

МГУ им. М.В. Ломоносова
Факультет космических исследований

Межфакультетский курс:

ОСНОВЫ ФИЗИКИ КОСМОСА

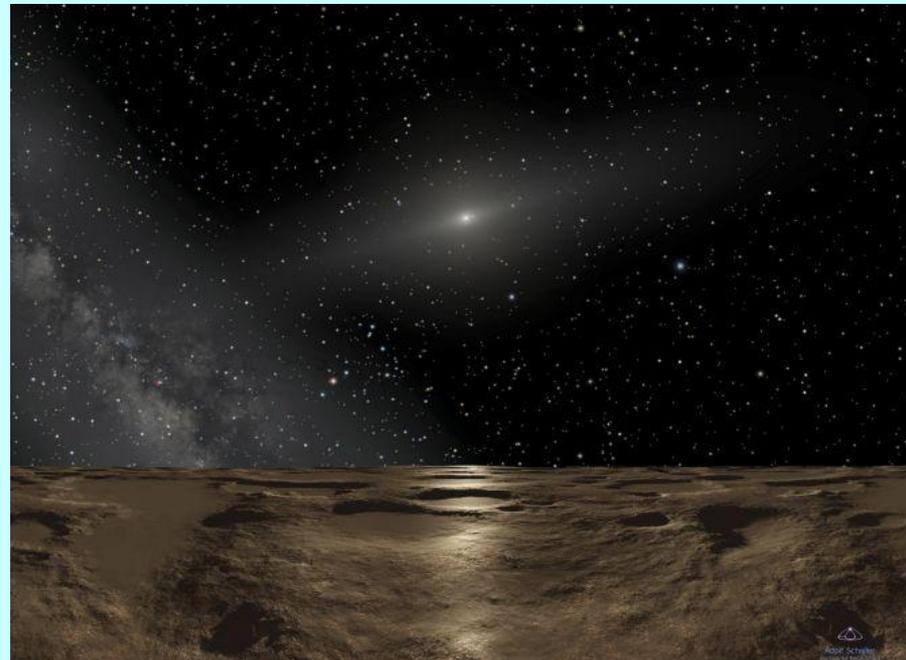
Лектор: академик РАН проф. М.Я. Маров

Лекция 1. Введение в курс. Окружающий космос

14 февраля 2018 г.

Содержание

- Вводные замечания
- основополагающие философские концепции
- Зачем мы исследуем космос:
Основные научные вопросы
- Рождение и эволюция Вселенной
- Структура и масштабы Вселенной
- Галактики и звезды
- Наше место в космосе
- Околосолнечный космос
- Солнечная система
- Планеты и малые тела
- Заключение



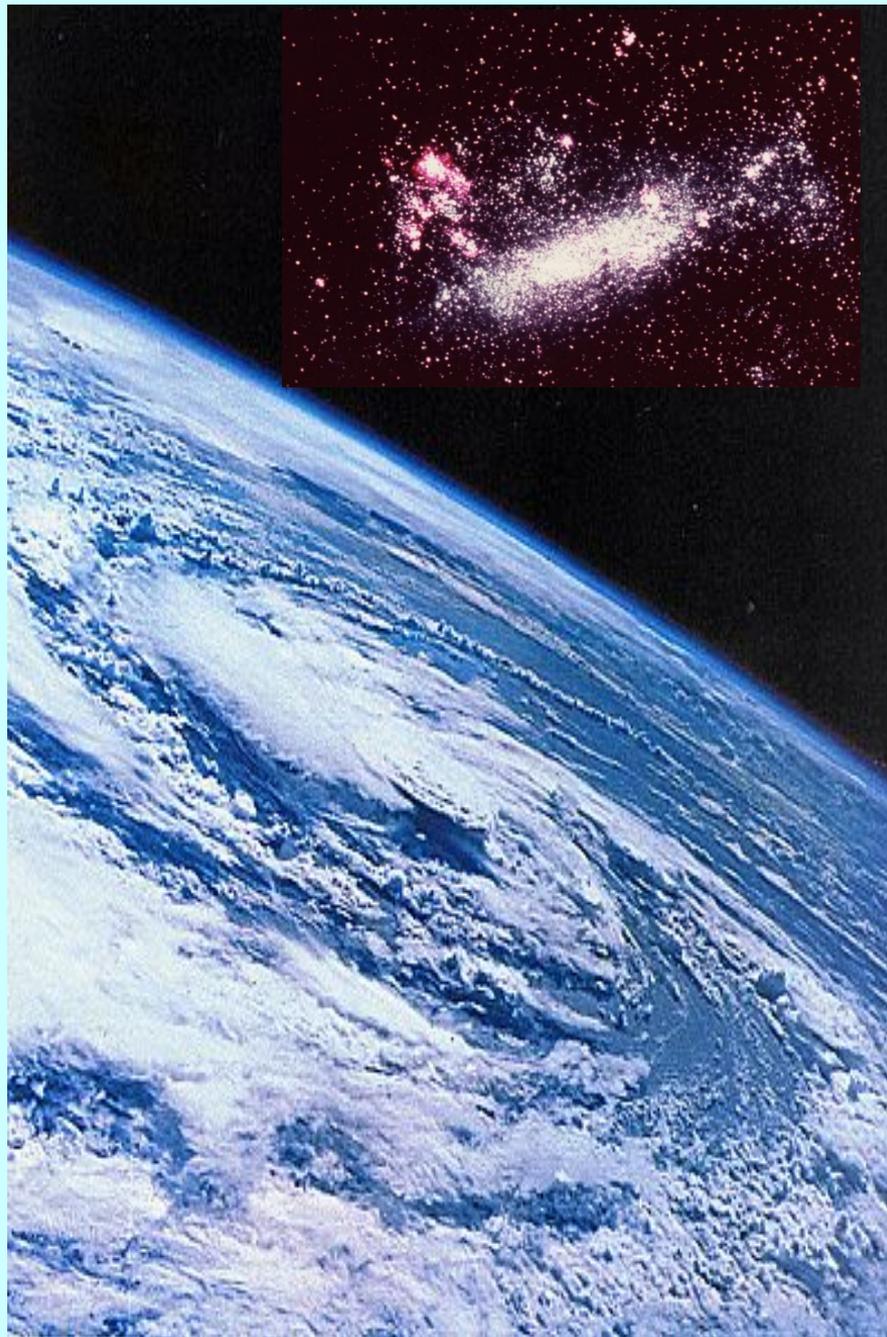
Основополагающие философские концепции в познании природы космоса

"Есть ли высшие силы, есть ли первопричина всех вещей и явлений? Конечно, последняя не может не быть и она-то распоряжается судьбою мира, и в частности, земного человечества. В сущности, это сама вселенная".

К.Э. Циолковский "Гений среди людей»
ООО ПКФ «Эндемика», Обнинск, 2002, с. 126

«В развитых областях наук о природе есть некоторые более основные проблемы, есть учения и явления, есть коренные методологические вопросы, есть, наконец, **характерные точки или представления о космосе, которые неизбежно и одинаковым образом затрагивают всех специалистов, в какой бы области этих наук они ни работали.** Каждый из них подходит к этим основным и общим явлениям с разных сторон, иногда касается их довольно бессознательно. Но по отношению к ним он неизбежно должен высказывать определённое суждение, должен иметь о них точное представление: **иначе он не может быть самостоятельным работником даже в узкой области своей специальности.**».

В.И. Вернадский. Избранные труды по истории науки
1981, М., с. 32-33



Основная научные вопросы в исследованиях космоса:

- **Как устроен наш мир?**
 - Структура и свойства Вселенной.
- **Где мы находимся?**
 - Место Земли и Солнечной системы во Вселенной.
- **Как мы возникли?**
 - Космогония: Происхождение и эволюция Солнечной системы и других планетных систем.
- **Как возникла жизнь, есть ли жизнь и внеземной разум во Вселенной?**
- **Откуда мы пришли и куда движемся?**
 - Космология: Происхождение, эволюция и судьба Вселенной.

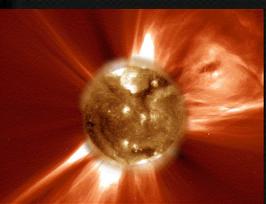
Масштабы в космосе и единицы расстояний

- **Астрономическая единица (а.е.) – расстояние от Земли до Солнца**
 $1 \text{ а.е.} = 150\,000\,000 \text{ км}$
 - **Световой год (с.г.)**
 $1 \text{ с.г.} = 9.46 \times 10^{12} \text{ км}$
 - **Парсек (пк) – угол = 1 угл. сек. на расстоянии 1 а.е.**
 $1 \text{ пак} = 3.26 \text{ с.г.} = 3.086 \times 10^{13} \text{ км}$
- $1 \text{ Кпк} = 1000 \text{ пак}; 1 \text{ Мпк} = 10^6 \text{ пак}; 1 \text{ Гпк} = 10^9 \text{ пак}$

Окружающий космос

Наше космическое окружение включает в себя области пространства от верхней атмосферы Земли (~ 100 км) до периферии Солнечной системы ($\sim 10^5$ а.е. = 10^{18} км) и далее до границ наблюдаемой Вселенной ($\sim 13,7$ млрд. св. лет = $\sim 4 \times 10^9$ пс).

