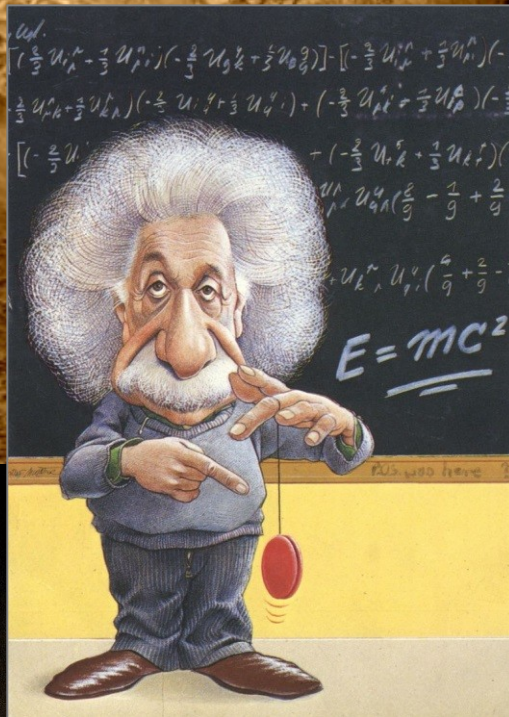
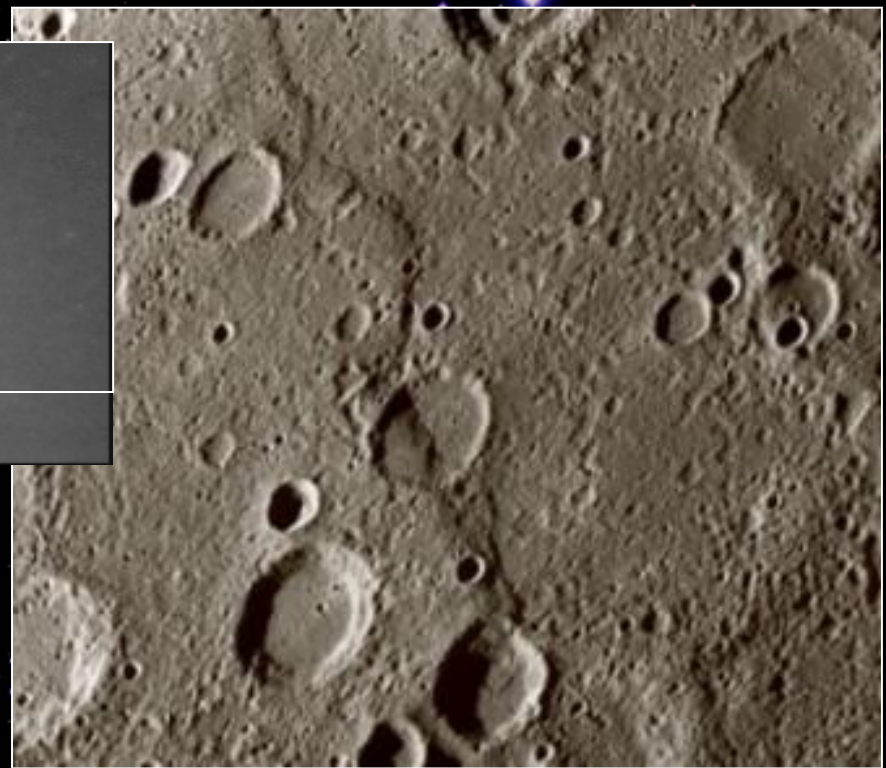


Солнечная корона



Солнце

Меркурий



Средний размер орбиты: 58 миллионов км
Период обращения: 88 дней
Период вращения: 1400 часов
Диаметр: 4880 км
Масса $3.3 \cdot 10^{23}$ кг
Орбита сильно эксцентричная: с 46 до 70 миллионов км
Температура: от 90 до 700 °К
Средняя плотность: 5.43 г/см^3 vs 3.34 Луны

