

# Наблюдательные основы космологии

## ЛЕКЦИЯ 7

### Иерархия объектов во Вселенной.

### Крупномасштабная структура Вселенной

д.ф.-м.н. Сажина Ольга Сергеевна

[cosmologia@yandex.ru](mailto:cosmologia@yandex.ru)



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

МФК-2020/2021

# Программа курса

**ЛЕКЦИЯ 1. Предмет науки космологии. Расширение Вселенной**

**ЛЕКЦИЯ 2. Поиск темной материи методами наблюдательной космологии.**

**Гравитационное линзирование (ЧАСТЬ I)**

**ЛЕКЦИЯ 3. Поиск темной материи методами наблюдательной космологии.**

**Гравитационное линзирование (ЧАСТЬ II)**

**ЛЕКЦИЯ 4. Темная энергия в ранней Вселенной и в современной Вселенной: теория инфляции и ускоренное расширение современной Вселенной**

**ЛЕКЦИЯ 5. Микроволновое фоновое реликтовое излучение и его анизотропия (ЧАСТЬ I)**

**ЛЕКЦИЯ 6. Микроволновое фоновое реликтовое излучение и его анизотропия (ЧАСТЬ II)**

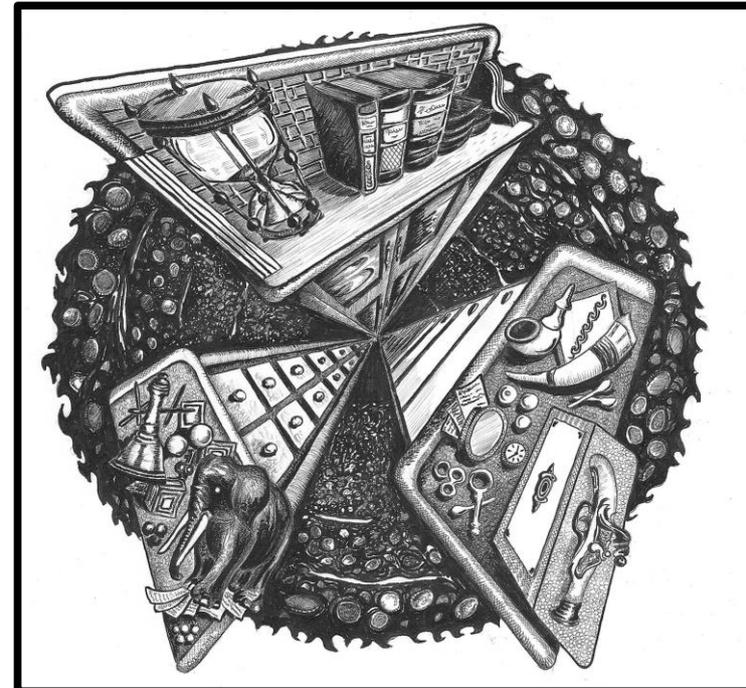
**ЛЕКЦИЯ 7. Иерархия объектов во Вселенной.**

**Крупномасштабная структура Вселенной**

**ЛЕКЦИЯ 8. Распространенность легких химических элементов. За пределами Стандартной модели физики частиц**

**ЛЕКЦИЯ 9. Гравитационные волны. Открытие гравитационных волн в двойных системах черных дыр и нейтронных звезд. Поиск космологических гравитационных волн**

**ЛЕКЦИЯ 10. Космические струны**



# Пять ключевых наблюдательных тестов Стандартной космологической модели

1. Расширение Вселенной

2. Реликтовое излучение

3. Крупномасштабная структура Вселенной

4. Распространенность легких химических элементов

5. Анизотропия реликтового излучения

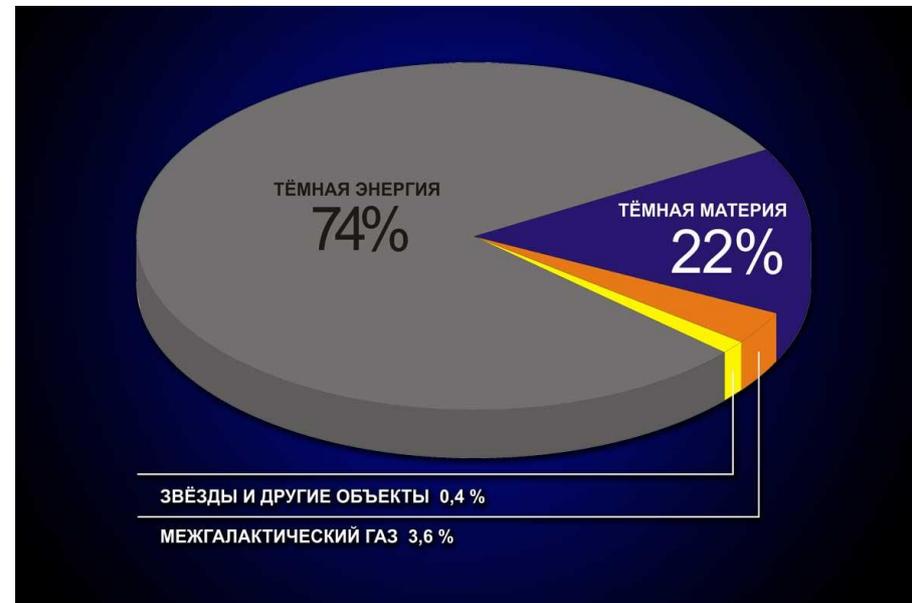
**$\Lambda$ CDM**

6\*. Темная материя

7\*. Темная энергия

8\*. *Космологические*

*гравитационные волны?*



**Крупномасштабная структура Вселенной – это строение Вселенной на масштабах, существенно превышающих размеры отдельных галактик, т. е. от нескольких до сотен мегапарсек.** Отдельные галактики являются «пробными частицами» космологии. Объекты меньших размеров в космологии не рассматриваются.

В крупномасштабной структуре Вселенной выделяют **скопления и сверхскопления галактик, филаменты (нити, цепочки или «блины»),** а также **«стенки» и войды (пустоты).**

Такое распределение вещества было предсказано в работах советских космологов Я. Б. Зельдовича, А. Г. Дорошкевича и С. Ф. Шандарина в 1970-х гг.

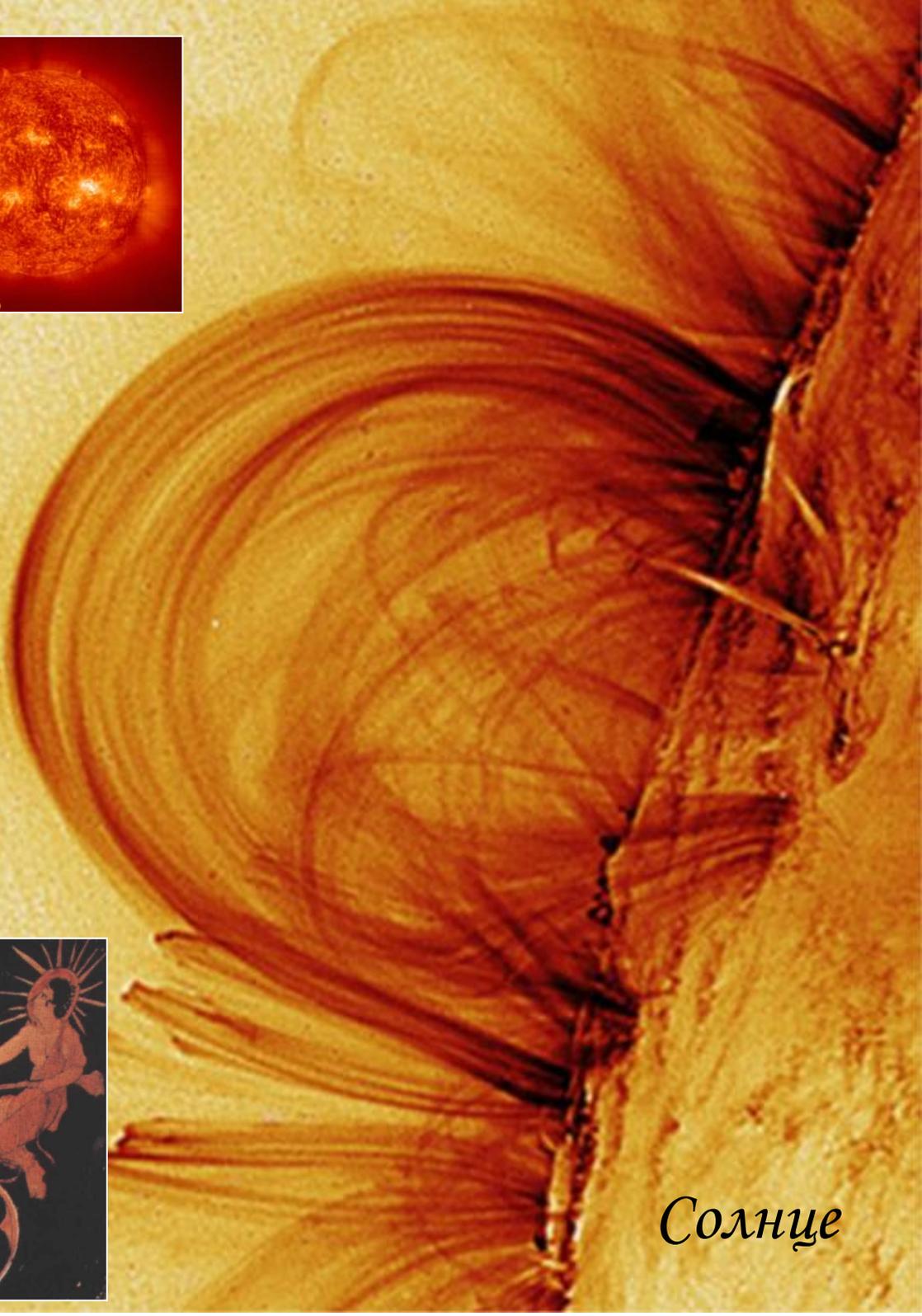
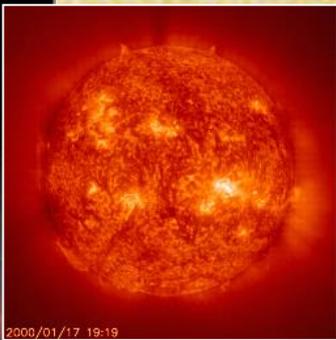
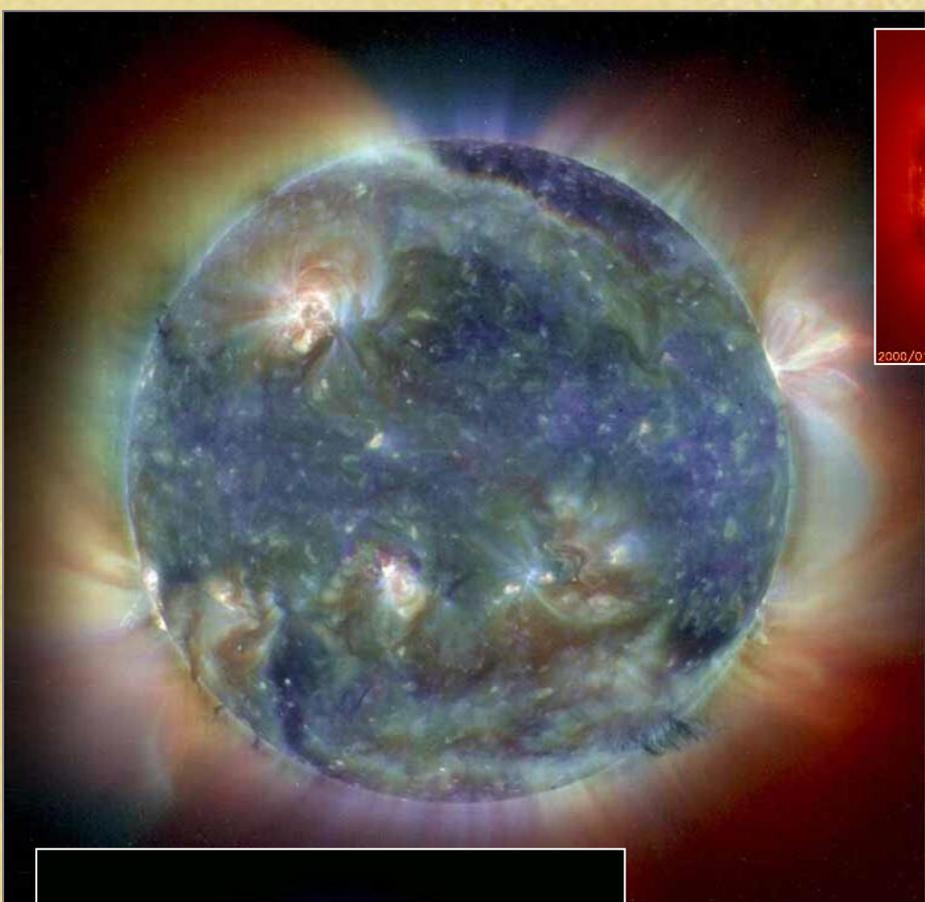
Крупномасштабная структура Вселенной была открыта в конце 1970-х и 1980-х гг. эстонскими астрономами под руководством Я. Э. Эйнасто, а также американскими астрономами под руководством Р. Киршнера.