Космос населен многочисленными телами и в нем происходят грандиозные процессы превращения энергии и вещества



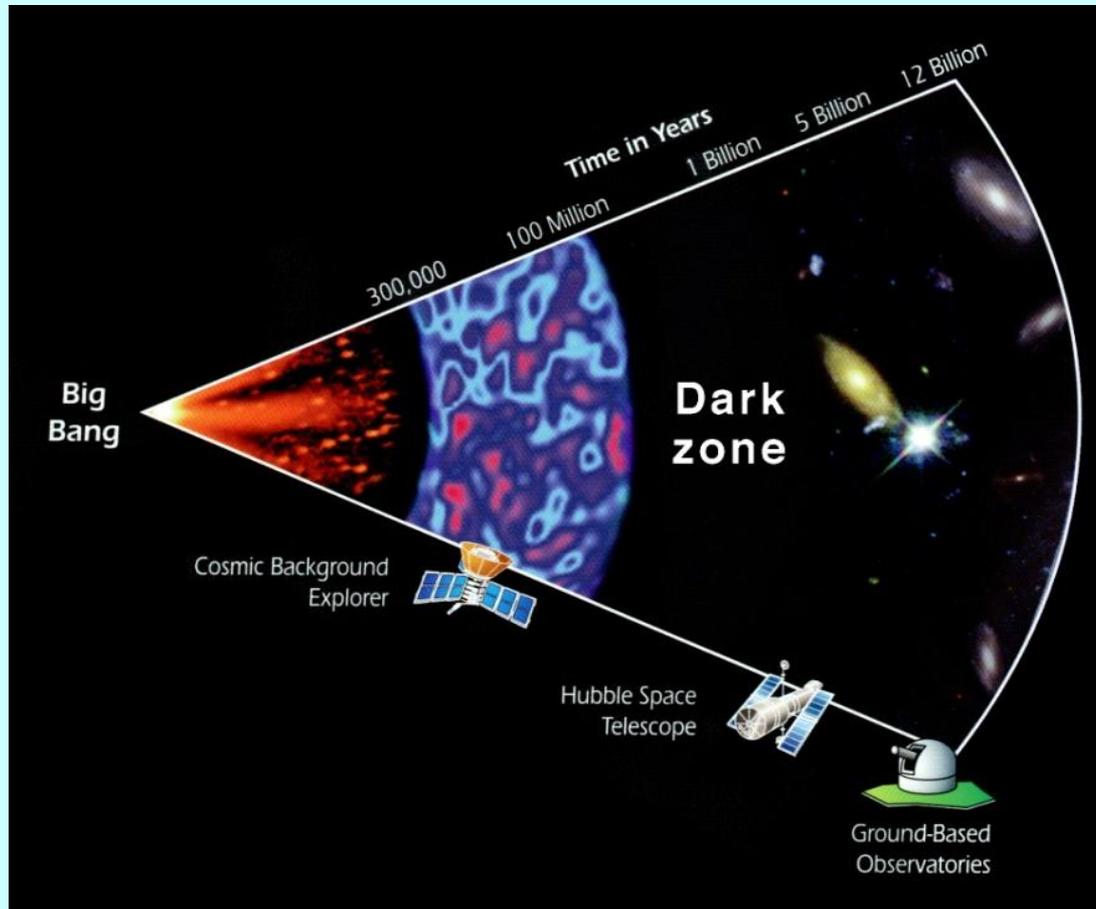
Ближний космос:

Космическая среда вблизи Земли



Дальний космос - наблюдаемая Вселенная

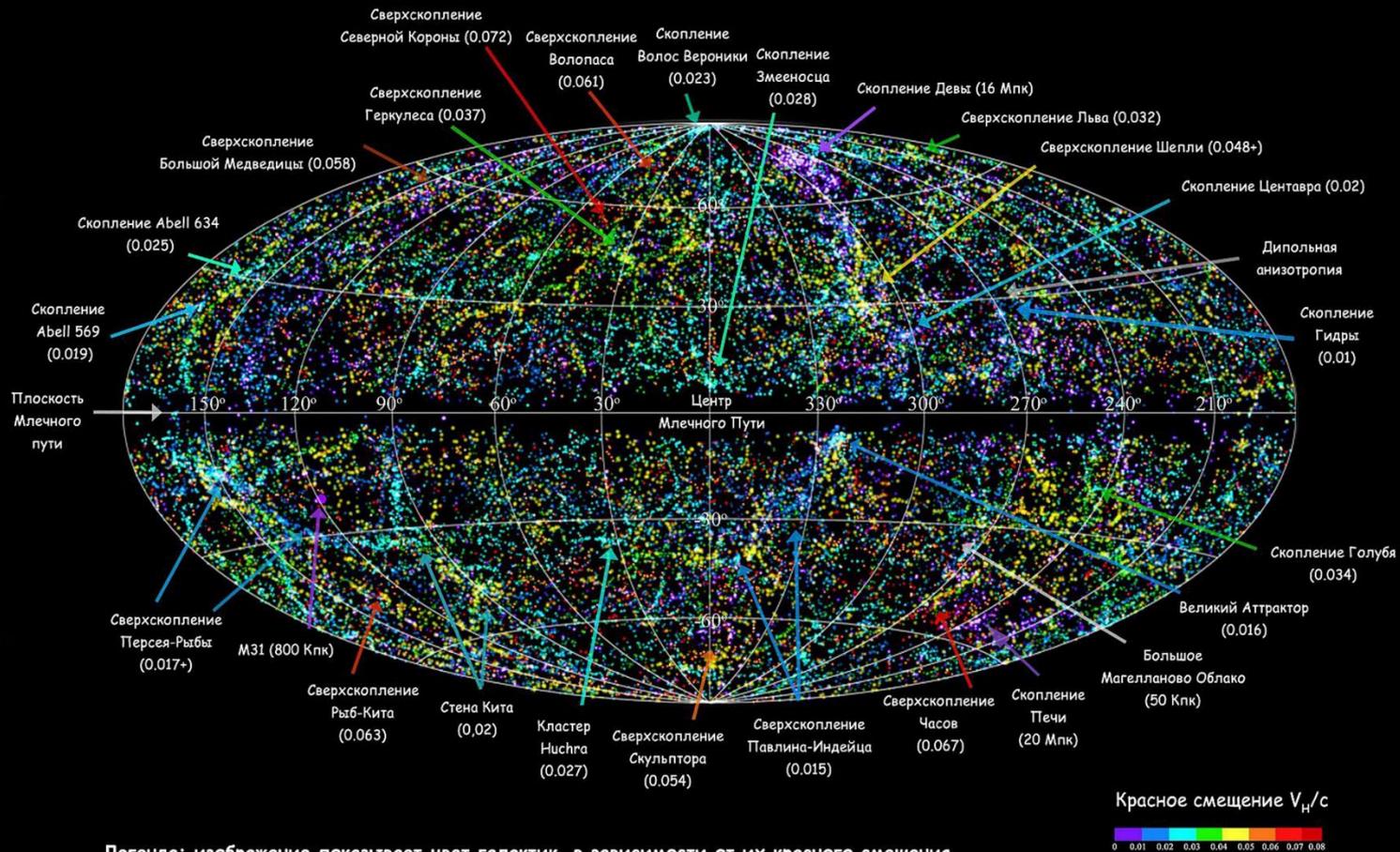
- Ближайший «космический островок» Вселенной – Солнечная система.
- Во Вселенной насчитывается свыше 100 млрд. галактик, в каждой от 100 до 400 млрд. звезд – «солнц»; общее число звезд $\sim 10^{23}$.
- Размер Вселенной 13,7 млрд. световых лет (~ 4 Гпк).



**Как устроен наш мир?
Структура и свойства
Вселенной**

Население космоса

Скопления и сверхскопления галактик



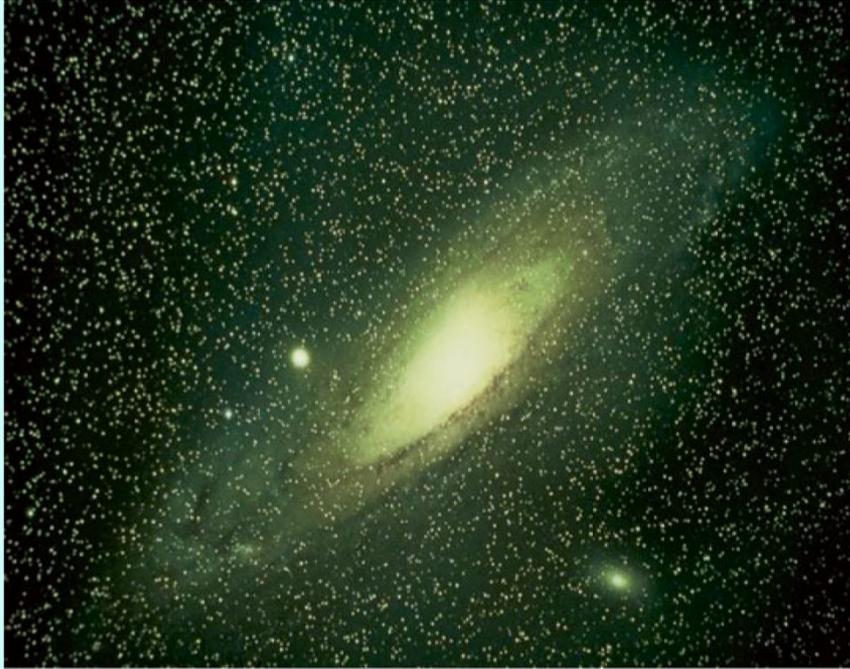
Легенда: изображение показывает цвет галактик, в зависимости от их красного смещения.

Цифры в скобках у скоплений/сверхскоплений обозначают красное смещение.

Рождение и эволюция материи во Вселенной



Галактики и звезды



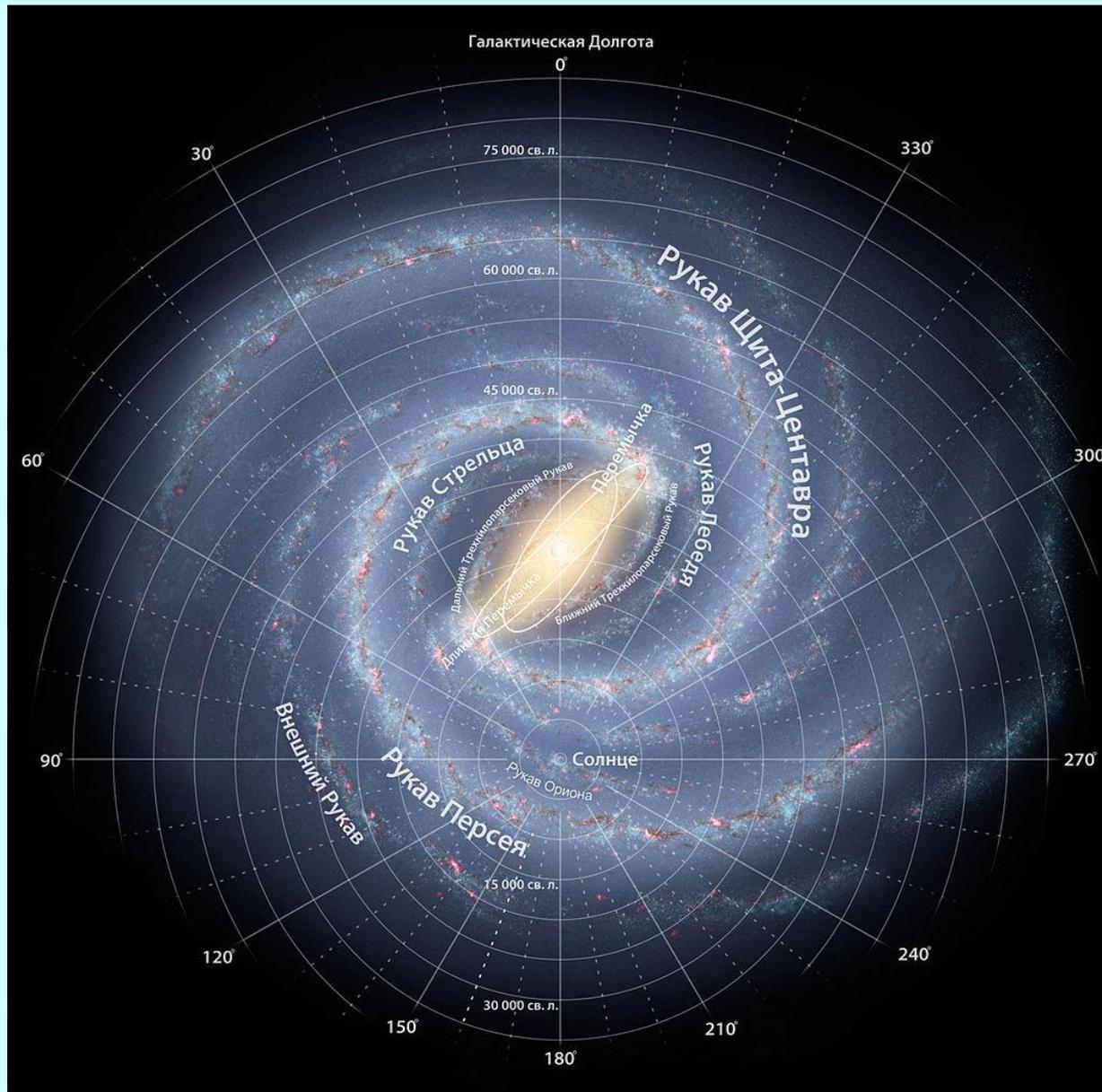
Наша Галактика Млечный путь (вид с края диска)