Венера



Размер орбиты: 108 миллионов км

Период обращения: 220 дней

Диаметр: 12104 км

Масса $4,9 \cdot 10^{24}$ кг

Орбита почти круговая

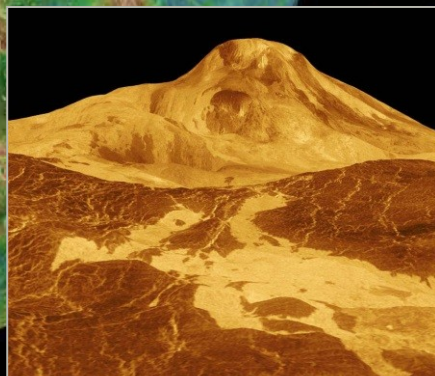
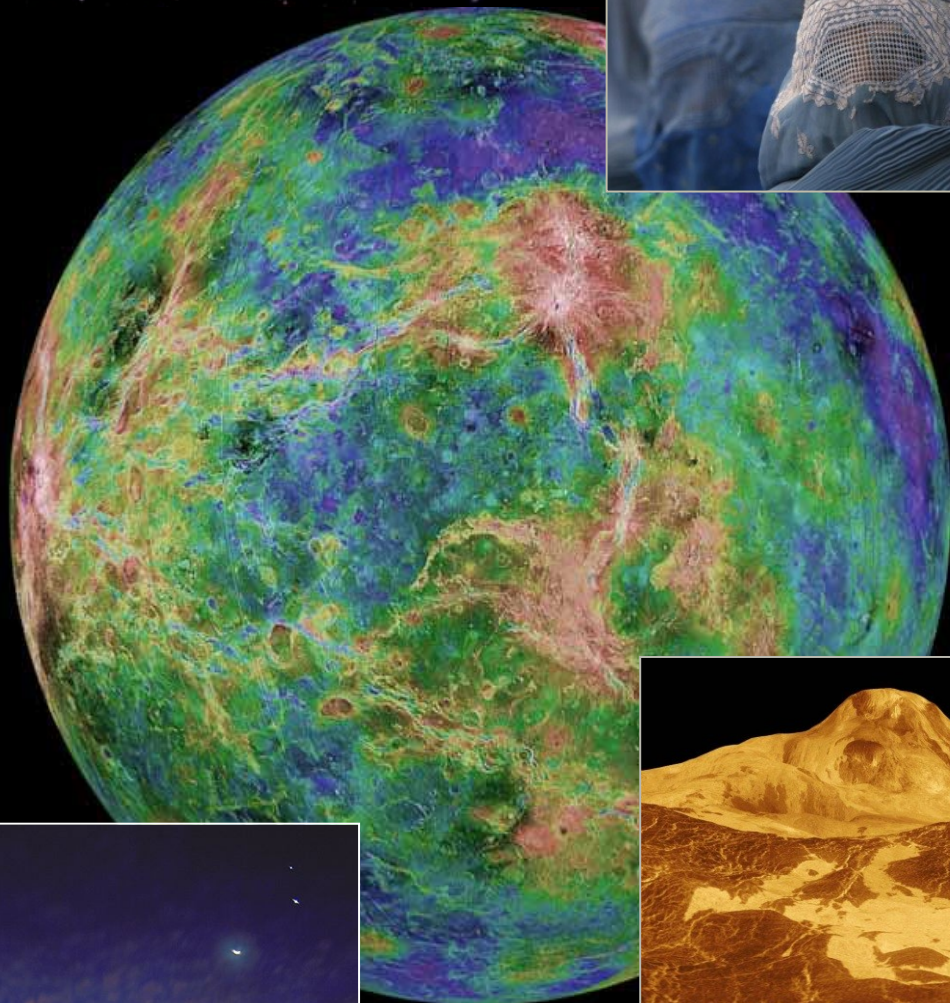
Период вращения: 243 дней

Близнец Земли (с юной поверхностью)

Покрыта облаками: создают эффект теплицы

Температура: от 400 до 740 °К

Ветры на высоте: 350 км/ч



Giorgione





C.Friedrich

Марс

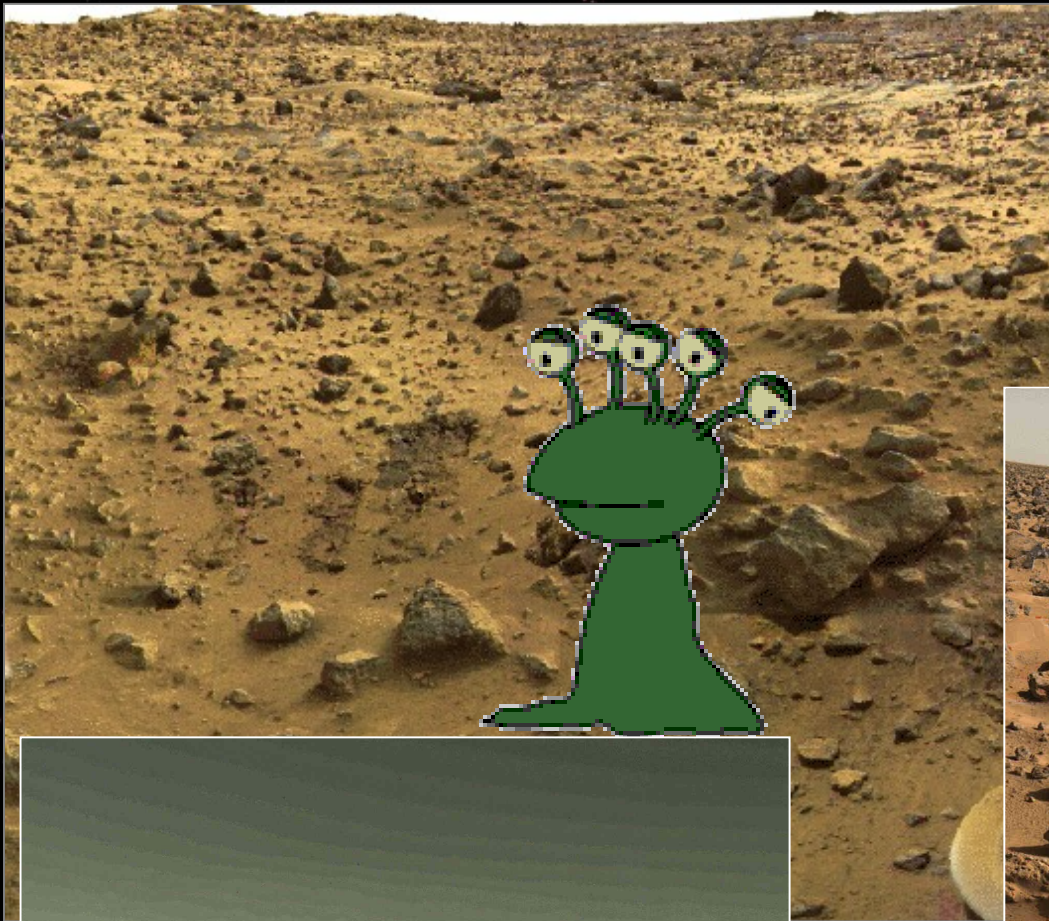
Размер орбиты: 228 миллионов км
Период обращения: 1.88 лет
Период вращения: 25 часов
Диаметр: 6794 км
Масса $6.4 \cdot 10^{23}$ кг
Температура: от 140 до 300 °K
Период вращения: 243 дней
Атмосфера состоит из CO₂