# Иерархия всех космических структур во Вселенной:

1. Планетные системы и мелкие космические тела
2. Звездные скопления
3. Карликовые и малые галактики
4. Галактики
5. Группы галактик
6. Скопления галактик
7. Сверхскопления галактик
8. Стенки (протяженные структуры, состоящие из групп, скоплений и сверхскоплений галактик)

# Солнце и планеты солнечной СИСТЕМЫ

(автор слайдов о Солнечной системе: проф. Массимо Капаччиоли)

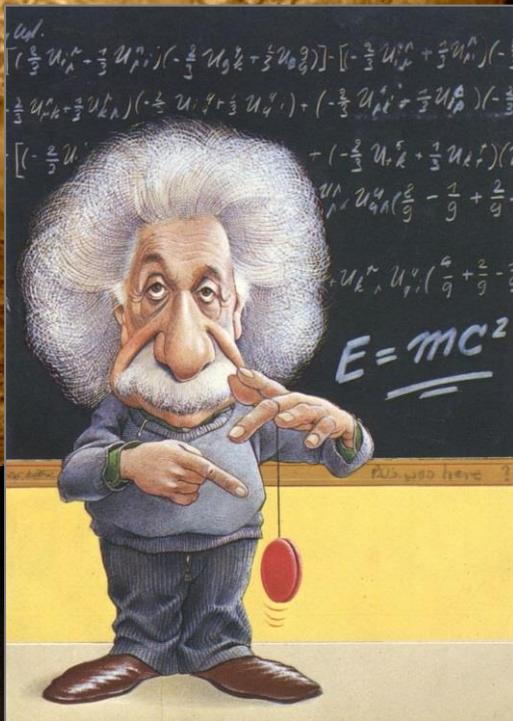


Солнечная корона



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<sup>3</sup> 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

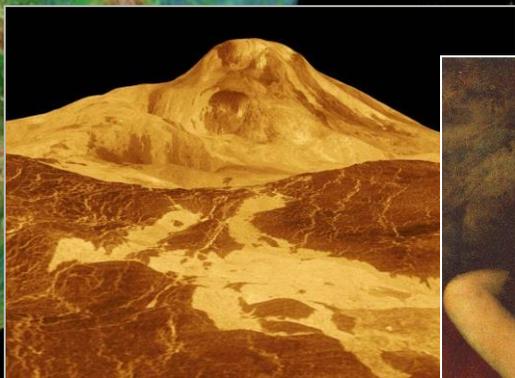
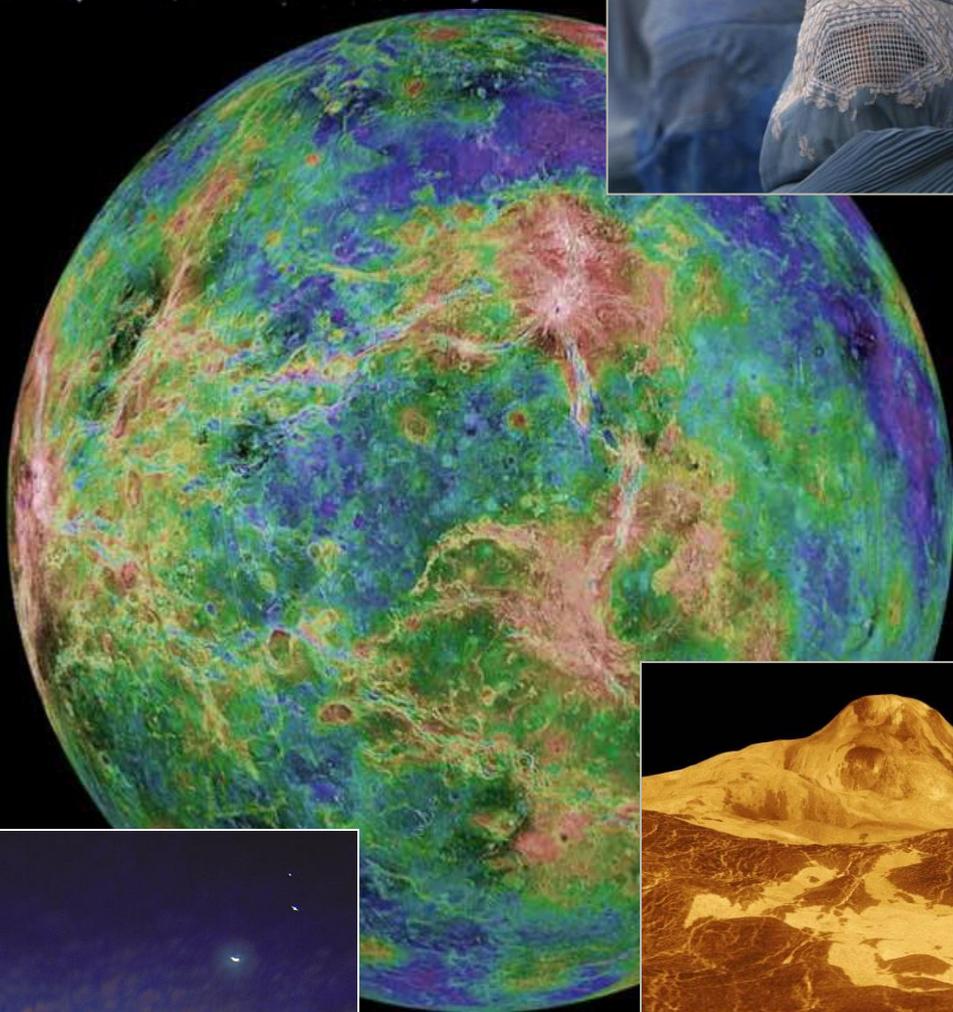
Период вращения: 243 дней

Близнец Земли (с юной поверхностью)

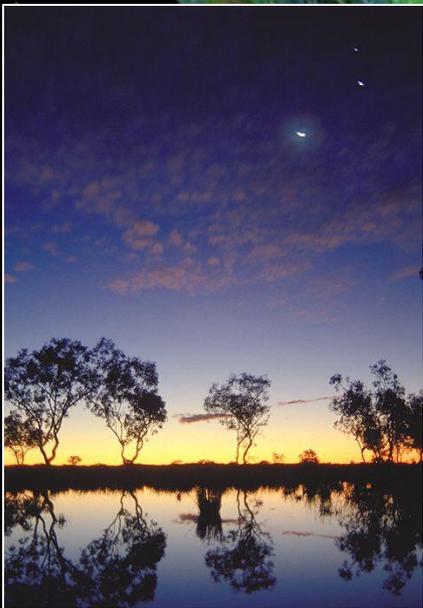
Покрыта облаками: создают эффект теплицы

Температура: от 400 до 740 °К

Ветры на высоте: 350 км/ч



Giorgione



*Земля*

*восход  
Солнца*



*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 °К

Период вращения: 243 дней

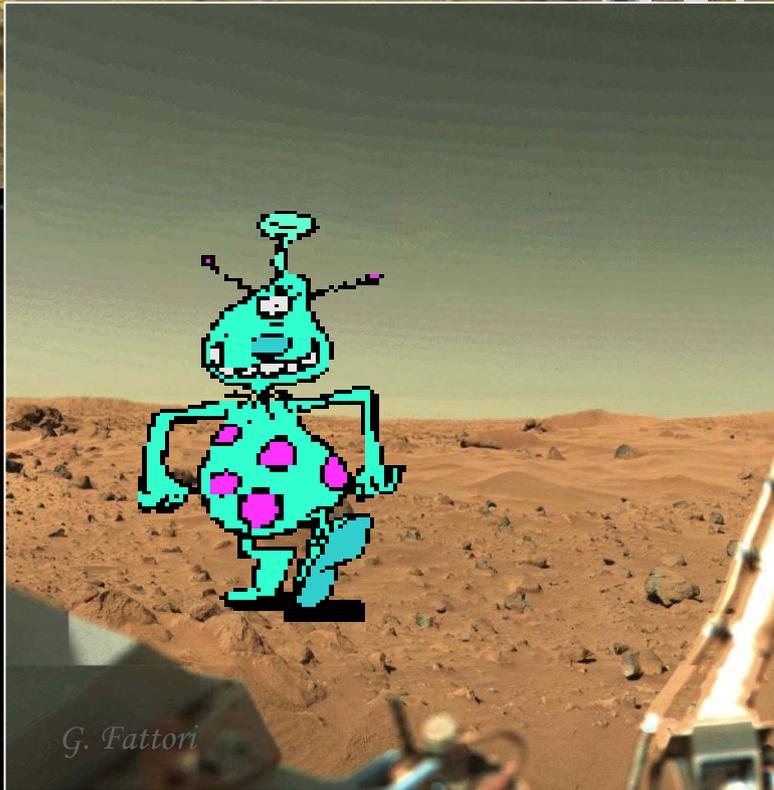
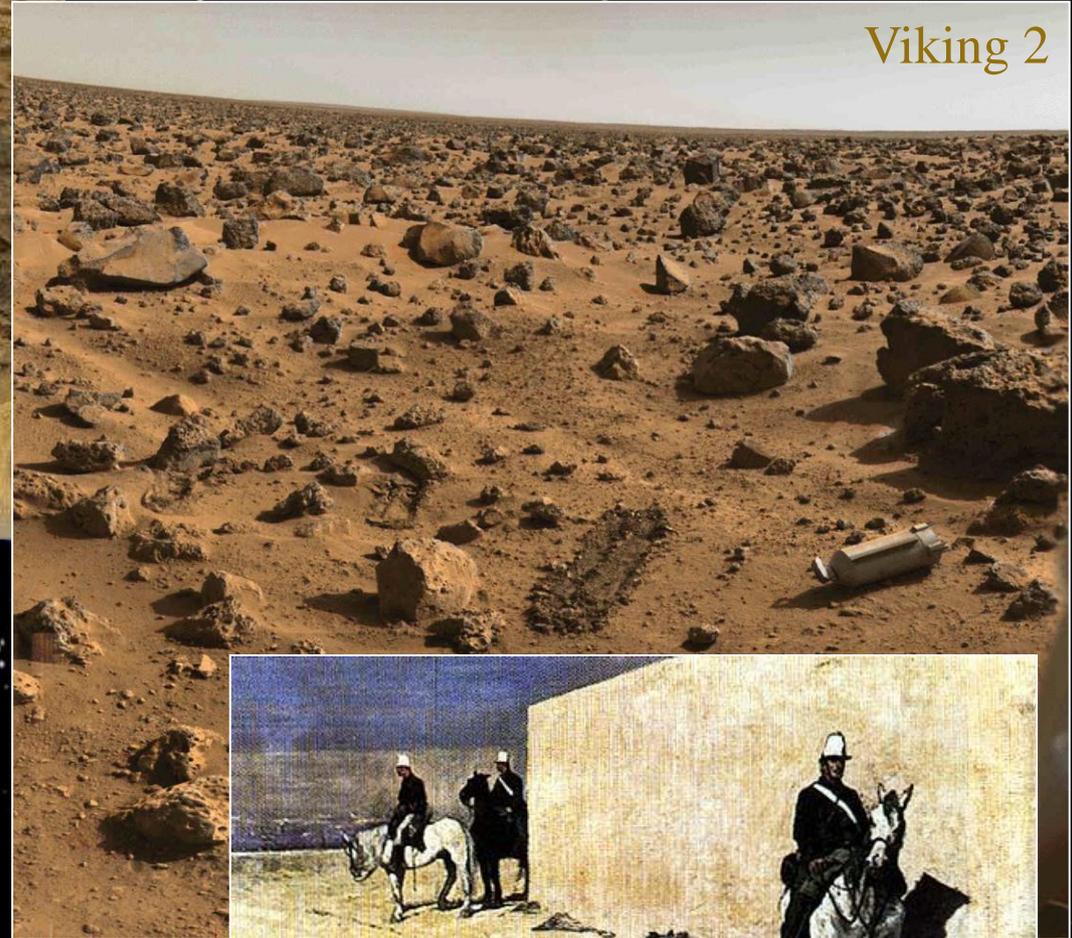
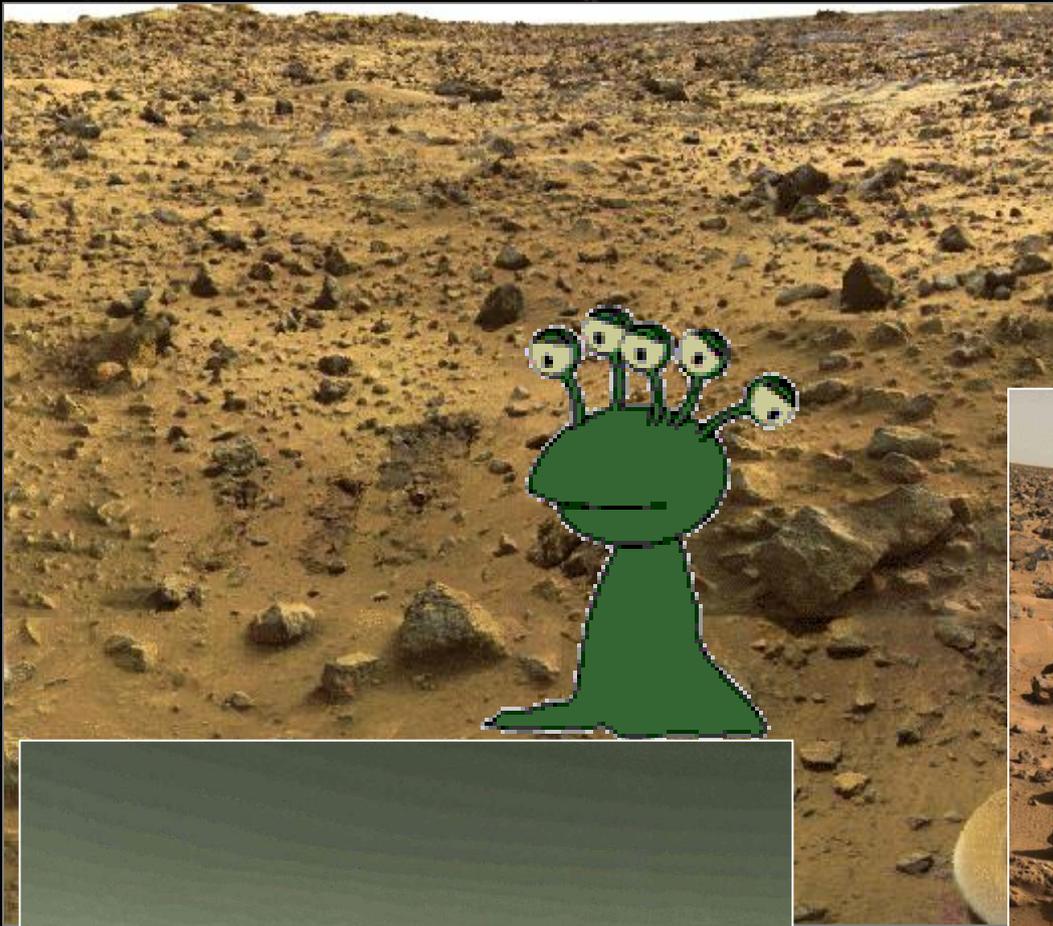
Атмосфера состоит из  $\text{CO}_2$