Свойства Млечного пути

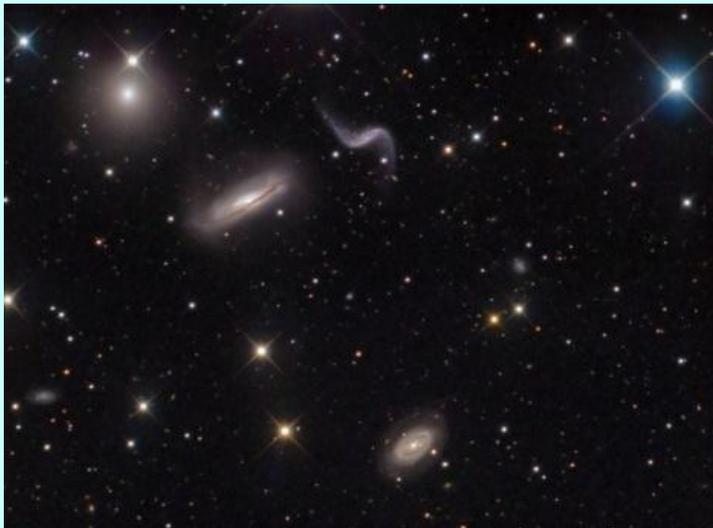
- Звёзды сосредоточены в громадных звёздных ассоциациях, имеющих форму тонких дисков (галактиках), являющихся основными «строительными блоками» видимой Вселенной.
- Наша Галактика (Млечный путь) содержит около 400 млрд. звёзд.
- Размер нашей Галактики 100 000 св. лет (~ 30 Кпк, или $\sim 10^{15}$ км).
(1 пк = 3,26 с.г.; 1 с.г. $\sim 10^{13}$ км)
- Галактика имеет форму спирали Архимеда и вращается вокруг своего центра, совершая 1 оборот за ~ 250 миллионов лет.
- Центр Галактики ассоциируется с наличием в ней массивной чёрной дыры.
- Мы находимся в одном из спиральных рукавов Галактики на расстоянии $2/3$ от ее центра (~ 20 пк).

Солнце в Галактике

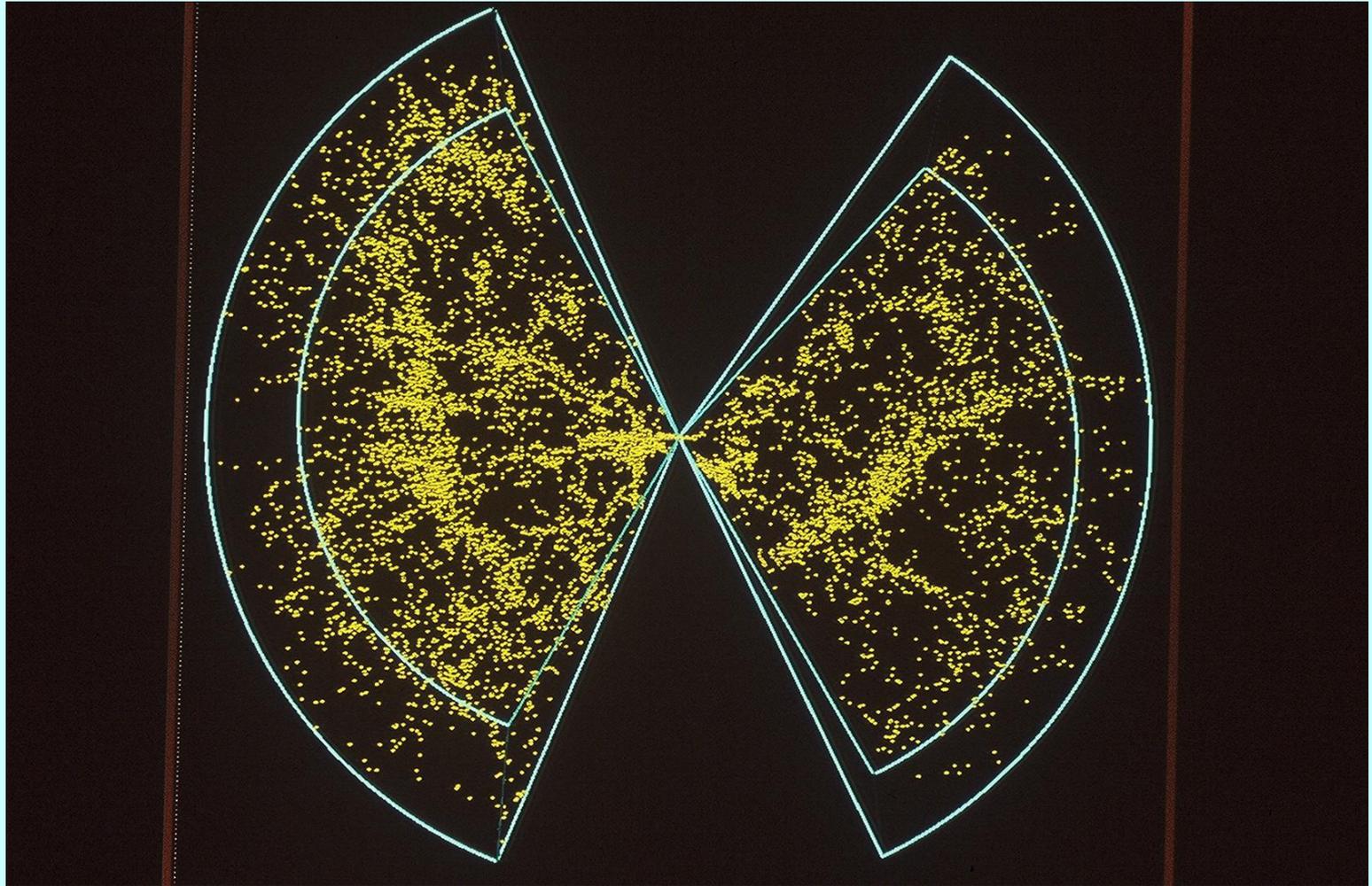


Иерархия структур: Галактические кластеры и суперкластеры

- Галактики определяют крупномасштабную структуру Вселенной, **вещество в которой распределено неравномерно.**
- Галактики образуют скопления возрастающих размеров – **кластеры**, содержащие несколько десятков или сотен галактик, а кластеры образуют **суперкластеры**, которые содержат свыше 100 кластеров.
- Размеры галактических кластеров ~ 3 Мпк (в 100 раз больше размера нашей Галактики, а суперкластера ~ 100 Мpc (в 20 - 30 раз больше размера кластера).