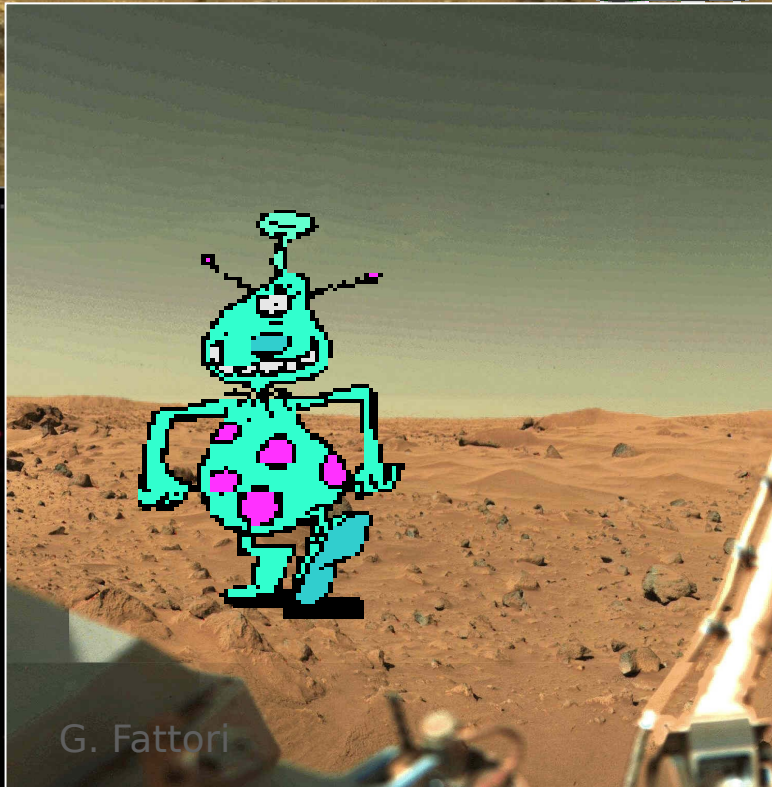
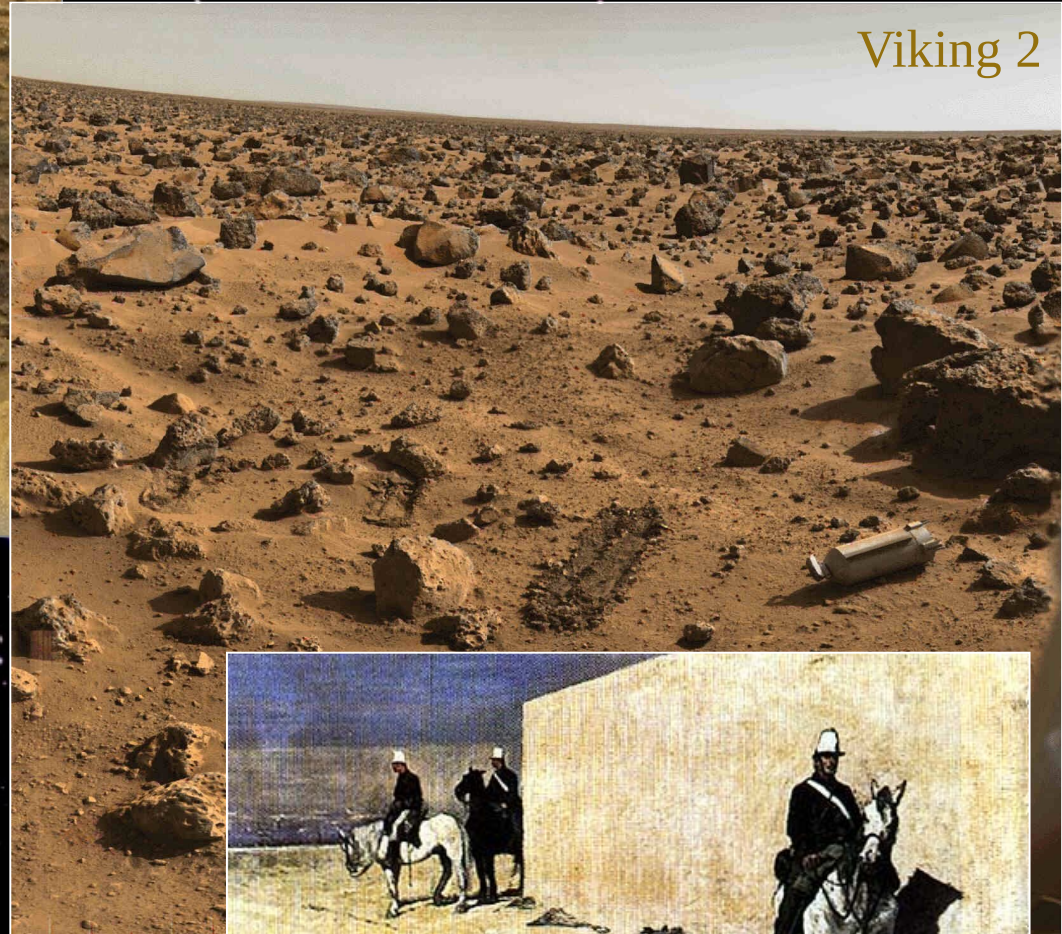
D.Velazquez