*D. Velazquez*

*J.L. David*

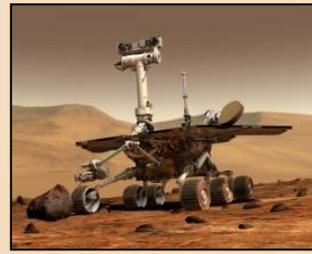
*Первые марсианские панорамы*



*G. Fattori*

*G. Fattori*

Spirit

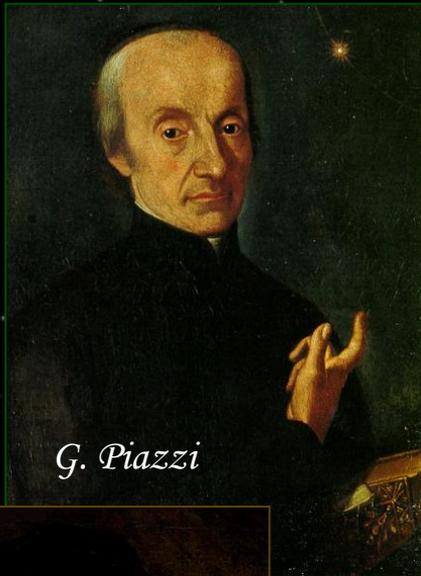


*E. Hopper*



*Астероид Ида*

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

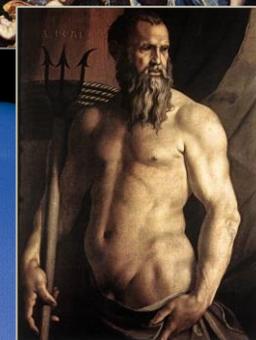
Масса  $5.7 \cdot 10^{26}$  кг

Период вращения: 10 часов



# Уран

(13 марта 1781)



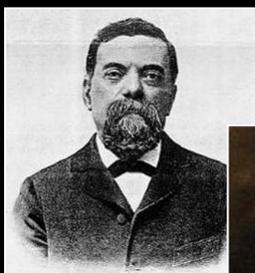
# Нептун

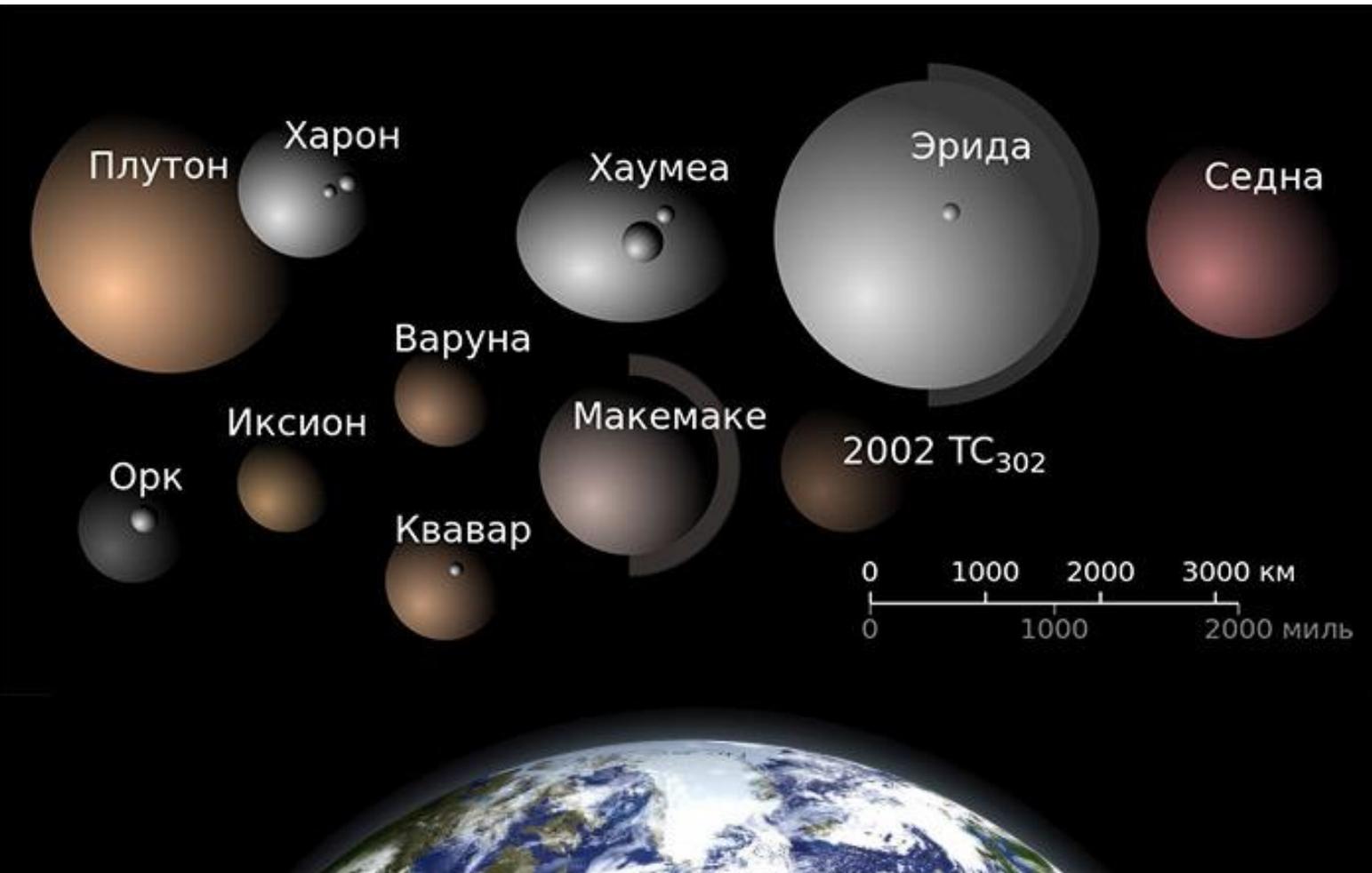
(23 сентября 1846)

# Плутон

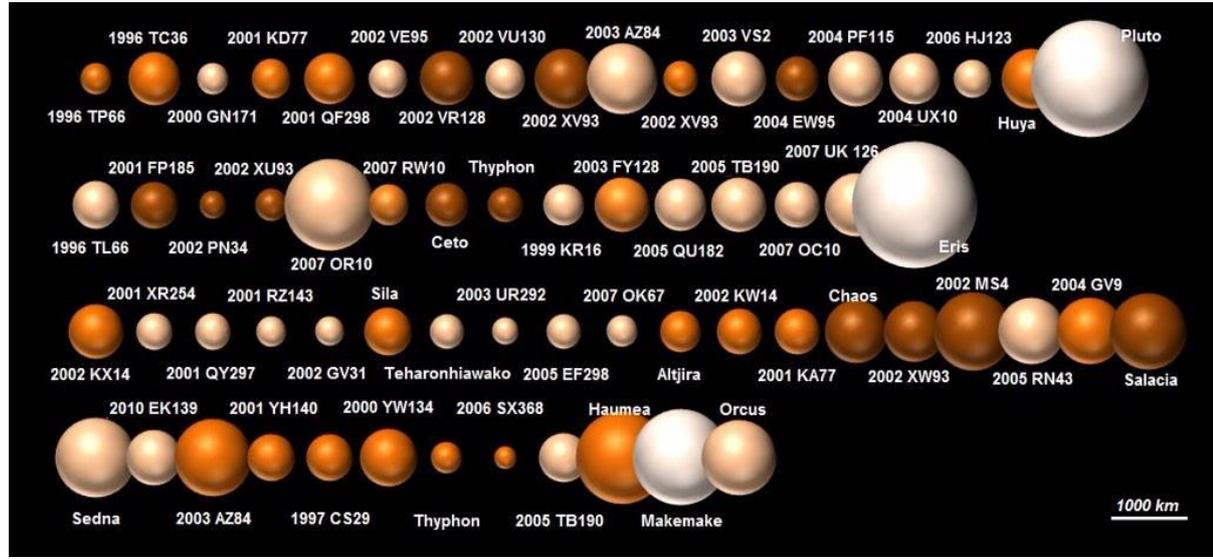
(23 января 1930)

1 спутник (Харон)