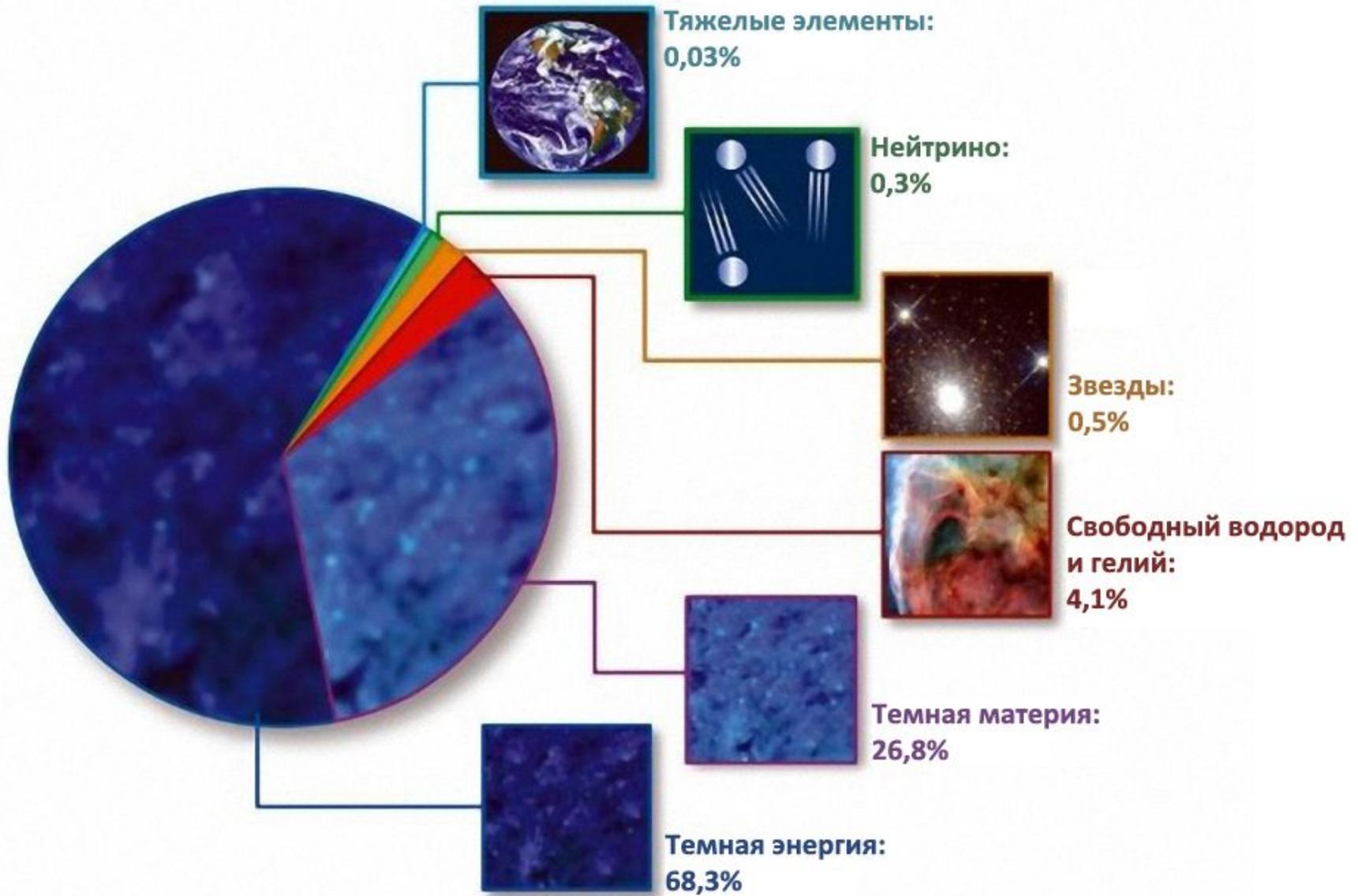


Крупномасштабная структура Вселенной



Крупномасштабная структура Вселенной («космическая паутина») состоит из нитей суперкластеров, образующих перемежающиеся сгущения (“walls”) и разрежения (“voids”) материи.

Материя во Вселенной



Где мы находимся?

**Солнечная система, ее
строение и свойства.**

Планеты и спутники

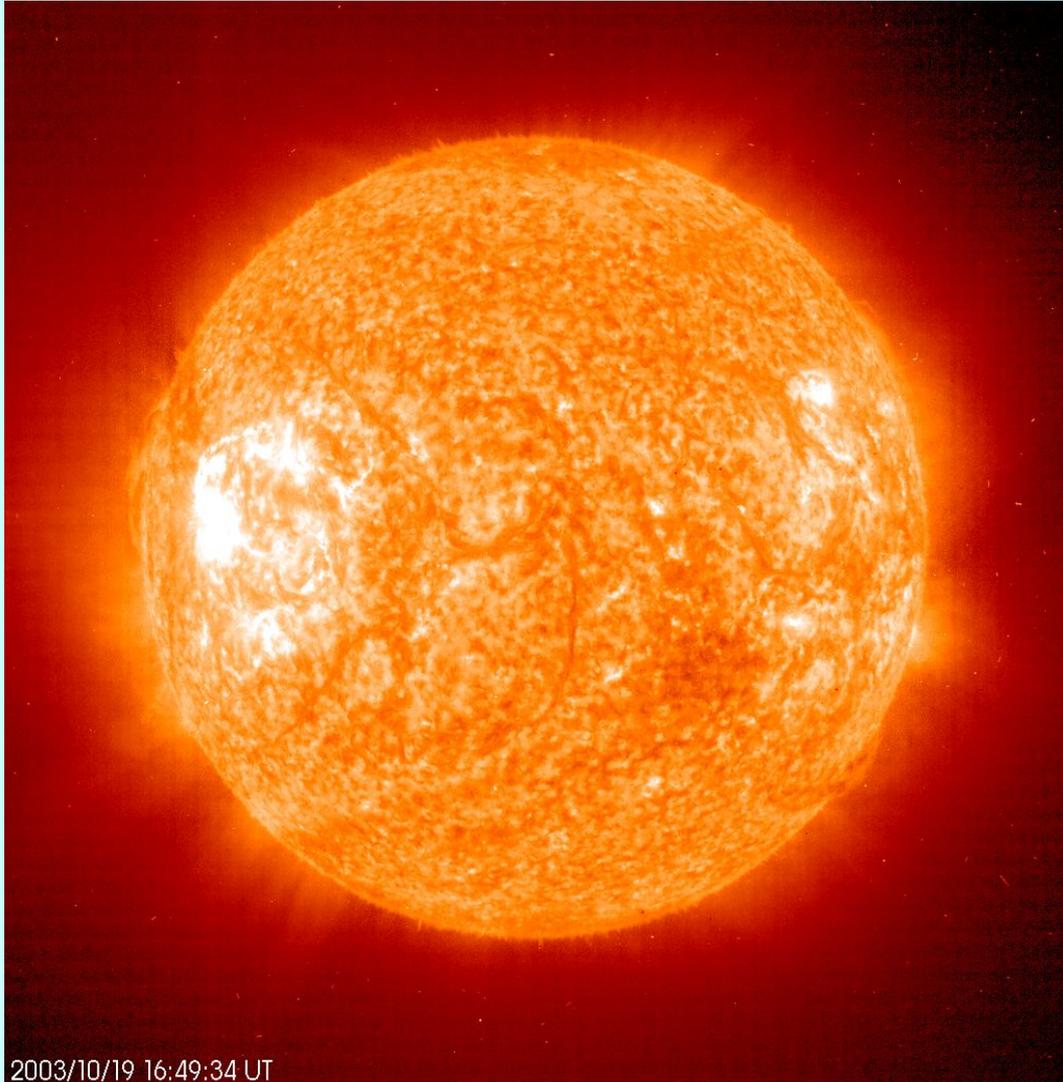
Где мы находимся?

- Земля расположена на расстоянии 1 а.е. от Солнца.
- Расстояние до Плутона 40 а.е. (6 млрд. км = 5.5 световых часов (с.ч.).
- Размер Солнечной системы (расстояние до Облака Оорта) $\sim 10^5$ а.е. = 1,5 с.г., или ~ 0.5 пк. Это всего $\sim 10^{-10}$ от размера Вселенной.
- Размер Земли $\sim 10^{-9}$ от размера Солнечной системы, или $\sim 10^{-19}$ от размера Вселенной.
- Расстояние до ближайших звёзд Альфа Центавра (Alpha Centauri) = 4.3 с.г.
- Полёт космического аппарата со скоростью 12 км/с займёт $\sim 100,000$ лет.



YOU ARE HERE

Солнце



Солнце – одна из рядовых звезд в космосе.

Физика Солнца лежит в основе понимания проблем физики и эволюции звезд.

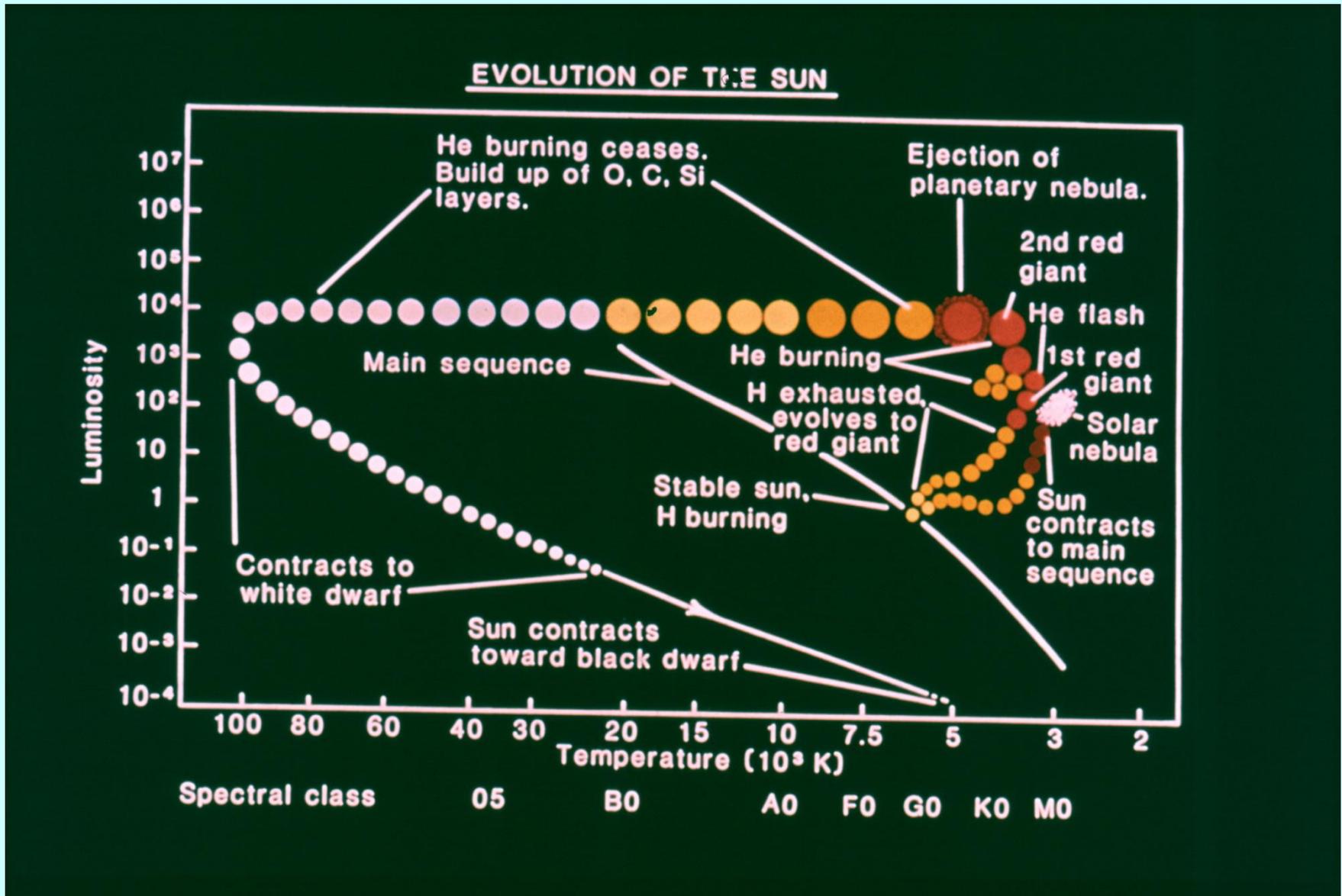
Солнце – источник энергии и жизни на Земле

Ключевое значение для жизни имеет механизм солнечно-земных связей

Солнечная система



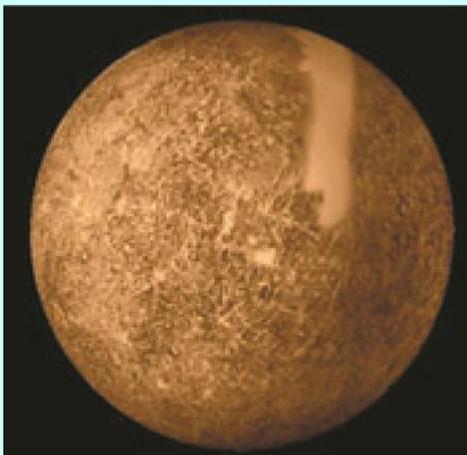
Эволюция Солнца и судьба Земли



Население Солнечной системы



Планеты земной группы



Меркурий
 $r \sim 0,4$ а.е.