J.L. David

Первые марсианские панорамы



Viking 2



G. Fattori



G.Fattori

Spirit

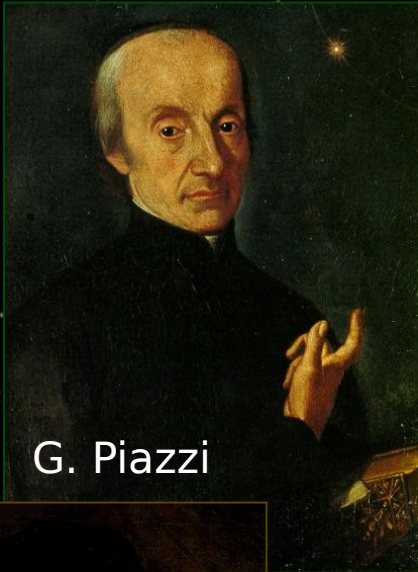


E.Hopper



Астероид Ida

Неиспользованный материал,
оставшийся от «строительства»
планет



G. Piazzi



K.F.
Gauss



Юпитер

Размер орбиты: 778 миллионов км

Период обращения: 11,9 лет

Период вращения: 9 часов и 51 минута

Диаметр: 142 984 км

Масса $1.9 \cdot 10^{27}$ кг

Химический состав: 75% H и 25% He



P.Veronese



D.Ingres

Сатурн

Размер орбиты: 1 429 миллиардов км

Диаметр: 121 000 км

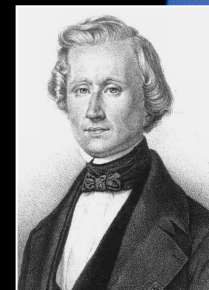
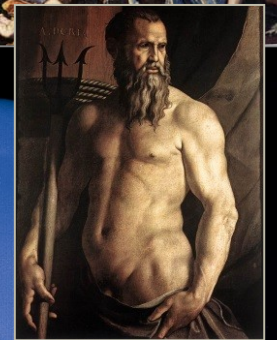
Масса $5.7 \cdot 10^{26}$ кг

Период вращения: 10 часов



Уран

(13 марта 1781)



Нептун

(23 сентября 1846)

Плутон

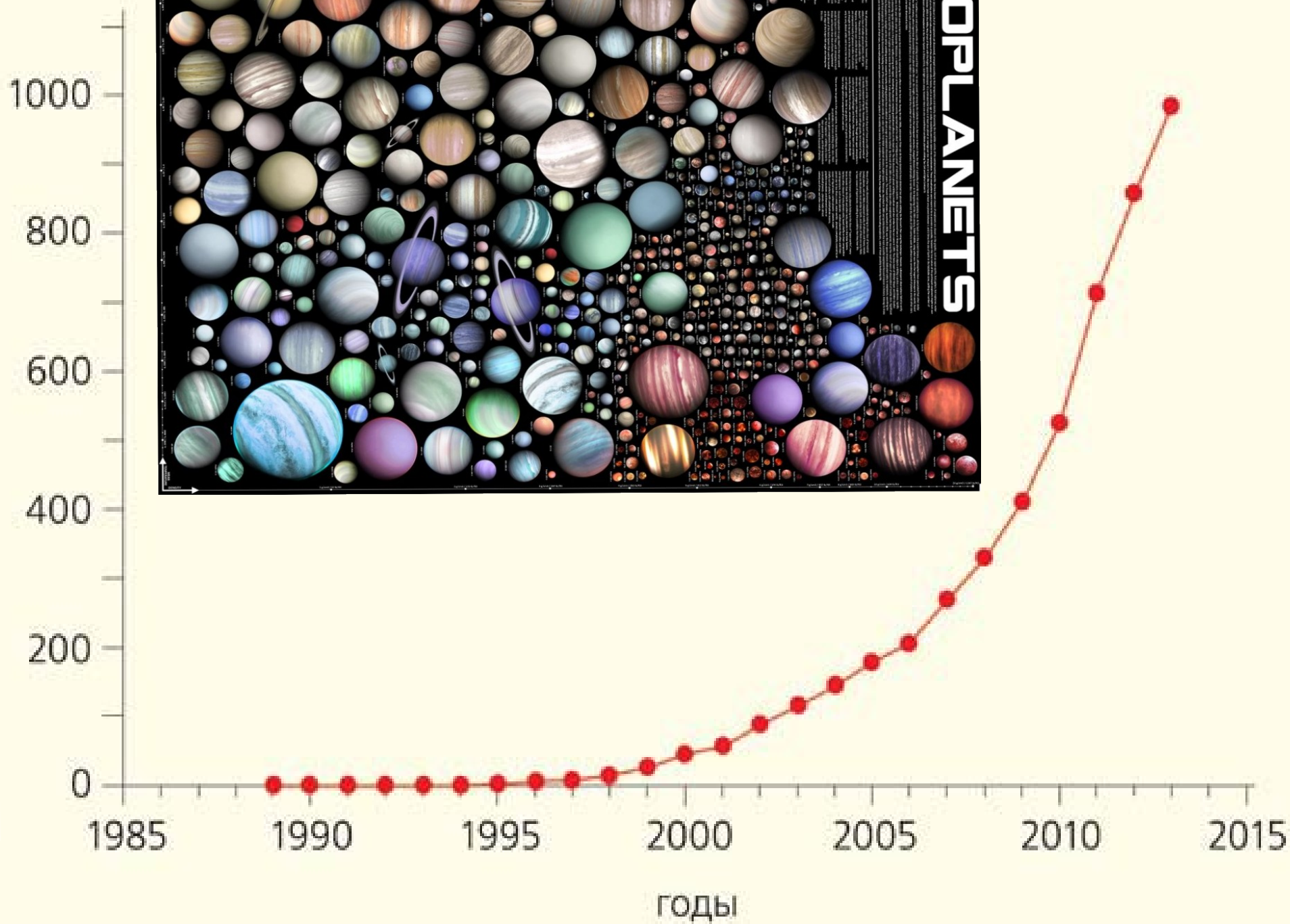
(23 января 1930)