# Транснептуновые объекты (пояс Койпера)



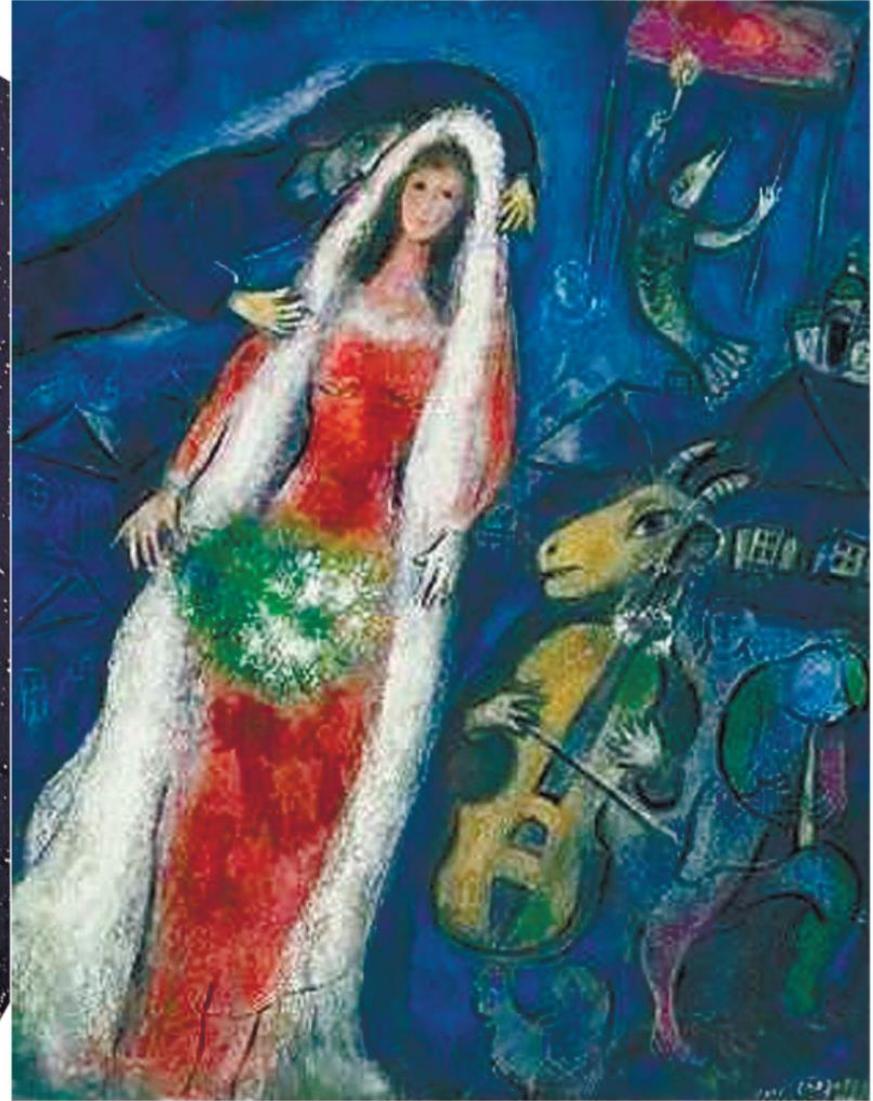
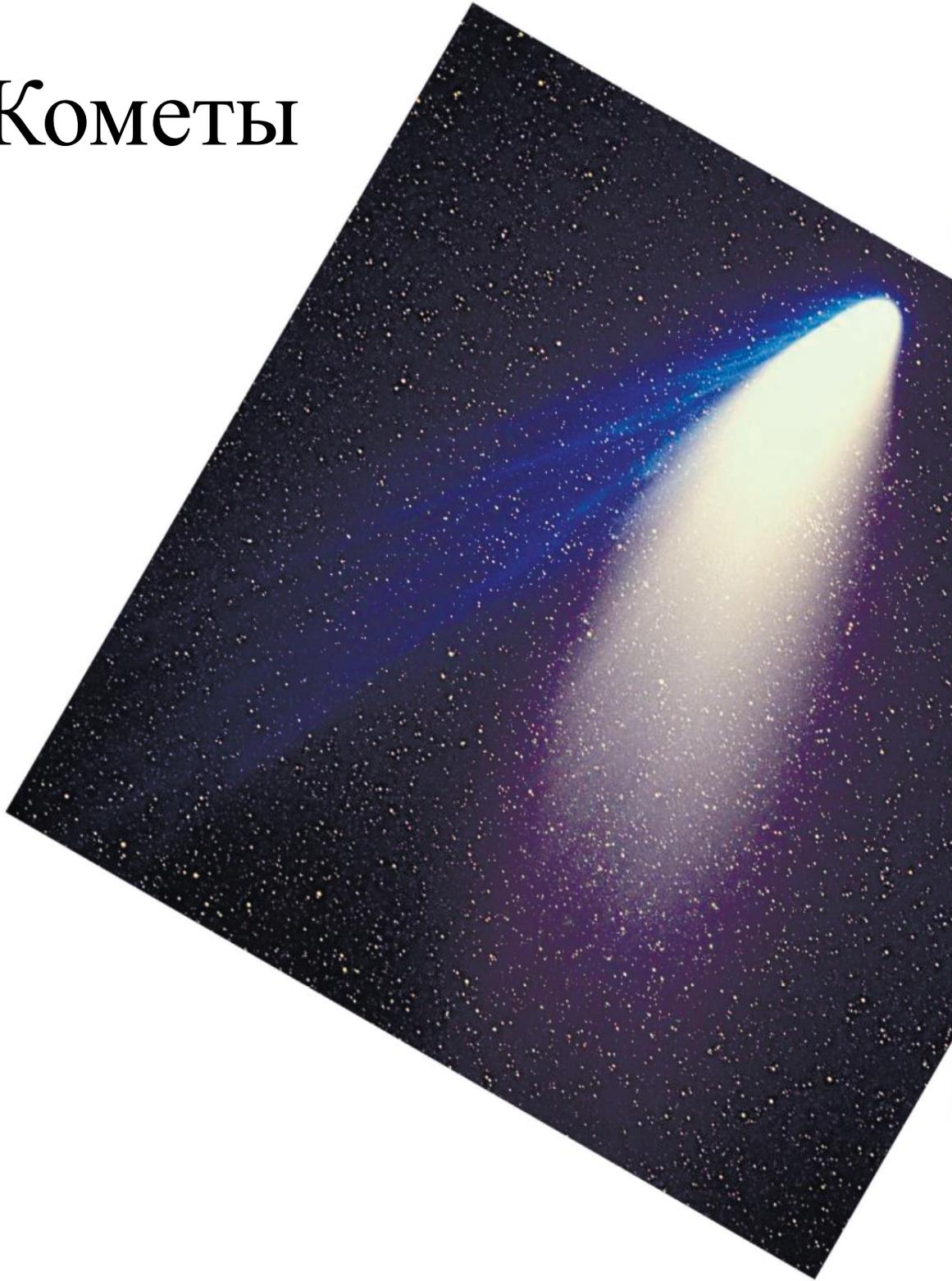
Само Облако не наблюдается.  
Является источником комет с малыми скоростями



# КОМЕТЫ

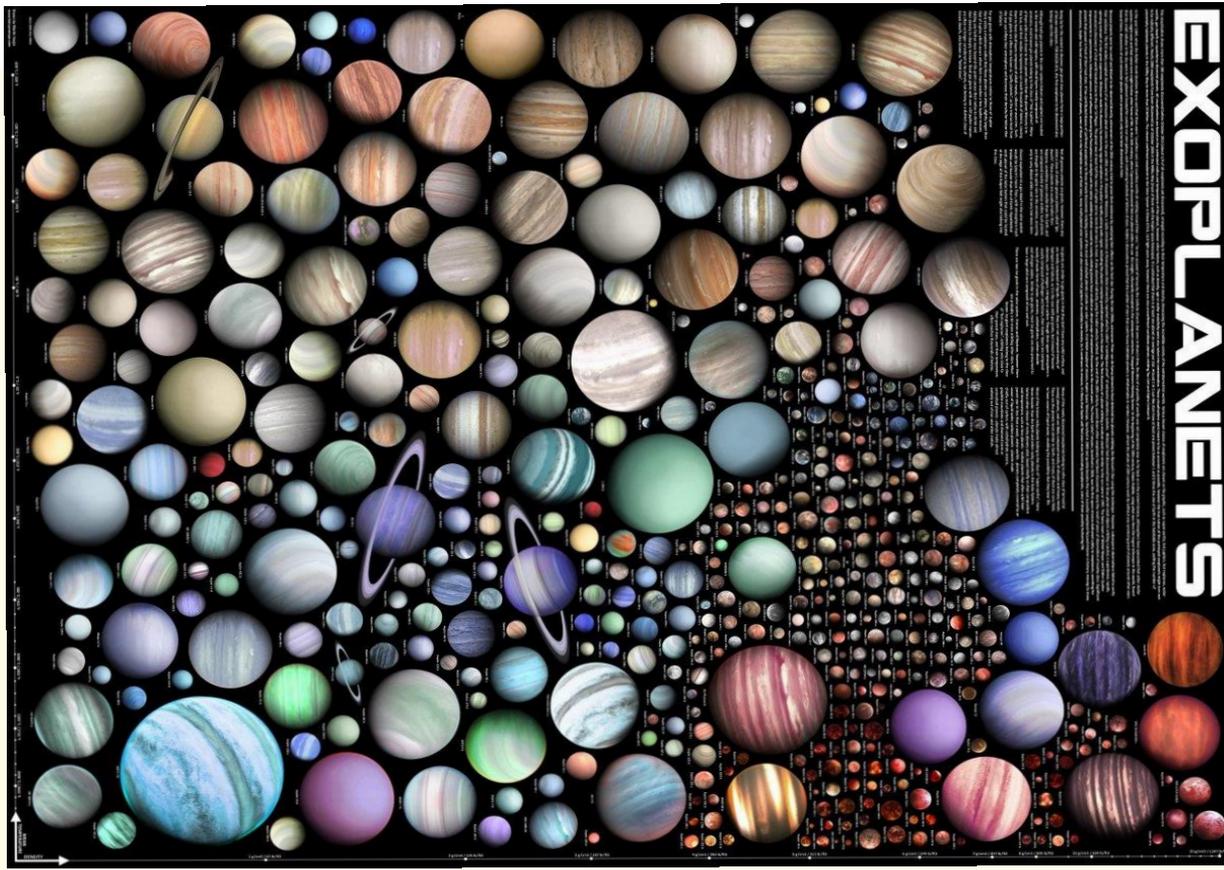
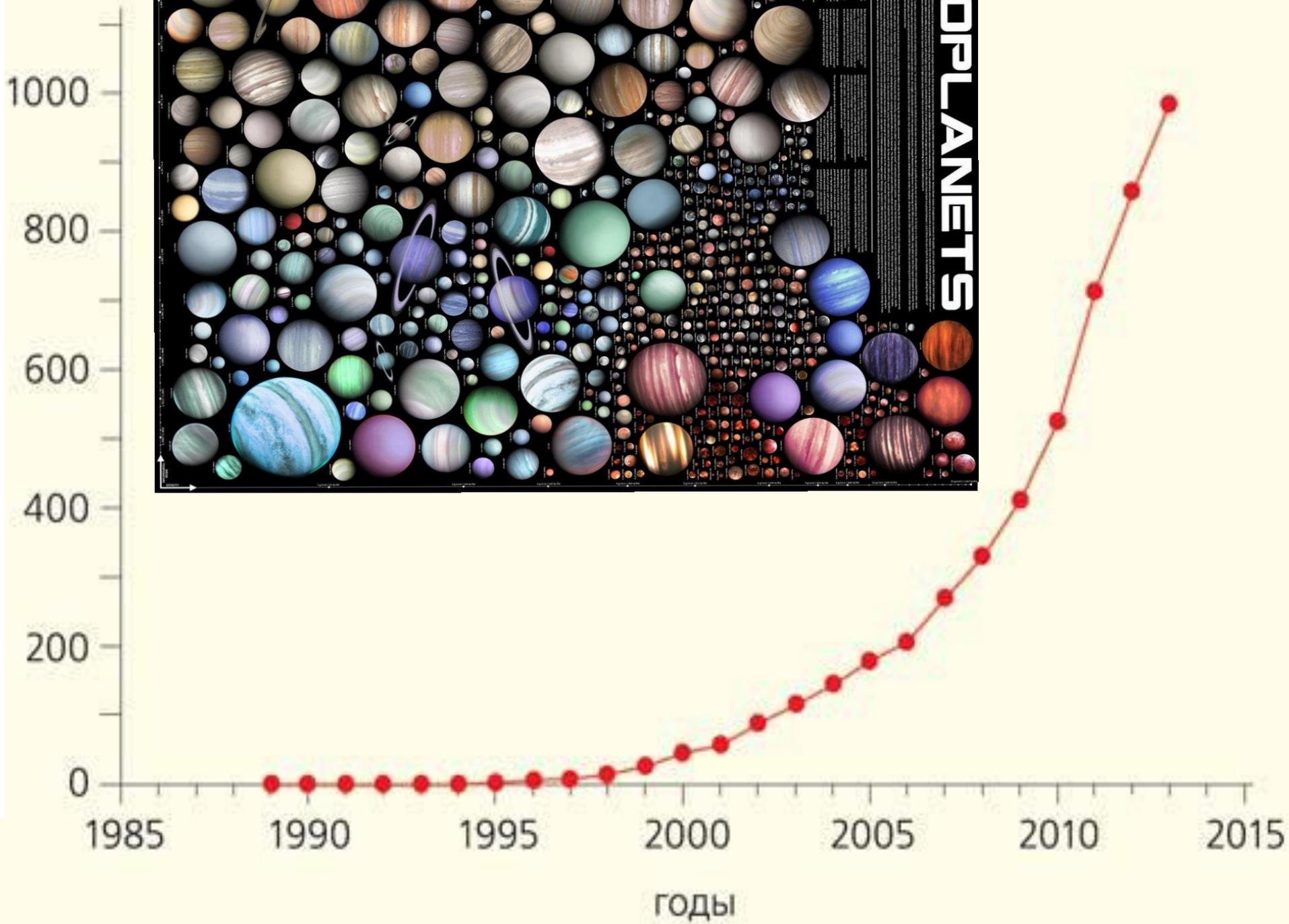


# КОМЕТЫ



# Другие планетные системы

Количество открытых экзопланетных систем



## Экзотические экзопланеты

OGLE-2016-BLG-1928 – одиночная планета земной массы. Обнаружена с помощью микролинзирования. От 0.3 (если в диске Галактики) до 2 масс Земли (если в балдже Галактики). Бродячая планета.