Венера
 $\sim 0,7$ а.е.

Земля
1 а.е.

Марс
 $\sim 1,5$ а.е.

R 2 440 км

6 052 км

6 378 км

3 396 км

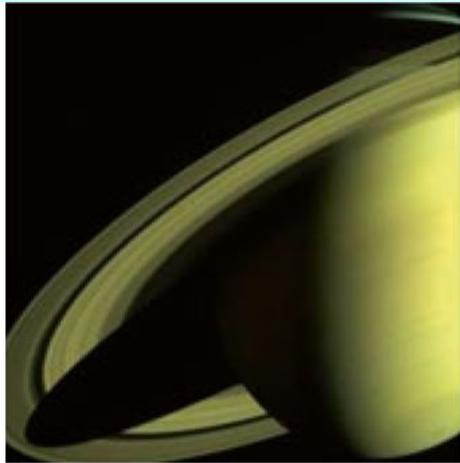
ρ 5,43 г/см³

5,20 г/см³

5,52 г/см³

3,93 г/см³

Планеты-гиганты



Юпитер

$r \sim 5$ а.е.

R 71 492 км

ρ 1,32 г/см³

Сатурн

~ 10 а.е.

60 268 км

0,69 г/см³

Уран

~ 20 а.е.

25 590 км

1, 32 г/см³

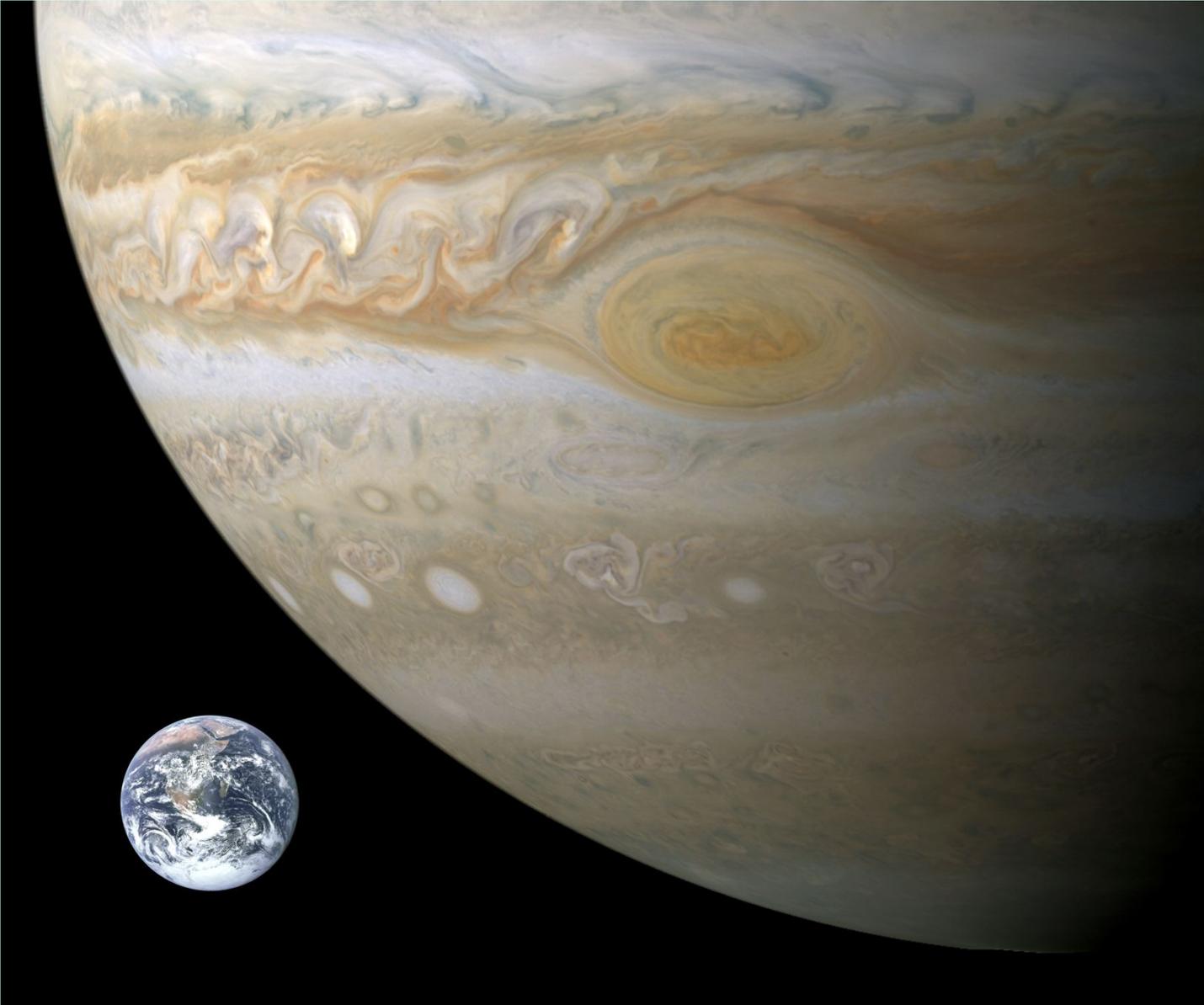
Нептун

~ 30 а.е.

24 764 км

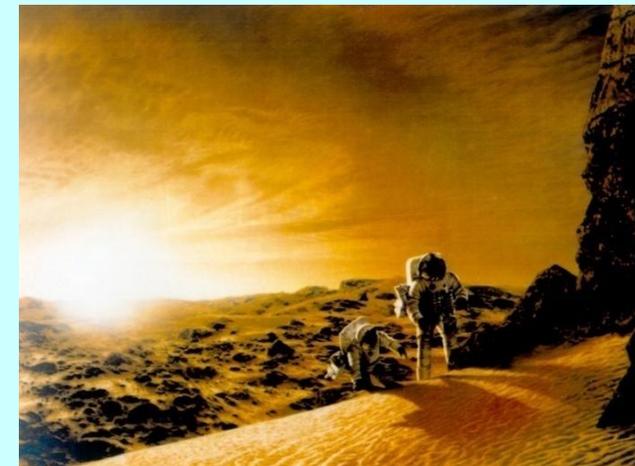
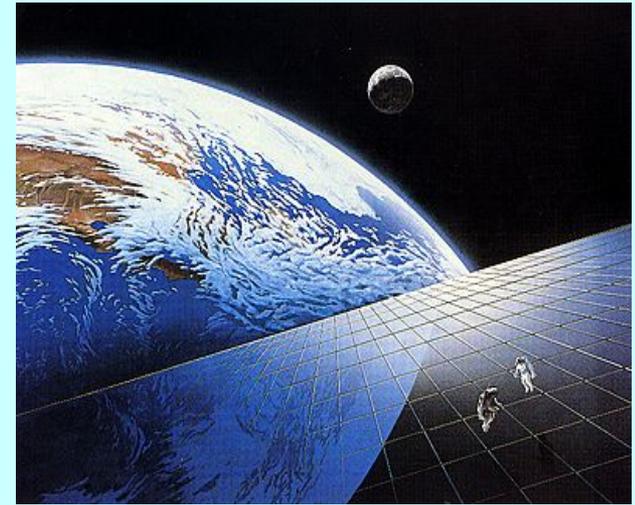
1,64 г/см³

Юпитер и Земля



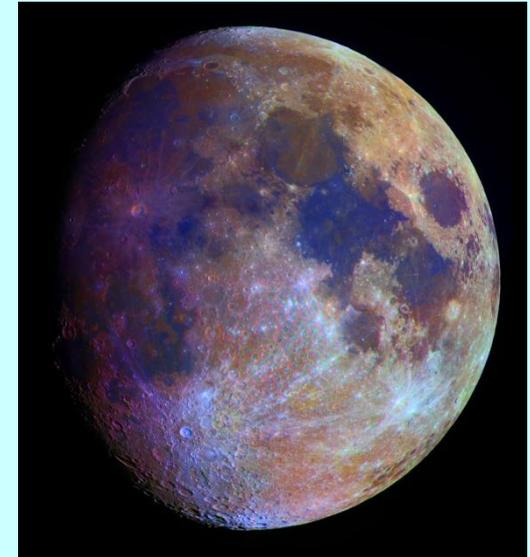
Зачем мы исследуем Солнечную систему?

- *представляют первостепенный интерес для изучения Земли как планеты на основе сравнительной планетологии;*
- *обеспечивают закономерный процесс интеграции традиционных разделов наук о Земле - геофизики, геологии, геохимии, физики атмосферы, климатологии;*
- *закладывают основы решения различных прикладных задач;*
- *стимулируют развитие экзобиологии и изучение возможности биохимических основ жизни, отличных от земной;*
- *открывают перспективы распространения человечества на всю сферу обитания в окрестности собственной звезды.*



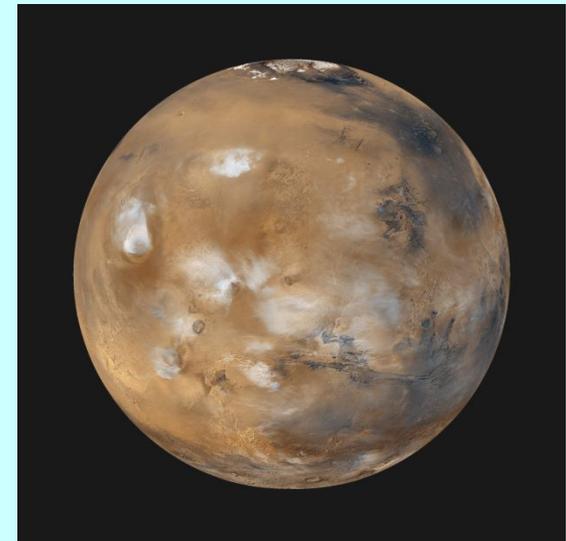
Луна – окно в раннюю историю Земли

- Происхождение Луны: выбор между двумя гипотезами формирования.
- Изучение ключевых геохимических свойств и древнейших пород (возраст ~ 4,5 млрд. лет).
- Освоение: использование Fe, Al, Si, Ti для строительства, H_2 и O_2 для получения воздуха и воды, изотопа 3He для нужд энергетики.