1 спутник (Харон)



Другие планетные системы

Количество открытых экзопланетных систем



Галактики

Масса нашей спиральной галактики (Млечный путь или просто Галактика) – примерно 200 млрд солнечных масс



Звездные поля Млечного Пути, с газом, пылью и юными звездами



Звездные скопления

G.Pellizza da
Volpedo





Галактика
М87 в
созвездии
Дева

Галактика
М31 в
созвездии
Андромеда



Нерегулярная
карликовая
галактика в
созвездии Стрелец

Видимая Вселенная насчитывает
около 100 млрд галактик

Скопления галактик

← 100 000 св. лет →

Галактика состоит из сотен млрд звезд

← 30 млн св. лет →

Скопление галактик
состоит из сотен и тысяч
галактик

Сверхскопления галактик

Сверхскопление из тысяч галактик



На сверхбольших масштабах – начиная с **3 млрд св. лет** (100 Мпк)
– Вселенная становится однородной

Открытие и исследование крупномасштабной структуры

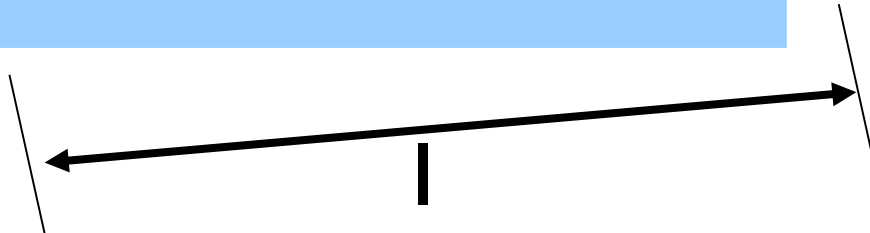
Вселенная однородна на больших масштабах. Масштаб перехода от неоднородности к однородности примерно 100 Мпк.

$$l > 100 \text{ Мпк}, \frac{\delta\rho}{\rho} < 1$$

$$l \ll 100 \text{ Мпк} \quad (l \approx 1 \text{ Мпк}), \frac{\delta\rho}{\rho} \gg 1$$

До эпохи доминирования
вещества контраст
плотности был очень мал:

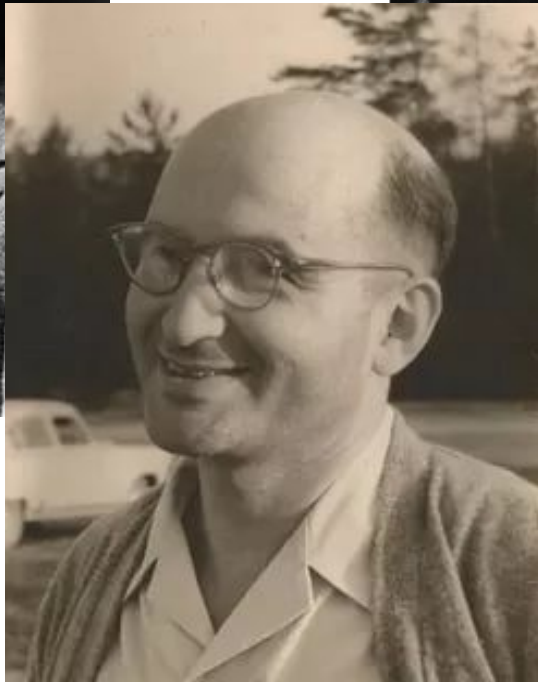
$$\frac{\delta\rho}{\rho} \leq 10^{-4}$$



Небольшие неоднородности вещества существовали на ранних стадиях эволюции Вселенной – именно они и развились в тот большой контраст плотности (скопления галактик, галактики, планетные системы), который мы сегодня наблюдаем.

Неоднородности плотности вещества возникают из-за гравитационной неустойчивости и формируют **крупномасштабную структуру Вселенной**.