Планета у белого карлика. Сама планета больше звезды в 7-14 раз, транзитный гигант.

# Звездные скопления

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

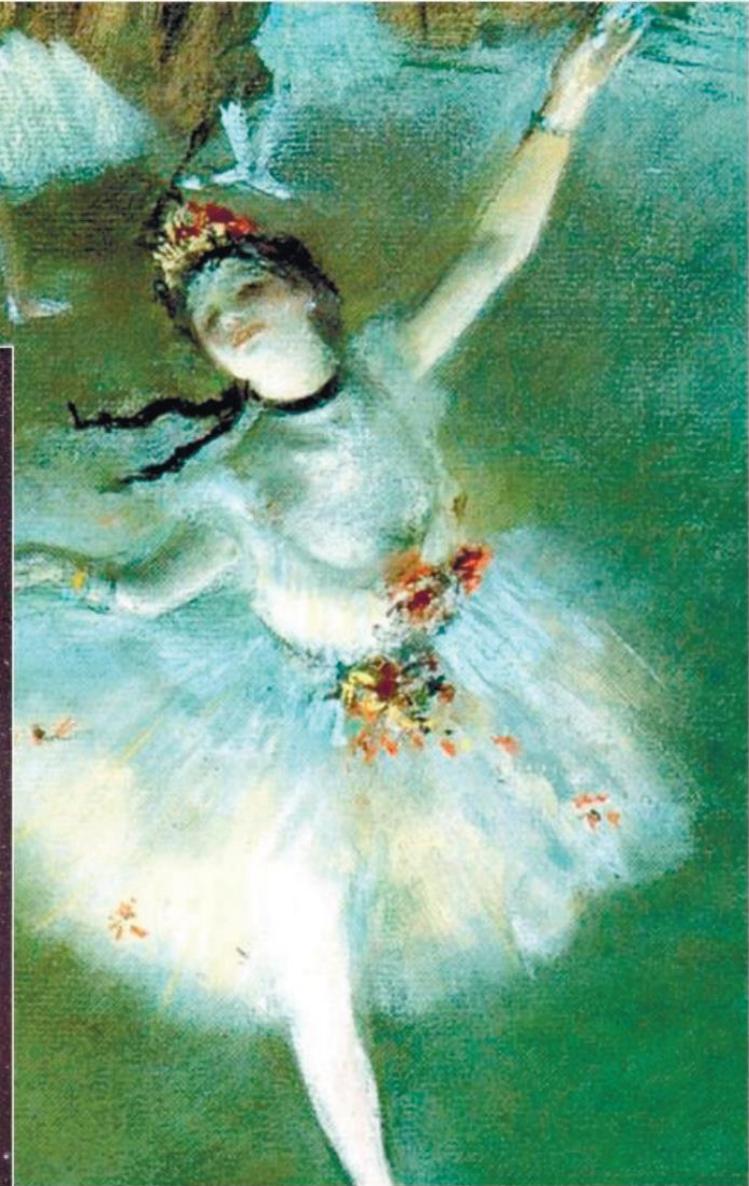


# Звездообразование



Massimo Capaccioli  
**The Beauty and the Universe**  
An emotional journey amongst  
images and ideas

# Звездообразование



Massimo Capaccioli  
**The Beauty and the Universe**  
An emotional journey amongst  
images and ideas

# Звездообразование



Massimo Capaccioli  
**The Beauty and the Universe**  
An emotional journey amongst  
images and ideas

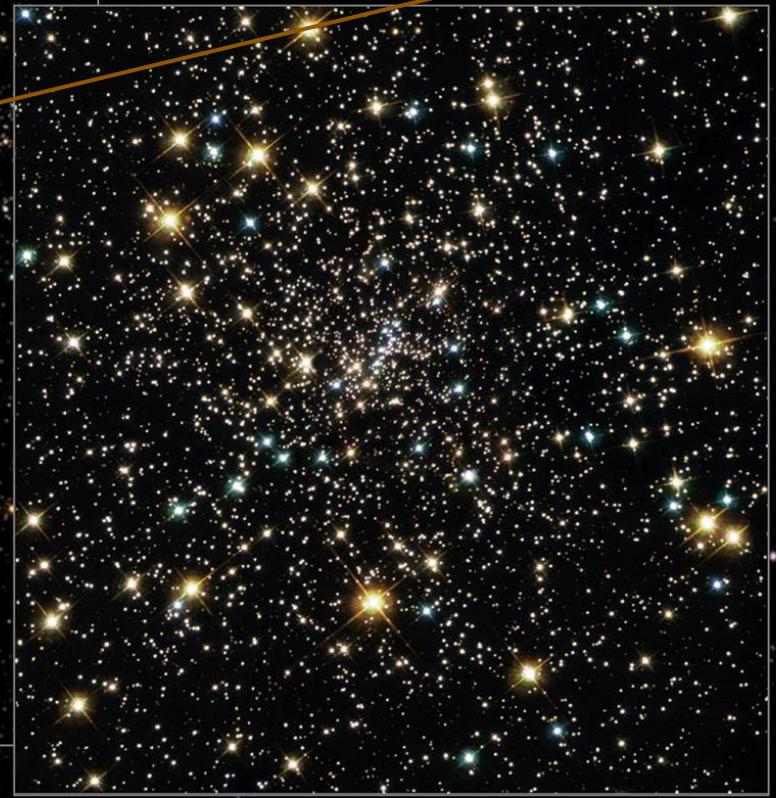
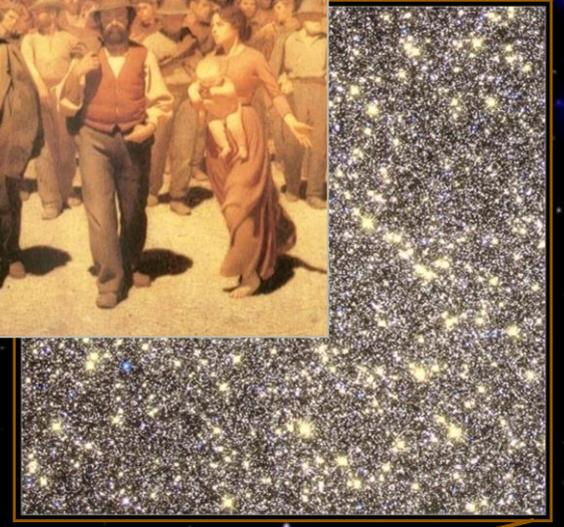
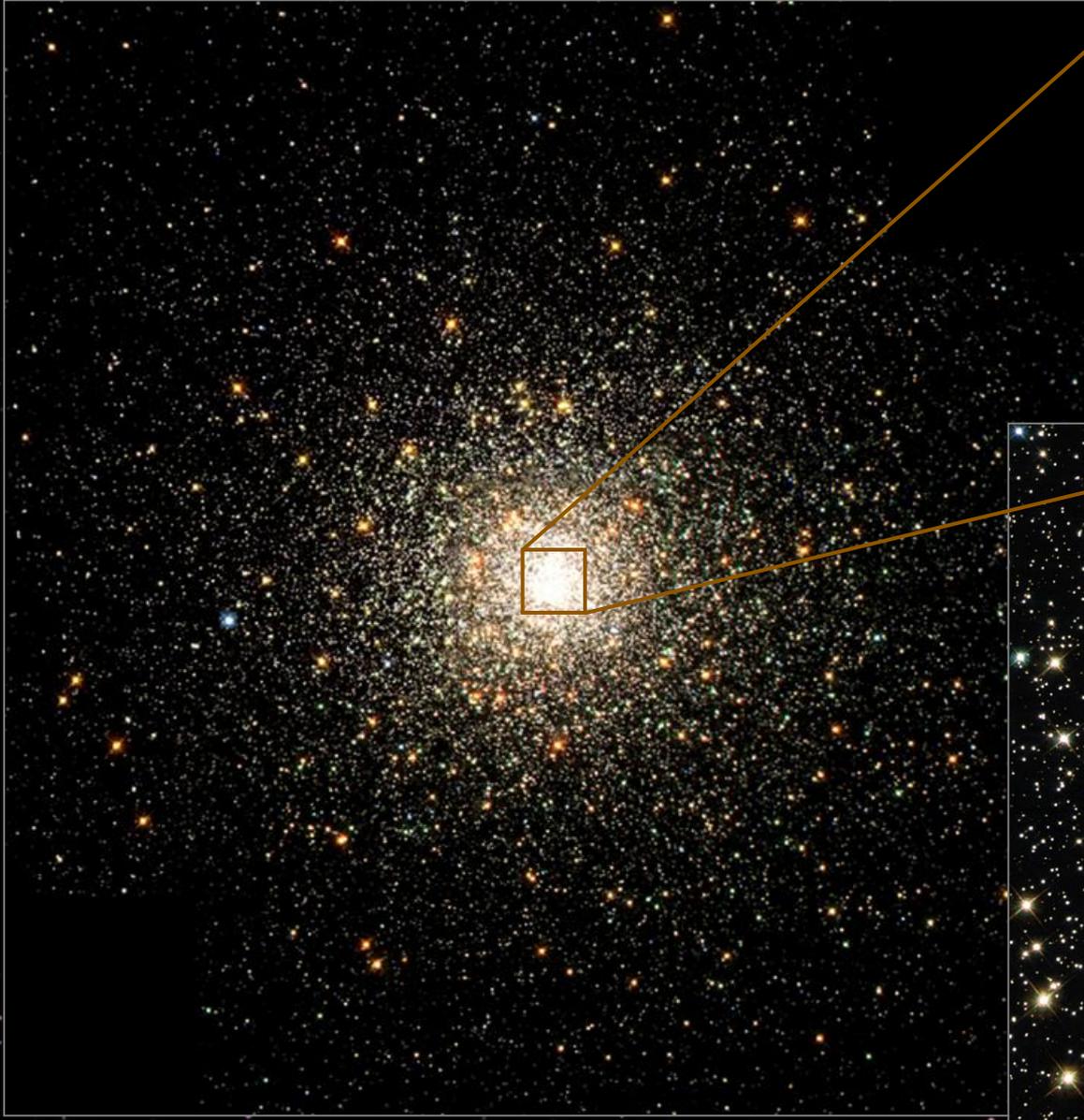
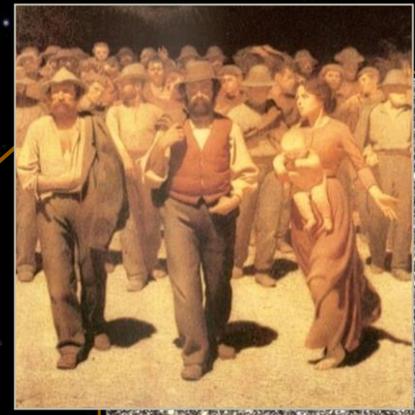
# Звездообразование



Massimo Capaccioli  
**The Beauty and the Universe**  
An emotional journey amongst  
images and ideas