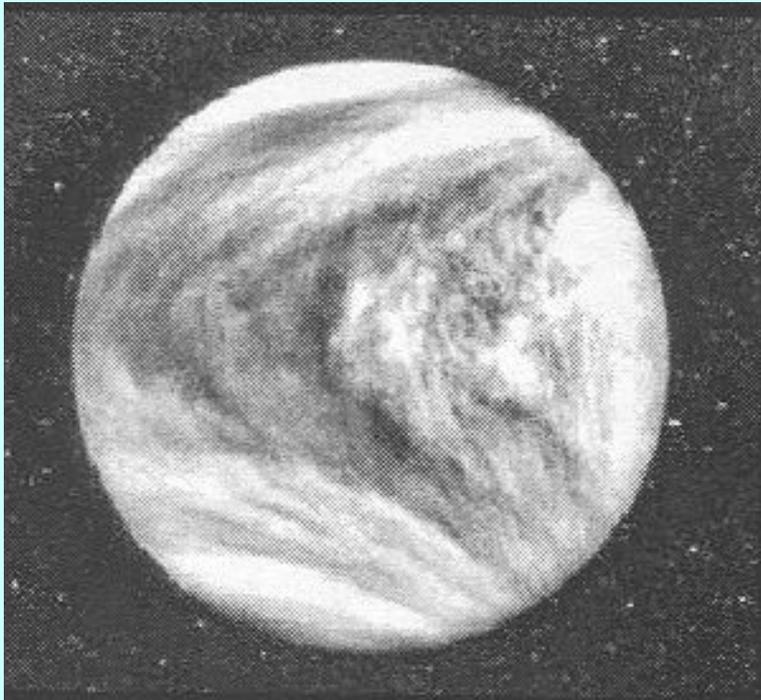
Венера и Марс – две предельные модели эволюции Земли

- Громадный прогресс в изучении планет Солнечной системы - их поверхностей, геологии, внутреннего строения и атмосфер благодаря космическим исследованиям.
- Математическое моделирование процессов на планетах опирается на данные прямых и дистанционных измерений с космических аппаратов.
- Венера и Марс служат двумя предельными моделями эволюции Земли, и понимание особенностей их природы позволяет лучше понять природу нашей планеты.
- Сравнительно-планетологический подход обеспечивает развитие традиционных наук о Земле и прогноз неблагоприятных сценариев эволюции экосистемы из-за антропогенного воздействия на природную среду.

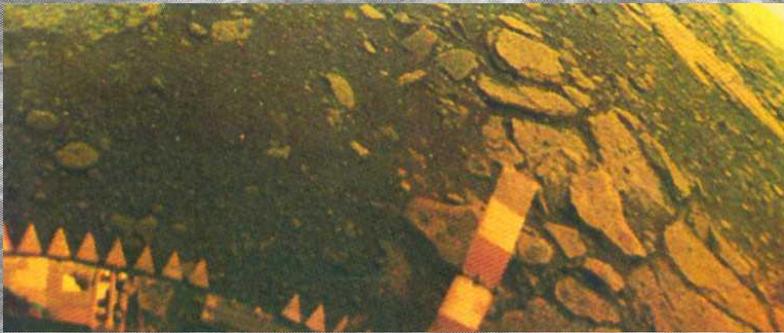
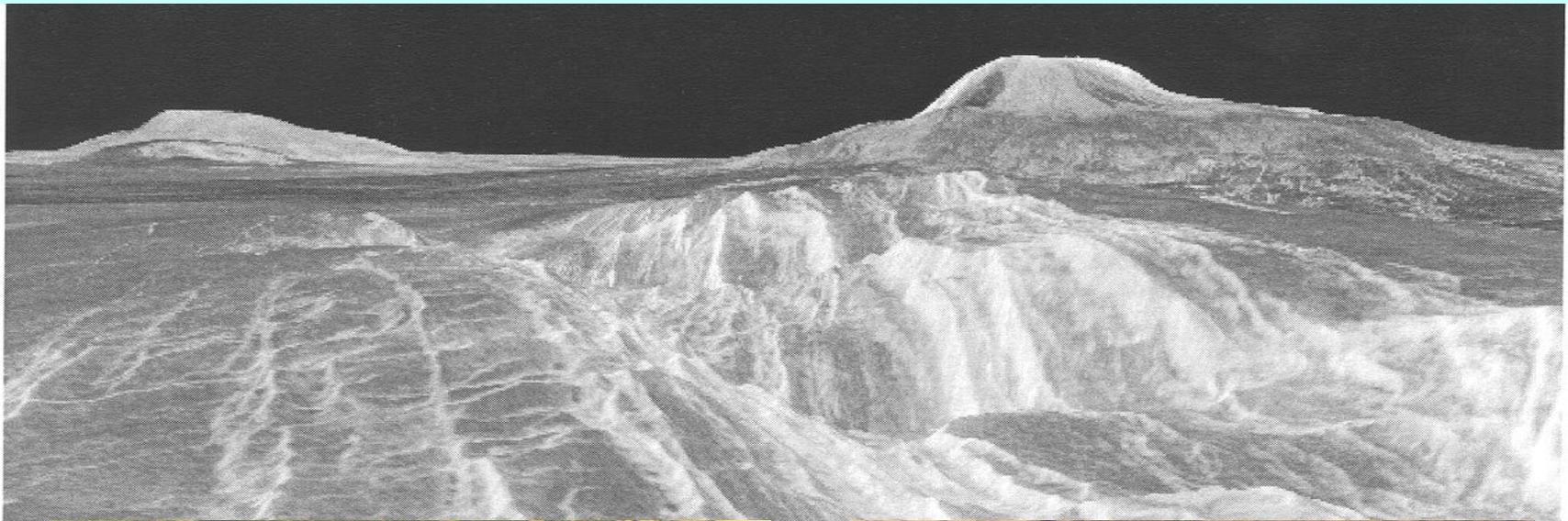
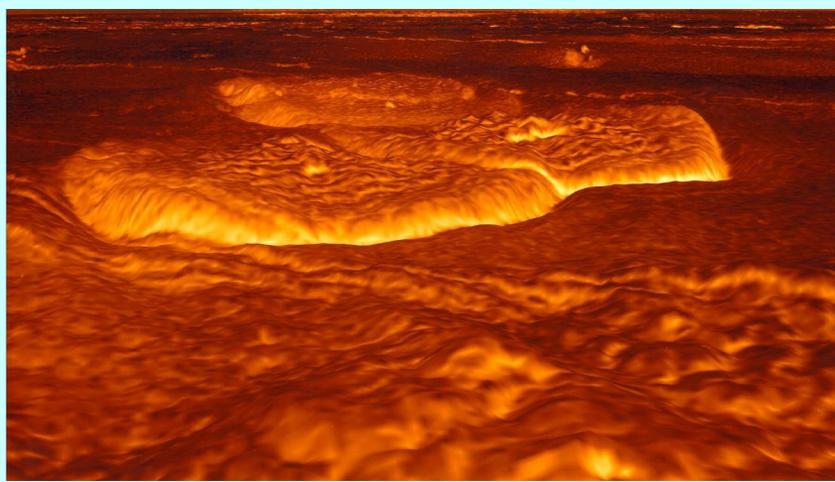


Природа Венеры

- Горячая, плотная углекислая атмосфера: температура на поверхности 475°C , давление 92 атм. («Венера 4», 1967 г.).
- Тепловой режим - необратимый парниковый эффект, «карусельная циркуляция» атмосферы, сернокислотные облака.
- Морфология поверхности, геология - тектоника, вулканизм (радиокартирование).

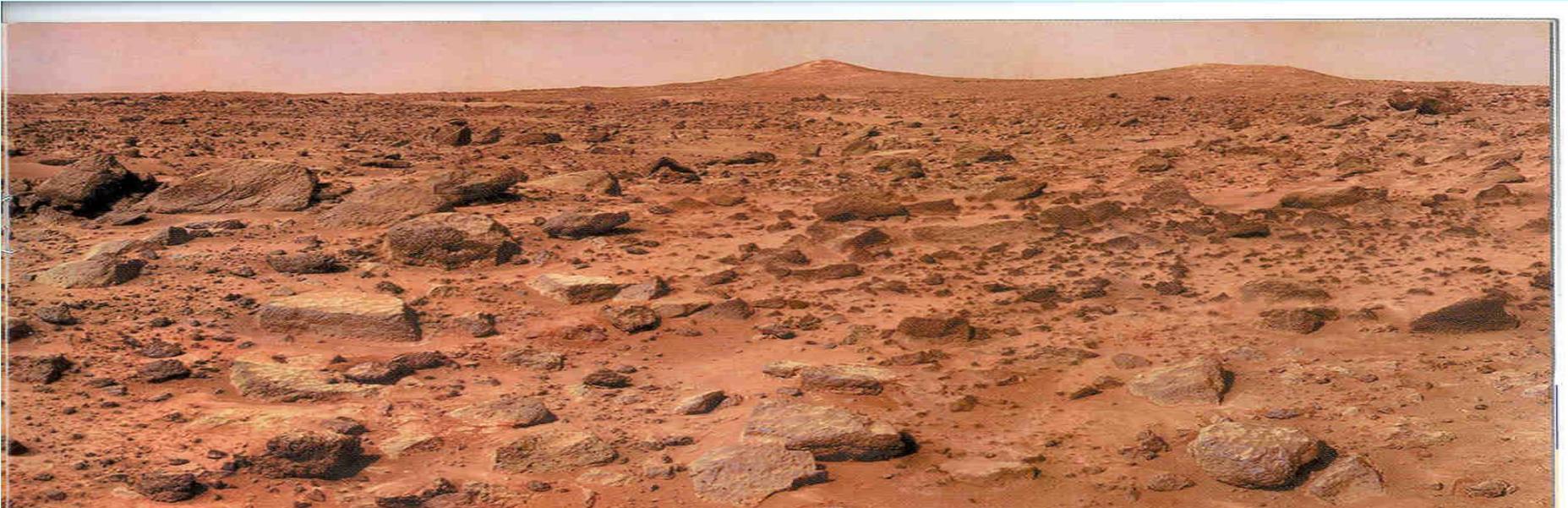
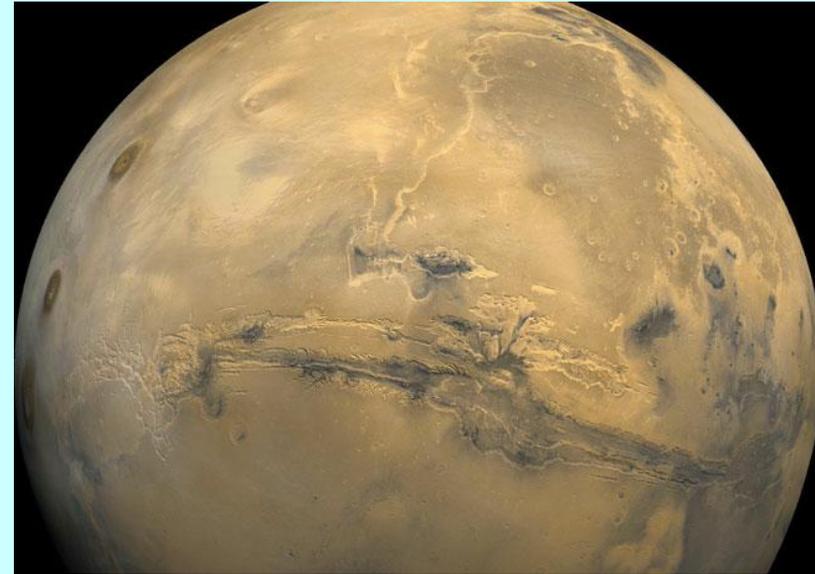