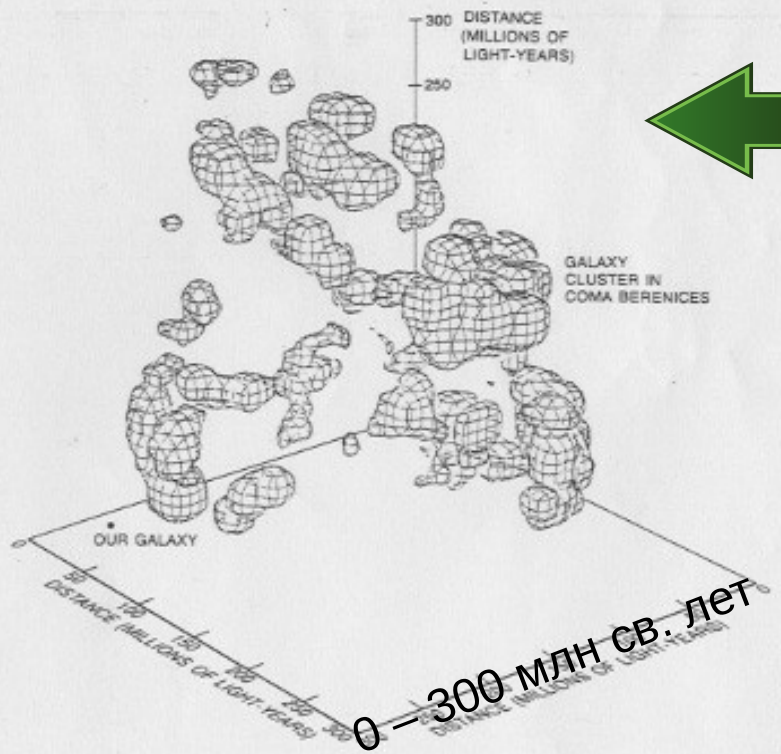
Основоположники теории эволюции космологических возмущений плотности: Д. Джинс, Е.М. Лифшиц, Я.Б. Зельдович, Д. Пиблс и др.



“ТЕОРИЯ БЛИНОВ” Я.Б. ЗЕЛЬДОВИЧА

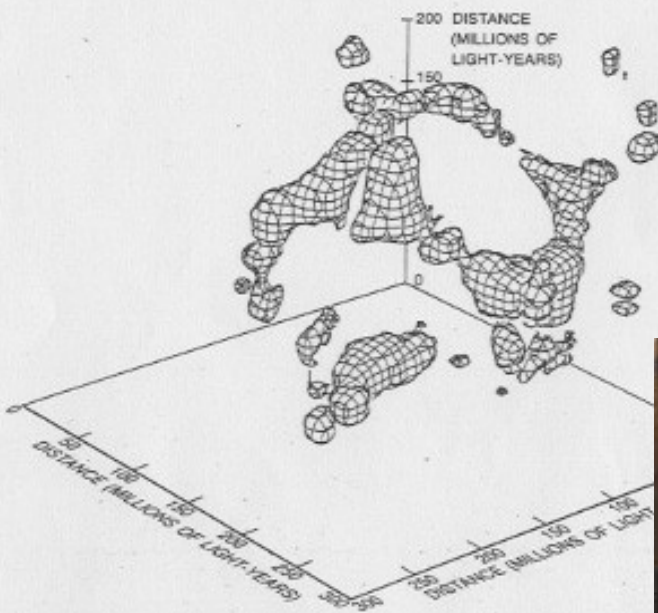
Если в молодой и почти однородной Вселенной малые возмущения плотности и скорости не обладали сферической симметрией (в природе идеальной симметрии не бывает), то по мере их роста под действием гравитации отклонения формы от сферической будут возрастать. В конце концов, образовавшиеся объекты сформируют трехмерные структуры с тремя неравными поперечными размерами, причем один из этих размеров должен быть значительно меньше двух других. Такие структуры напоминают блины.