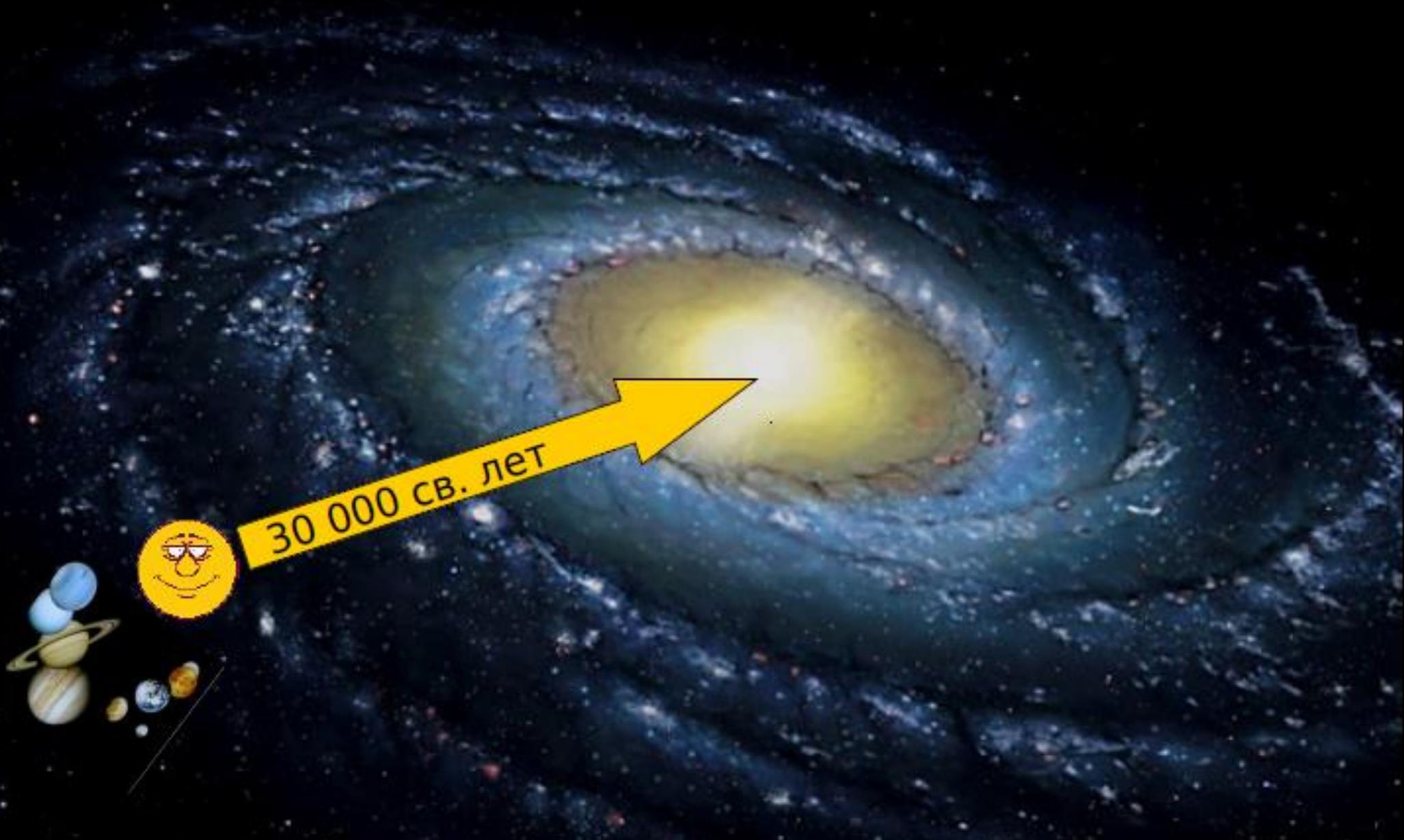
# Звездные скопления

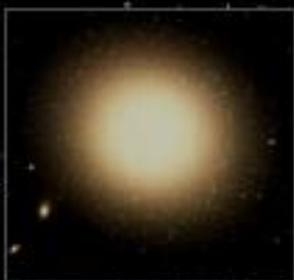
G. Pellizza da Volpedo



# Галактики

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





Галактика  
M87 в  
созвездии  
Дева

Галактика  
M31 в  
созвездии  
Андромеда



Нерегулярная  
карликовая  
галактика в  
созвездии Стрелец

Видимая Вселенная насчитывает  
около 100 млрд галактик

# Взаимодействие галактик

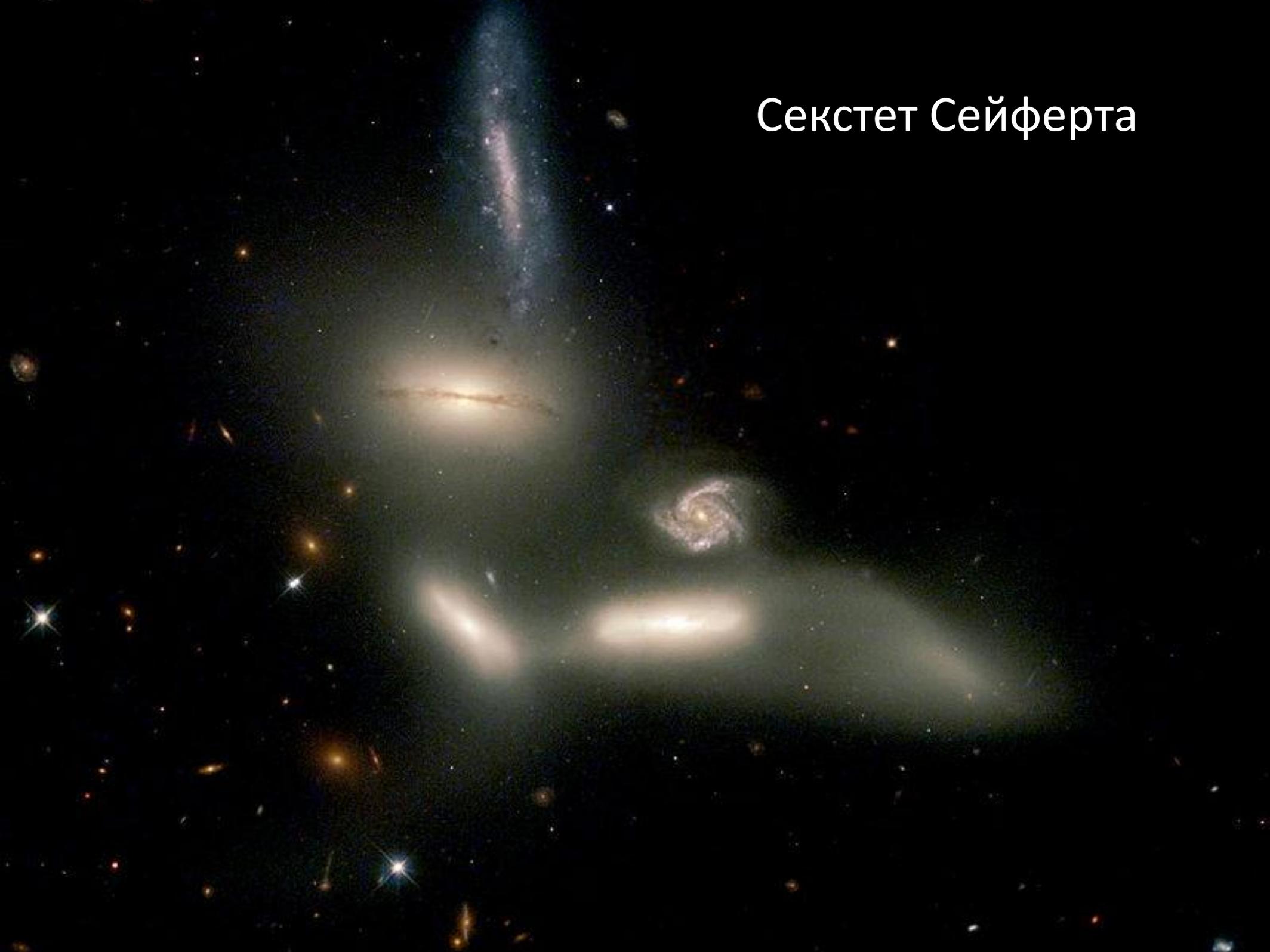


# Взаимодействие галактик



# Группы галактик

# Секстет Сейферта



# 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



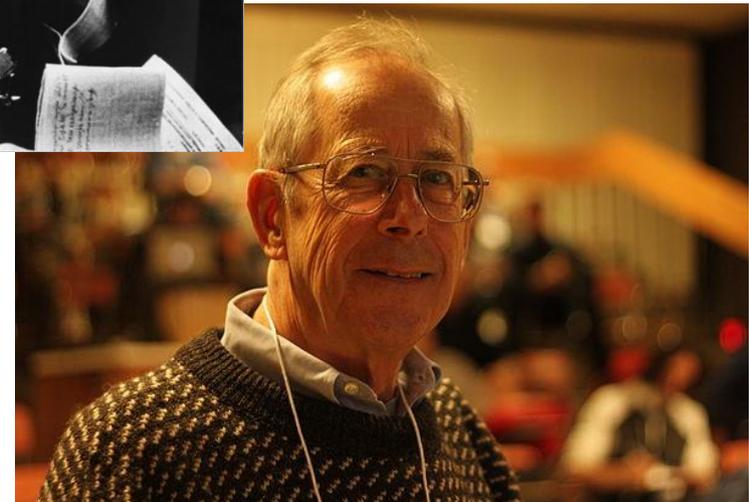
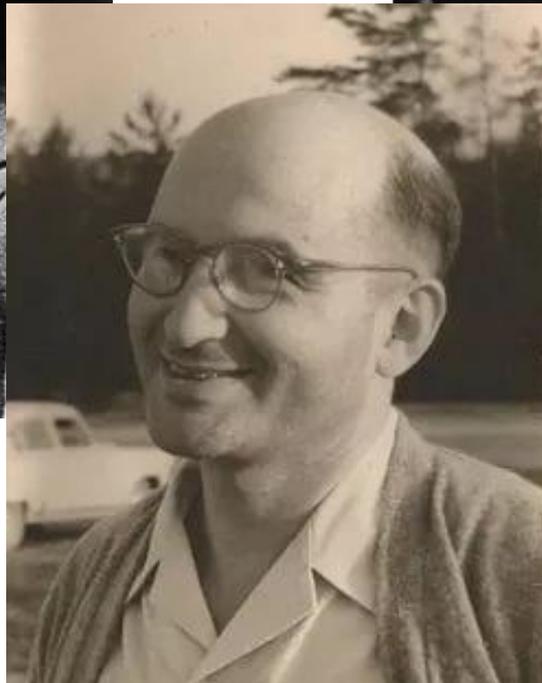
Масштаб, начиная с которого Вселенная становится однородной, порядка 100-200 Мпк

# Открытие и исследование крупномасштабной структуры

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.



После возникновения идеи о присутствии в нашей Вселенной **темной материи** и о ее влиянии на формирование структуры удалось сформулировать самосогласованную и подтвержденную наблюдениями теорию крупномасштабной структуры.

## **“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.

Флуктуации плотности существуют для всех типов вещества во Вселенной, но для образования структур важнейшую роль играют **флуктуации темной материи и плазмы**, состоящей из барионов и фотонов.

Флуктуации характеризуются контрастом плотности  $\delta_m$  и  $\delta_p$ :

$$\delta_m(\vec{r}, t) = \frac{\rho_m(\vec{r}, t) - \langle \rho_m \rangle}{\langle \rho_m \rangle},$$

$$\delta_p(\vec{r}, t) = \frac{\rho_p(\vec{r}, t) - \langle \rho_p \rangle}{\langle \rho_p \rangle}.$$

$\rho_m(\vec{r}, t)$  и  $\rho_p(\vec{r}, t)$  – плотности темного и барионного компонентов материи соответственно,  $\langle \rho_m \rangle$  и  $\langle \rho_p \rangle$  – усредненные по пространству плотности тех же компонентов. **Движение частиц темной материи происходит под действием гравитационного поля множества частиц и расширения Вселенной.**

**Уравнение движения частицы для описания растущего со временем контраста плотности:**

$$\vec{r}(\vec{\xi}, t) = a(t) [\vec{\xi} + b(t) \vec{\psi}(\vec{\xi})].$$

$\vec{r}$  – трехмерный вектор, описывающий движение частицы, которая имеет в начальный момент времени положение  $\vec{\xi}$ .

$a(t)$  – **масштабный фактор**, в эпоху доминирования материи имеющий вид  $a(t) \propto t^{2/3}$ , функция  $a(t)b(t) \propto t^{4/3}$ .

Первый член в сумме описывает **хаббловское расширение** вещества во Вселенной, второй член,  $a(t)b(t)\vec{\psi}(\vec{\xi})$ , описывает **смещение каждой частицы от ее невозмущенного положения.**

Контраст плотности как функция времени приобретает вид:

$$\delta(\vec{r}, t) = \frac{\delta(\vec{\xi}, t)}{(1 - b(t)\alpha)(1 - b(t)\beta)(1 - b(t)\gamma)}$$

Это решение называется «**приближение Зельдовича**». На этом решении основана модель «**блинов**».

Условие  $1 - b(t)\alpha = 0$  определяет момент, когда контраст плотности обращается в бесконечность. В тот же момент времени остальные скобки

$$1 - b(t)\beta \neq 0,$$

$$1 - b(t)\gamma \neq 0.$$

Из формулы видно, что эта бесконечность обусловлена пересечением траекторий двух соседних частиц, лежащих на оси  $\xi_1$ . Возмущения вдоль других осей  $\xi_2$  и  $\xi_3$  конечны.