Поверхность Венеры

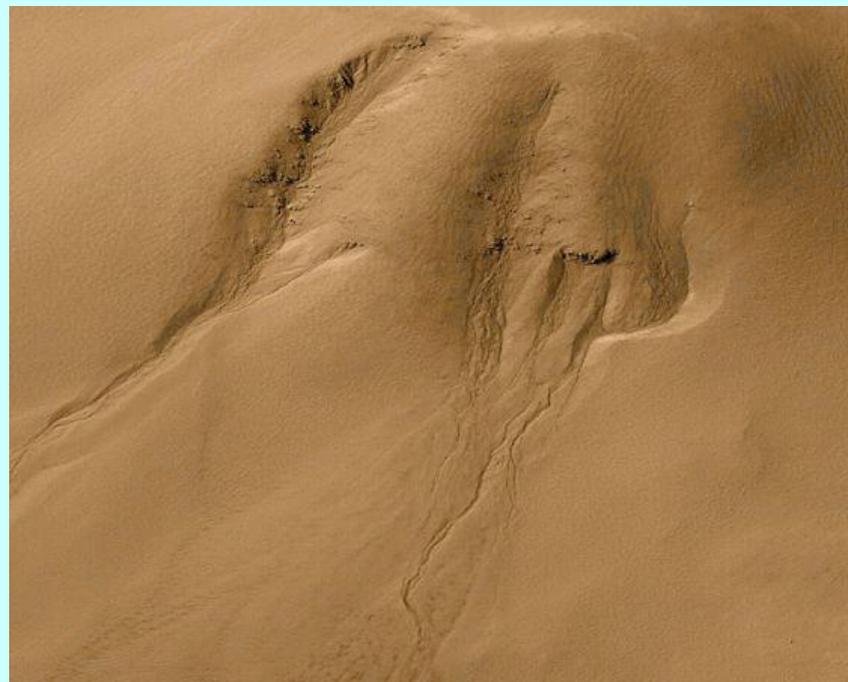
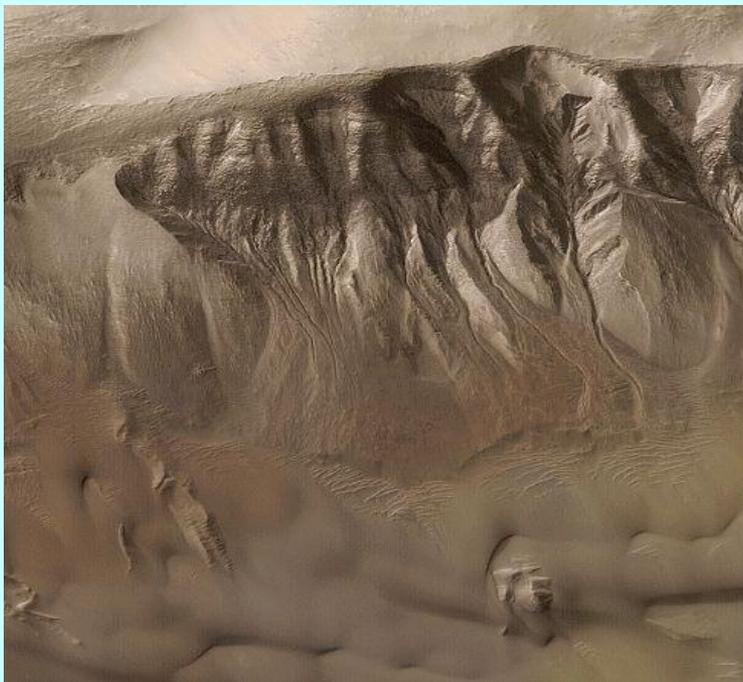
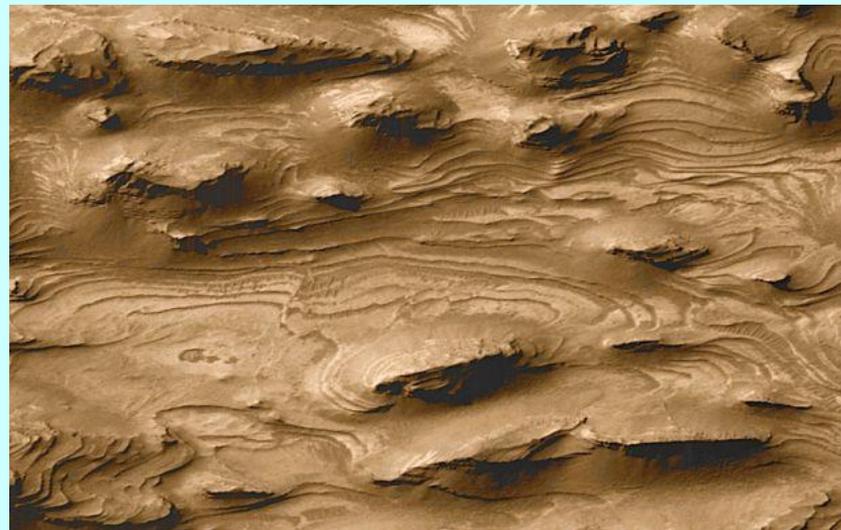
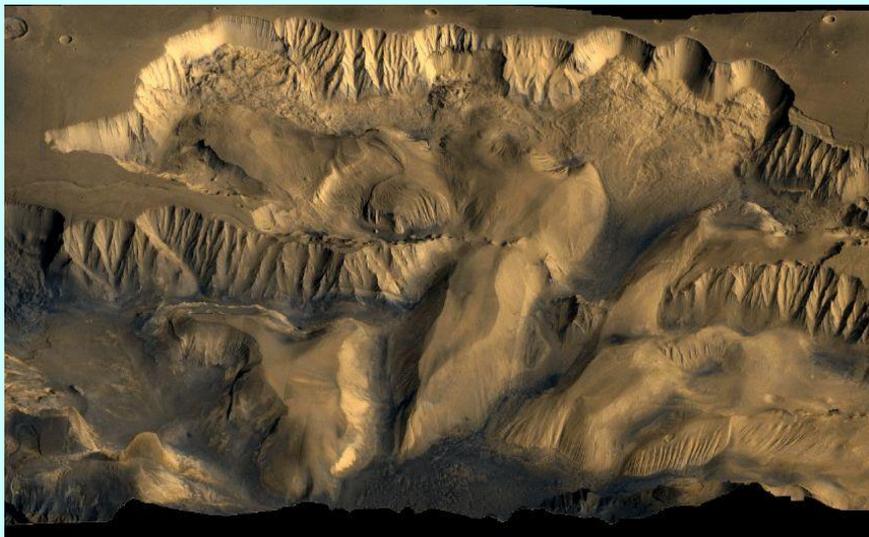