Наблюдаемое скопление
галактик в созвездии Волосы
Вероники



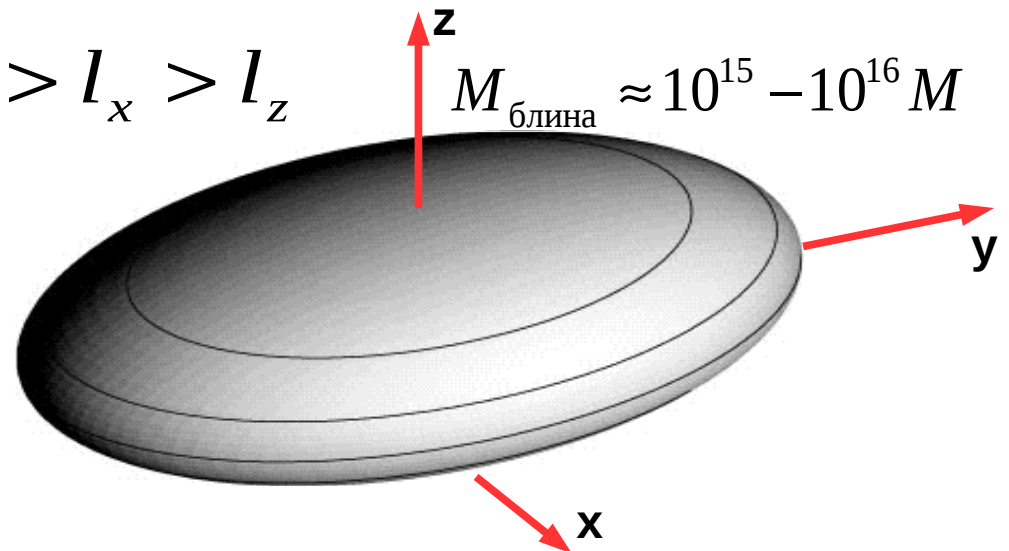
0 – 300 млн св. лет

Моделирование вида скопления
галактик на основе “модели блинов”
Я.Б. Зельдовича



$$l_y > l_x > l_z$$

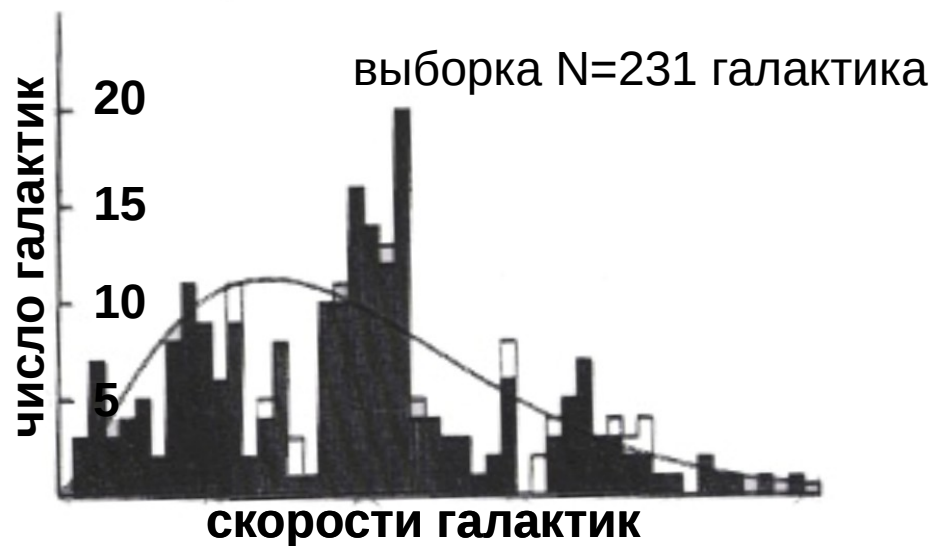
$$M_{\text{блина}} \approx 10^{15} - 10^{16} M$$



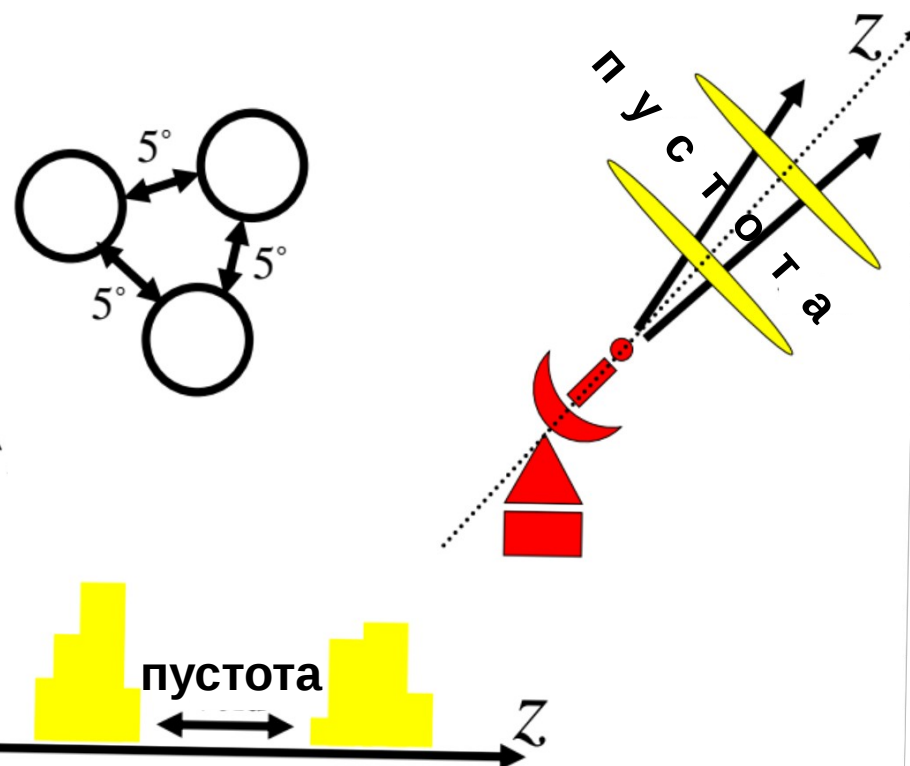
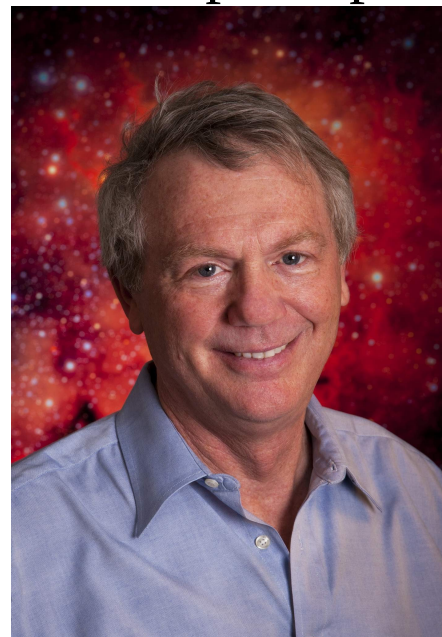
Предсказания “теории блинов” подтвердились следующими наблюдениями (Киршнер и др., 1981 г.).

На небе было выбрано три поля галактик, отстоящие друг от друга на угловое расстояние примерно 5 градусов. В каждом из полей было посчитаны галактики (сначала использовались 133 галактики, затем 231) и измерены их красные смещения, т.е. расстояния до них.