Такая приближенная картина поясняет образование тонких «блинов» темной материи, на которые происходит «натекание» барионного вещества.

Рост возмущений плотности формирование структуры происходит в два этапа.

1. Сначала начинается формирование структуры в темном веществе, которое начинается примерно при  $z \approx 3400$ . В барионном веществе рост возмущений в это время невозможен, поскольку ему препятствует радиационное торможение (торможение Силка).
2. Барионы становятся свободными от радиационного торможения, начиная с эпохи рекомбинации  $z \approx 1090$ . Контраст плотности темного вещества к этому моменту значительно повышается. За счет гравитационного притяжения барионное вещество скапливается в областях повышенной плотности темного вещества.

Таким образом, формируются «стенки» 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.

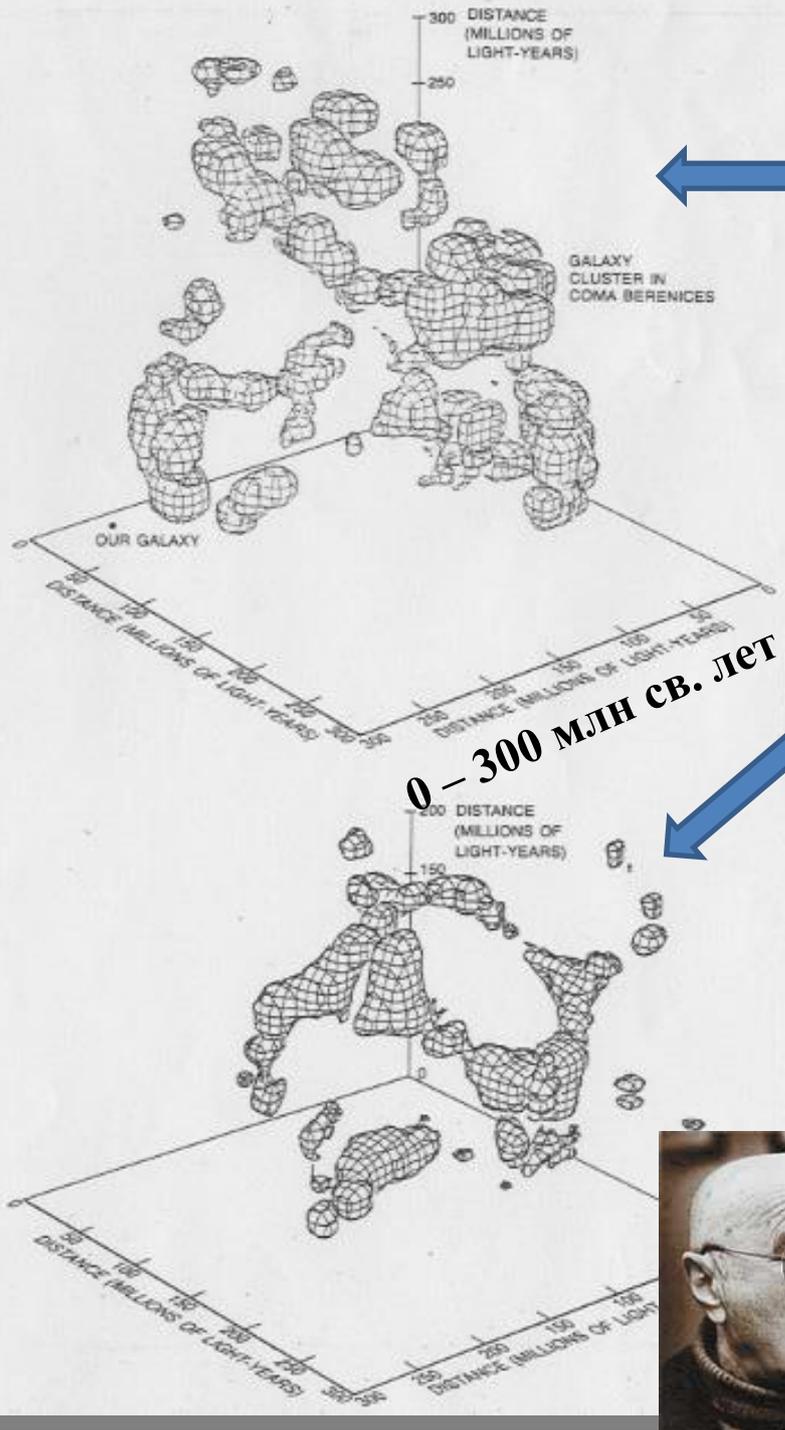
Барионно-фотонная плазма состоит в основном из ядер водорода и гелия, а также из реликтовых фотонов, поэтому в таком веществе помимо гравитационных сил появляются силы давления.

Уравнение эволюции имеет вид уравнения колебаний.

В среднем плотность массы вещества должна быть равномерно распределена в пространстве, но из-за малых возмущений плотность различается по величине в разных точках пространства. Возмущения должны представлять собой случайное поле (имеющее статистическое нормальное распределение). Однако из-за колебаний (**барионные акустические осцилляции**) существует некоторая зависимость в распределении массы вещества по пространству: в случае наличия крупномасштабной структуры вероятность нахождения концентраций масс на расстояниях порядка 150 Мпк превышает соответствующую вероятность в случае однородного расположения масс.

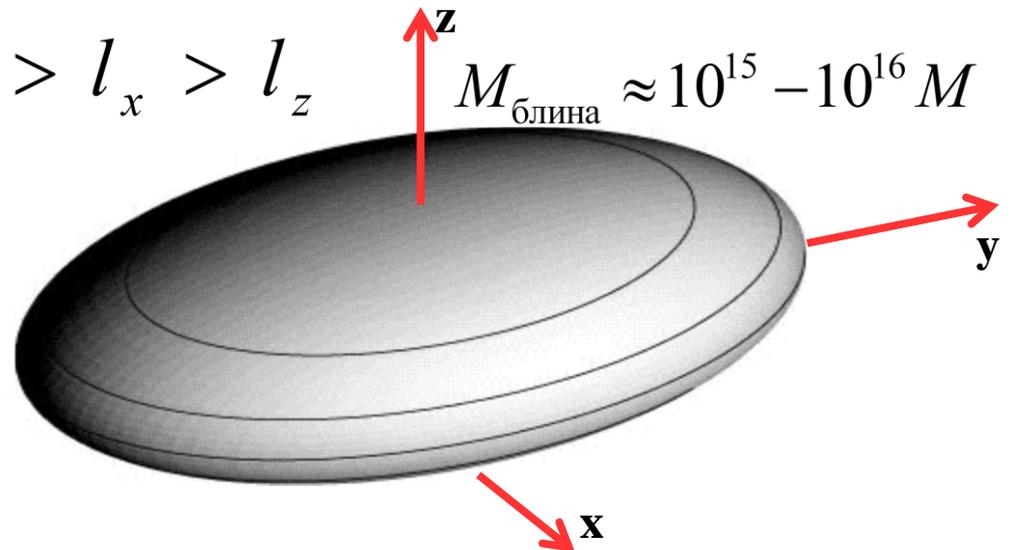
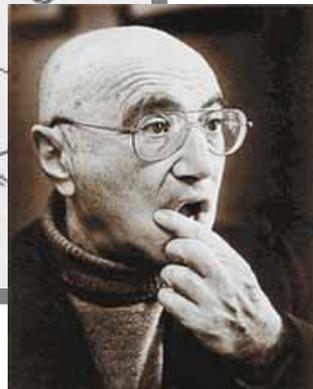
(открыто в начале XXI в. в проекте **SDSS**)

# Наблюдаемое скопление галактик в созвездии Волосы Вероники



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

$$l_y > l_x > l_z \quad M_{\text{блина}} \approx 10^{15} - 10^{16} M$$



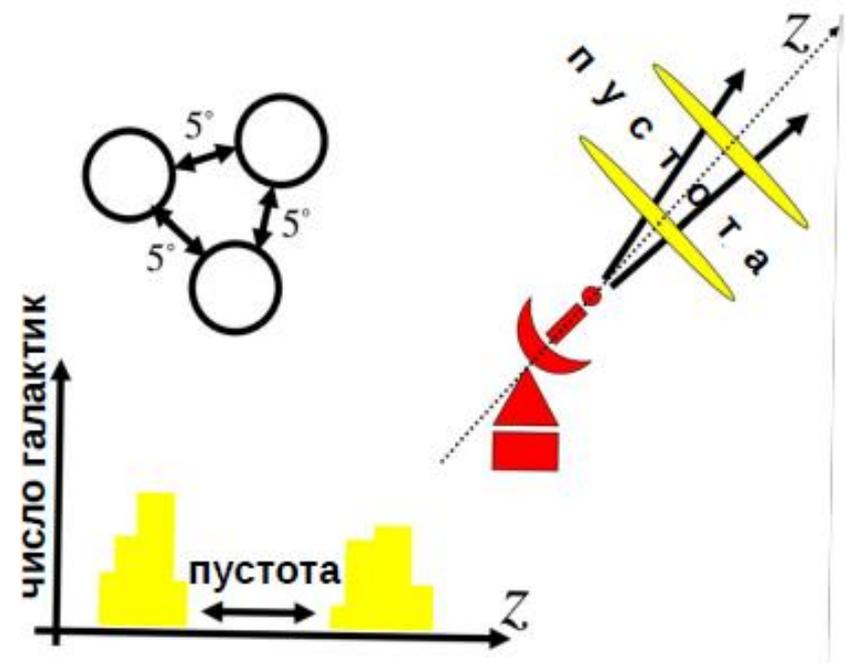
В 1960-70-х гг. считалось общепризнанным, что скопления галактик являются самыми крупными из существующих структур и что они распределены равномерно по всей Вселенной. Однако в 1970-х годах были обнаружены более крупные структуры.

В конце 1970-х гг. Я. Эйнасто и его сотрудники открыли структуру, более масштабную, чем скопления галактик, и назвали эту структуру цепочкой скоплений в созвездии Персея. Длина этой цепочки сейчас оценивается в 300 Мпк.

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

В 1981 г. Р. Киршнер с сотрудниками обнаружили две области галактик, разделенные пустым пространством. Размер пустой области составлял миллион Мпк. Области, заполненные галактиками, представляли собой уплощённые структуры, которые перемежались гигантскими пустотами. Так была открыта сотовая структура Вселенной.

На небе было выбрано три поля галактик на расстоянии примерно пять градусов. В каждом поле было посчитано количество галактик (сначала для расчетов использовались 133 галактики, потом 231 галактика) и измерены красные смещения, т.е. расстояния до этих галактик. Распределение зависимости числа галактик от расстояния до них демонстрировало два четких пика, разделенных почти пустым пространством, причем пики для разных полей совпадали. Т.е. прямые вдоль луча зрения «проткнули» два «блина» крупномасштабной структуры. Промежуток между пиками означал наличие пустого поля в пространстве, т.н. войда.



Эти открытия способствовали появлению нескольких крупных астрономических проектов, посвящённых исследованиям распределения галактик во Вселенной.

Это обзоры **CfA**, **2dF**, **2MASS** (обзор в инфракрасном диапазоне спектра, включал в себя в качестве основных целей не только наблюдения галактик, но и карликовых звезд).