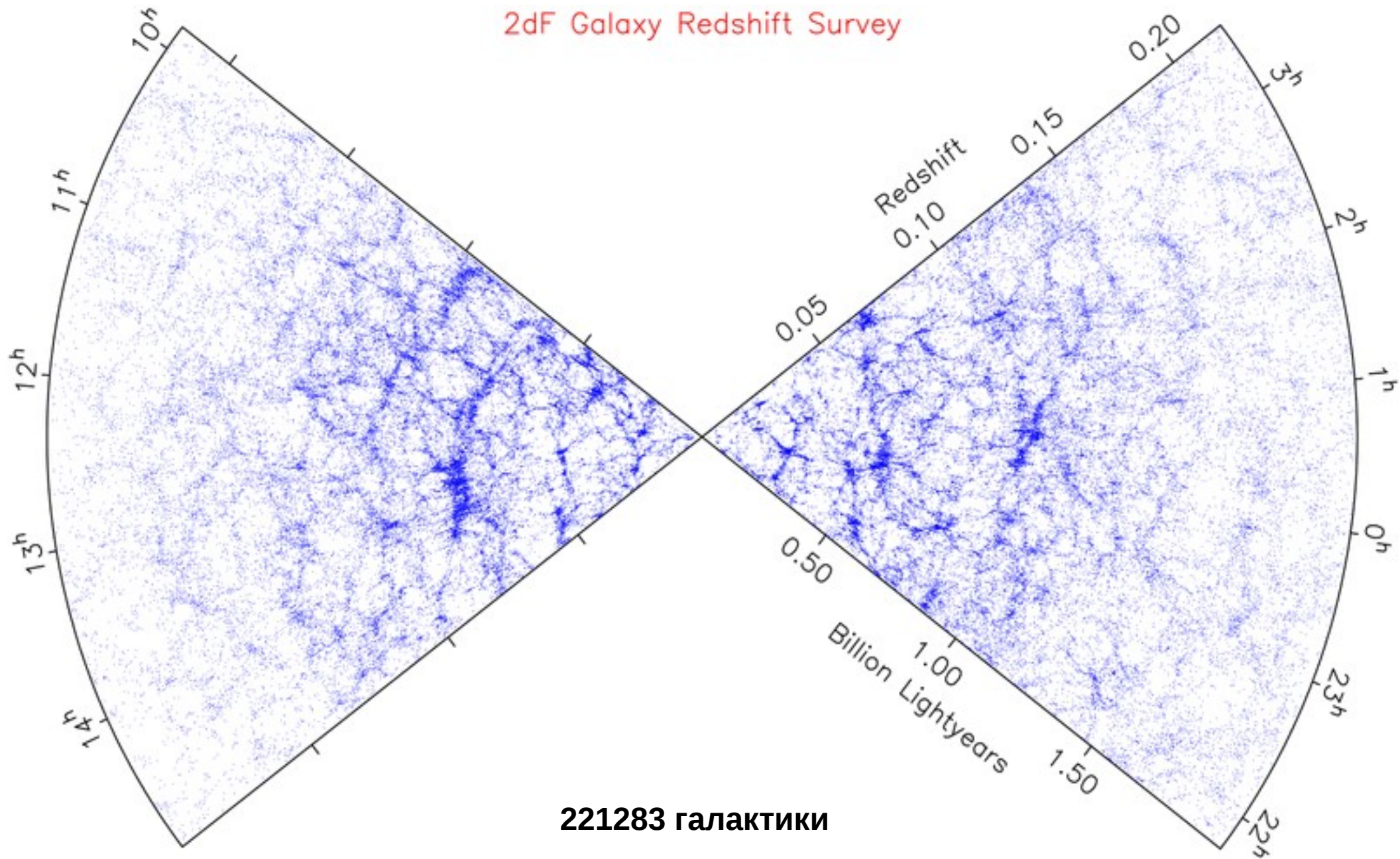
Распределение зависимости числа галактик от расстояния до них демонстрировало два четко выраженных пика, разделенных почти пустым пространством, причем пики для разных полей совпали. То есть прямые вдоль луча зрения проткнули два ``блина” крупномасштабной структуры Вселенной.



Р. Киршнер и др., 1981 г.



2dF Galaxy Redshift Survey



221283 галактики

Наблюдательное подтверждение крупномасштабной структуры

Темная материя как основа формирования крупномасштабной структуры

Возмущения плотности вещества в ранней Вселенной порождают характерные неоднородности реликтового излучения, самого ``древнего" света, родившегося в эпоху разделения вещества и излучения (на расстоянии, соответствующему красному смещению $z=1000$).

Такая анизотропия реликтового излучения была открыта в 1992 г. (советским спутником ``Реликт" и американским спутником COBE), а в 1980 г. был известен только ее верхний предел, который позволял вычислить верхний предел и на возмущения плотности для красного смещения $z=1000$.

Парадокс заключался в том, что эти начальные возмущения плотности, даже равные по величине верхнему пределу, не успели бы сжаться под действием собственных гравитационных сил так, чтобы к сегодняшнему моменту времени сформировать наблюдаемые структуры: галактики, скопления галактик, звезды и планеты.

Темная материя как основа формирования крупномасштабной структуры

Темная материя (в данном случае, массивные нейтрино) решила этот парадокс, потому что начала сжиматься раньше обычной – барионной – материи. Следовательно, рост возмущений плотности, не меняя величину анизотропии, тоже начался гораздо раньше, чем при красном смещении $z=1000$.

Таким образом, на масштабах скоплений галактик сначала произошел рост возмущений плотности темной материи, а потом эти области стали гравитационно притягивать обычное вещество, послужив, тем самым, зародышами крупномасштабной структуры. К моменту, когда красное смещение стало равным $z=10$, что соответствует возрасту Вселенной около 0.5 млрд. лет, возмущения плотности обычного вещества стали достаточно большими для процесса образования скоплений галактик, галактик и других более мелких структур.

ЛЕКЦИЯ 9

Распространенность легких химических элементов. Образование химических элементов в звездах