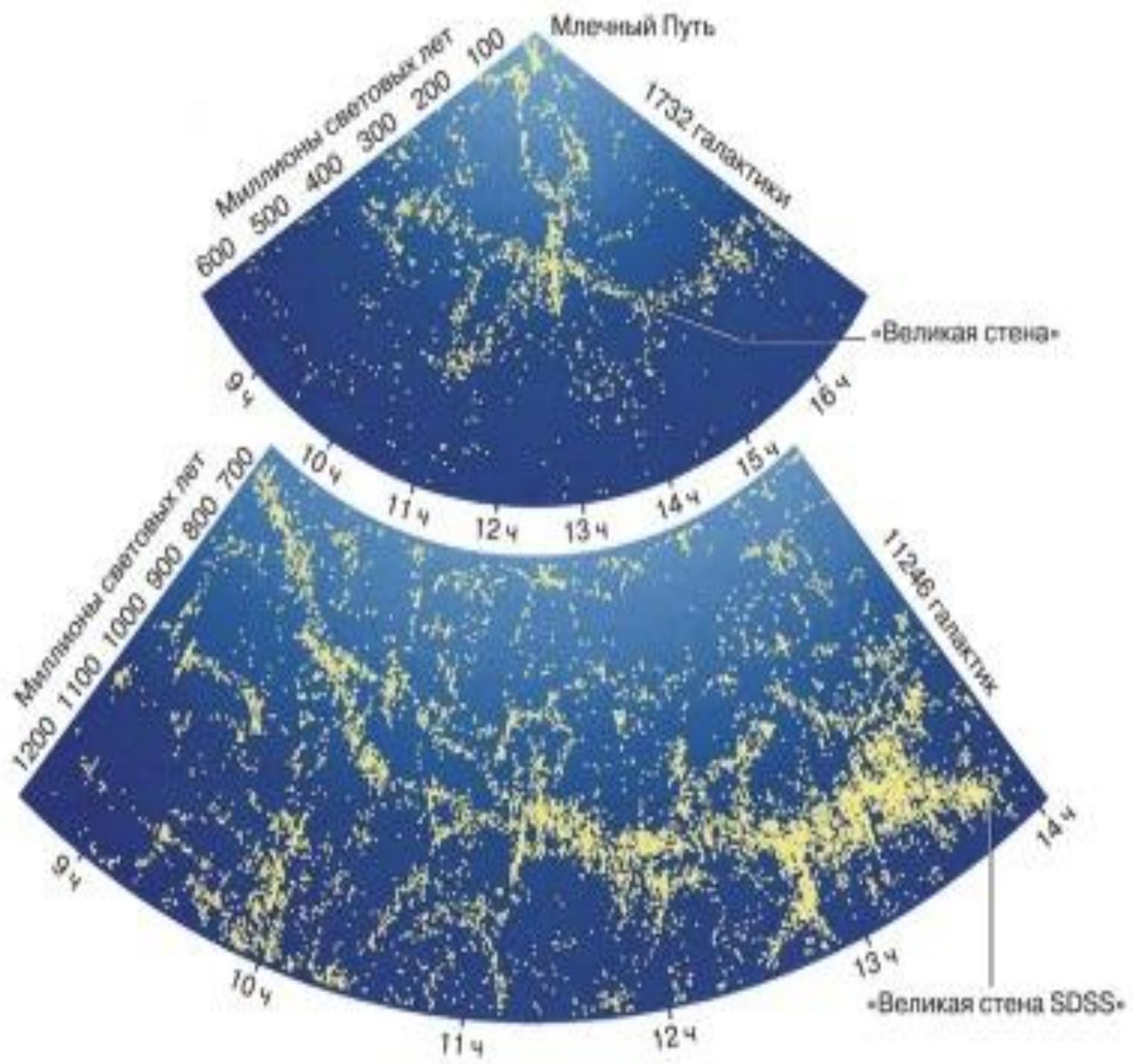
Самый полный по охвату небесной сферы обзор **SDSS** (Sloan Digital Sky Survey) покрывает 40% небесной сферы.

В результате этих обзоров были открыты несколько крупномасштабных структур, каждая из которых называется «стена». В теории такие структуры были названы «блинами», но теперь в большей степени прижилось название «**большая (великая) стена**».

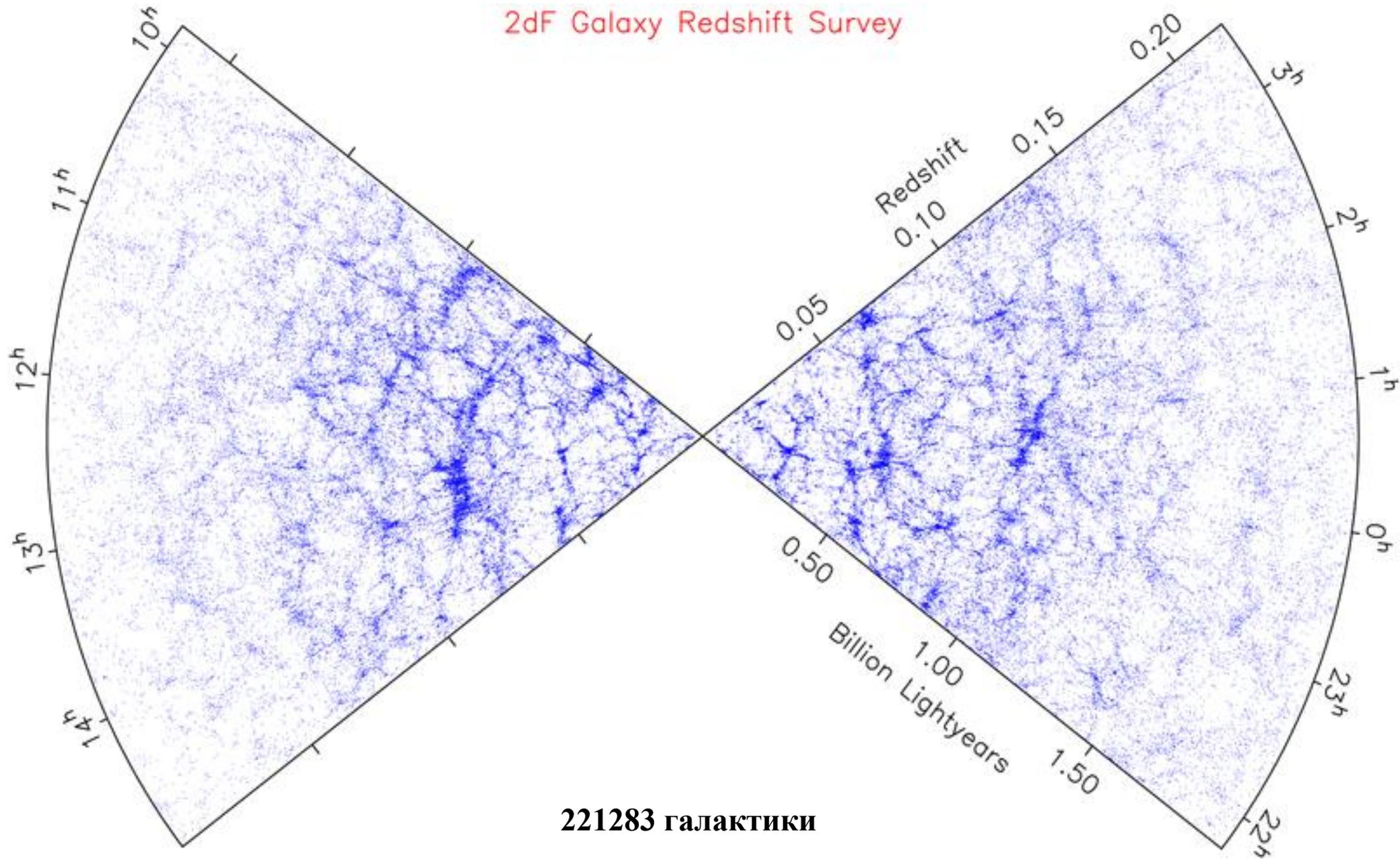
Сейчас астрономы выделяют несколько структур, которые получили собственные имена:

- 1. Великая стена CfA**, её примерные размеры: длина – 250 Мпк, ширина – 80 Мпк, толщина – 7 Мпк;
- 2. Великая стена SDSS**, её примерные размеры: длина – 430 Мпк;
- 3. Великая стена в созвездии Скульптор**, её примерные размеры: длина – 115 Мпк, ширина – 70 Мпк, толщина – 14 Мпк;
- 4. Великая стена в созвездиях Геркулес–Северная Корона**, это самая большая из «Великих космических стен», её примерные размеры: длина – 3 Гпк, толщина – 2 Гпк.

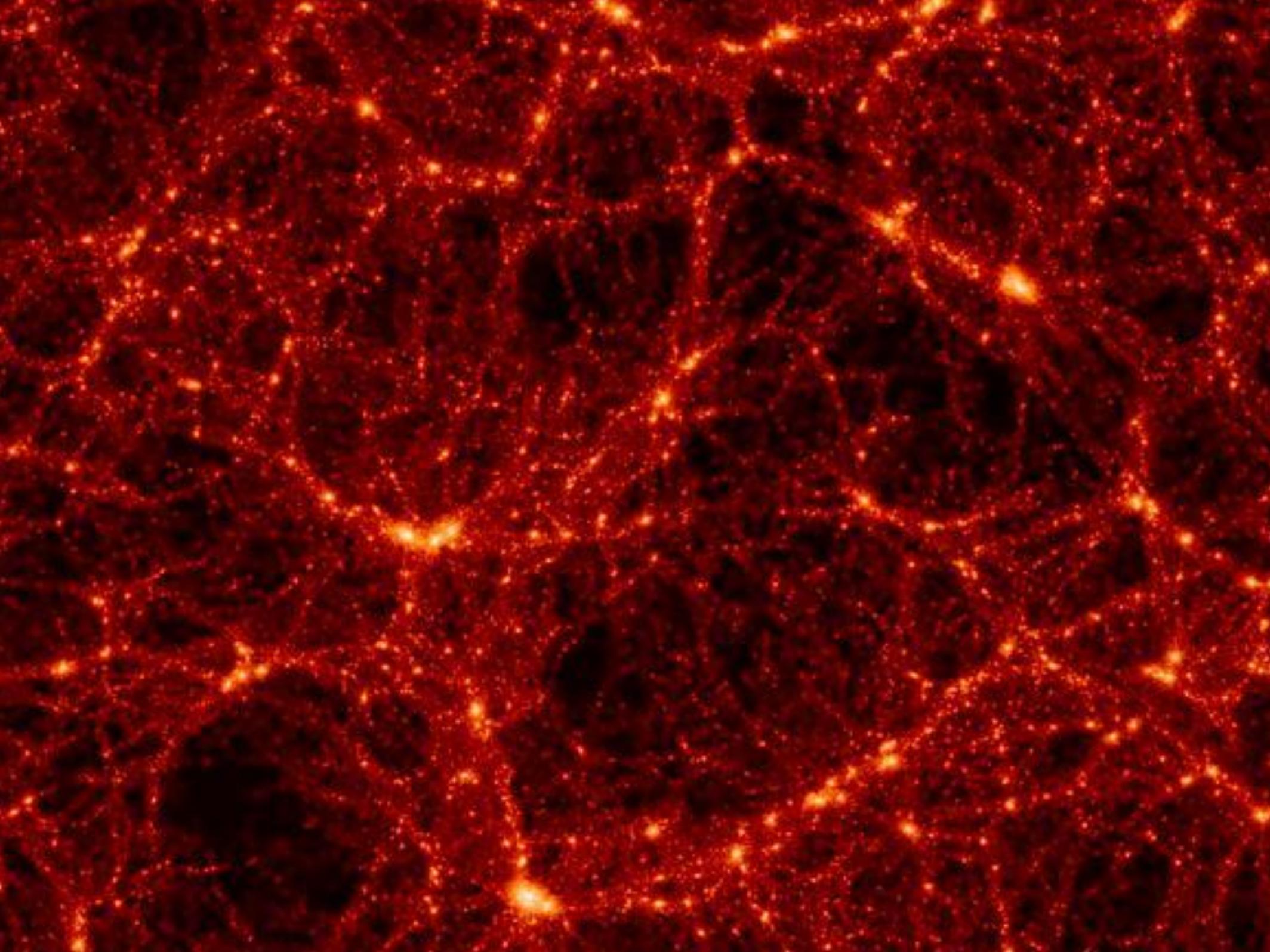
Открыты ещё несколько «стен» меньшего размера и филаментов – нитевидных структур галактик, соединяющих скопления галактик. Стены, филаменты, скопления образуют своеобразную космическую паутину – крупномасштабную структуру Вселенной.



# 2dF Galaxy Redshift Survey



**Наблюдательное подтверждение крупномасштабной структуры**



Ещё одним показателем крупномасштабной структуры является **«лес» линий лайман-альфа**.

Это совокупность линий поглощения, появляющихся в спектрах света от квазаров, которые интерпретируются как указания на существование между квазарами и наблюдателем тонких «блинов» межгалактического (в основном водородного) газа.

Эти тонкие структуры, по-видимому, связаны с формированием галактик.

Существует гравитационная аномалия, называемая **Великим Аттрактором**, которая влияет на движение галактик в области сотен миллионов световых лет в поперечнике.

Все эти галактики имеют красное смещение в соответствии с *законом Хаббла*. Это указывает на то, что они удаляются от нас и друг от друга, но вариаций их красного смещения достаточно, чтобы выявить существование концентрации массы, эквивалентной десяткам тысяч галактик.

Великий Аттрактор, открытый в 1986 г., находится на расстоянии от 50 до 80 Мпк в направлении созвездий Гидра и Кентавр. В его окрестностях преобладают крупные галактики.

## ЛЕКЦИЯ 8

# Распространенность легких химических элементов. За пределами Стандартной модели физики частиц