Природа Марса

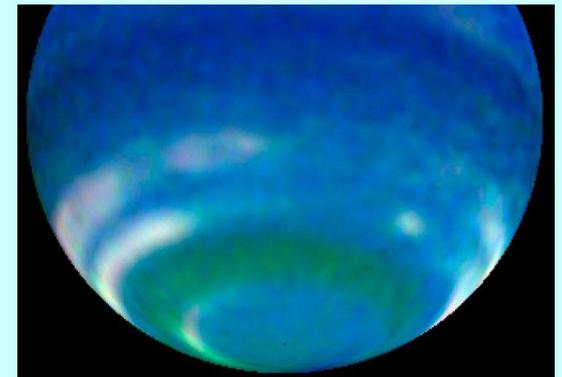
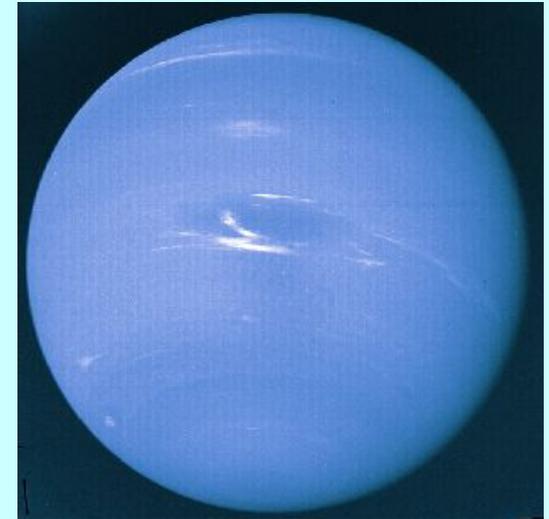
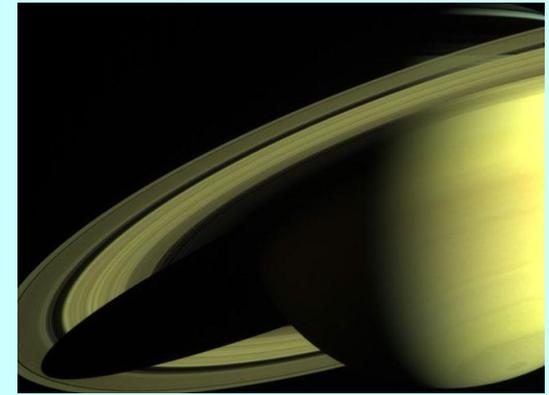
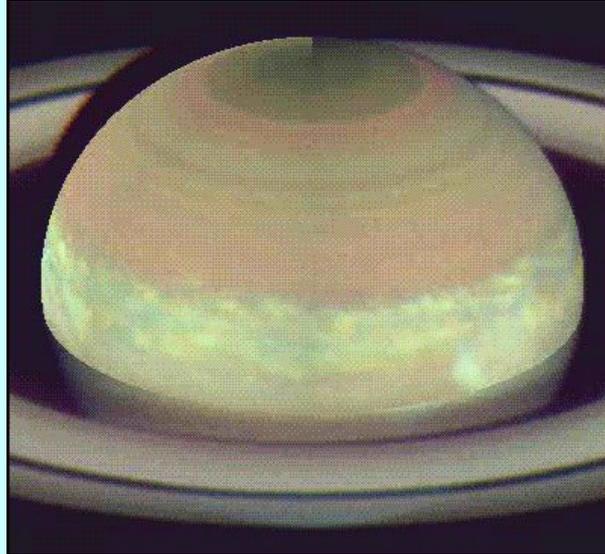
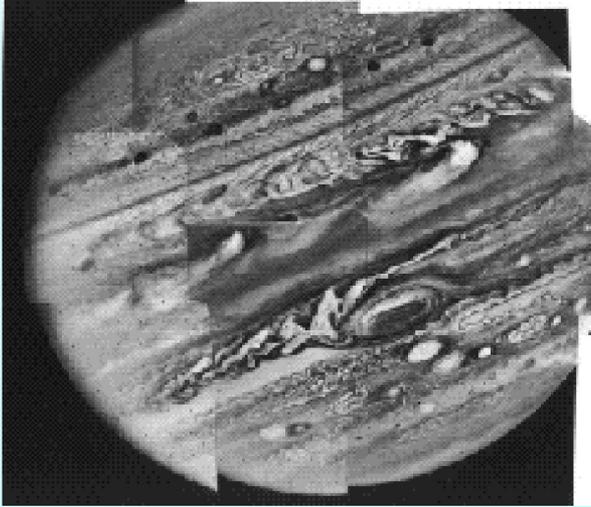
- Разреженная холодная атмосфера (6 мбар, - 50°C).
- Поверхность: пустыня с обилием пыли и камней.
- Геология: крупнейшие вулканы, разломы.
- Палеоклимат, причина катастрофической потери атмосферы.
- История воды, ее современные запасы.
- Есть ли (Была ли) жизнь на Марсе?



Вода на Марсе: Следы водной эрозии



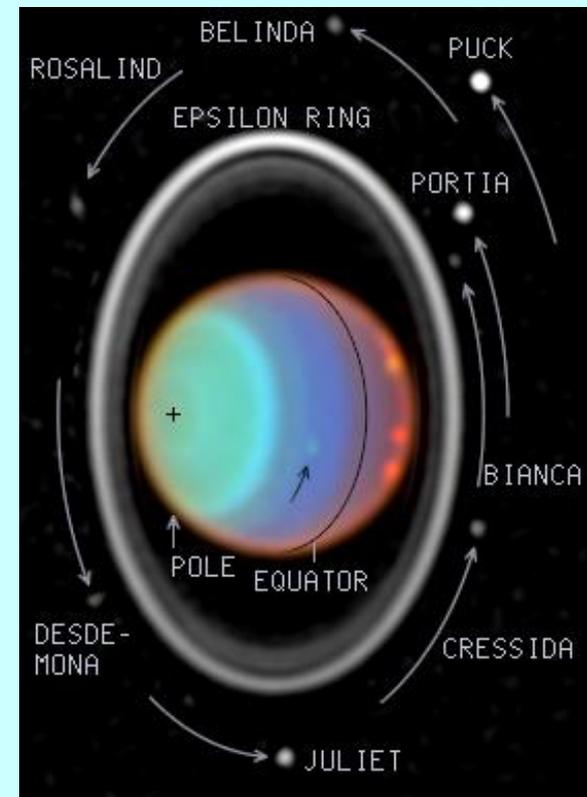
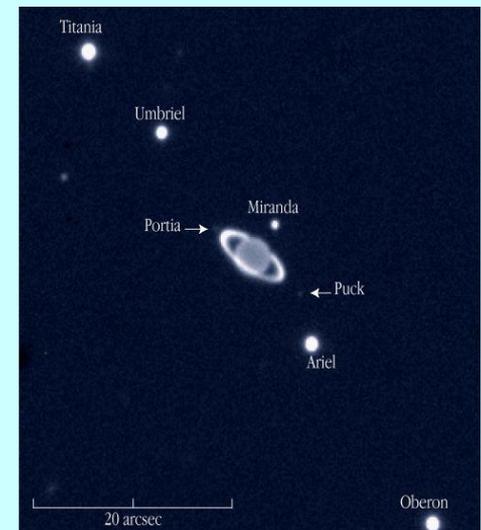
Планеты-гиганты: Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун



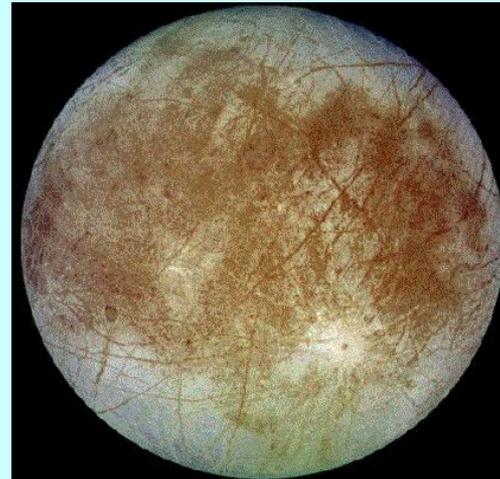
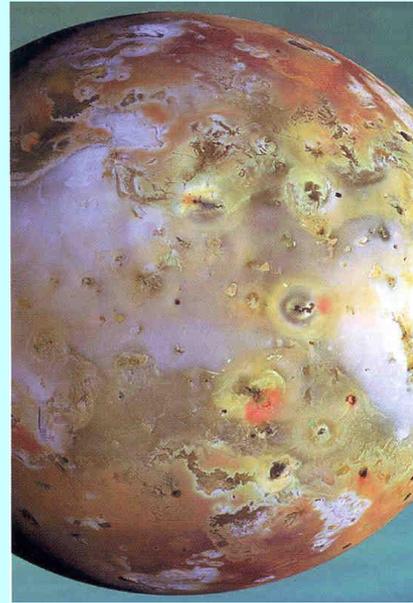
Атмосферы планет-гигантов чрезвычайно динамичны и характеризуются широким спектром движений, в т.ч. вихревых.

Спутники и кольца планет

- У планет земной группы только 3 спутника: наша Луна и спутники Марса Фобос и Деймос.
- Все планеты-гиганты имеют спутники (> **150**) и кольца:
 - Юпитер **69**; Сатурн **61**;
 - Уран **21**; Нептун **11**.
- Крупнейшие спутники:
 - Галилеевы спутники Юпитера **Ио, Европа, Ганимед, Каллисто**
 - Спутник Сатурна **Титан**
 - Спутник Нептуна **Тритон**
 - Наша **Луна**.
- Все спутники и частицы колец состоят из каменных и ледяных пород.

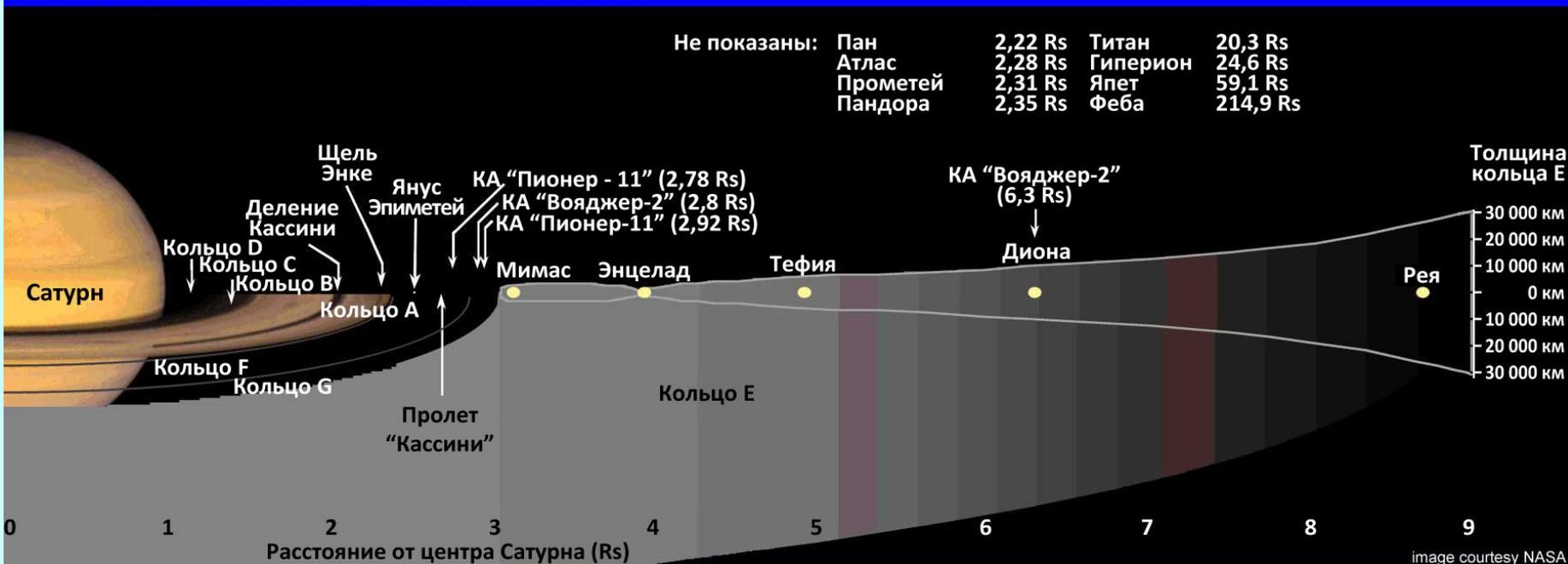


Галилеевы спутники Юпитера

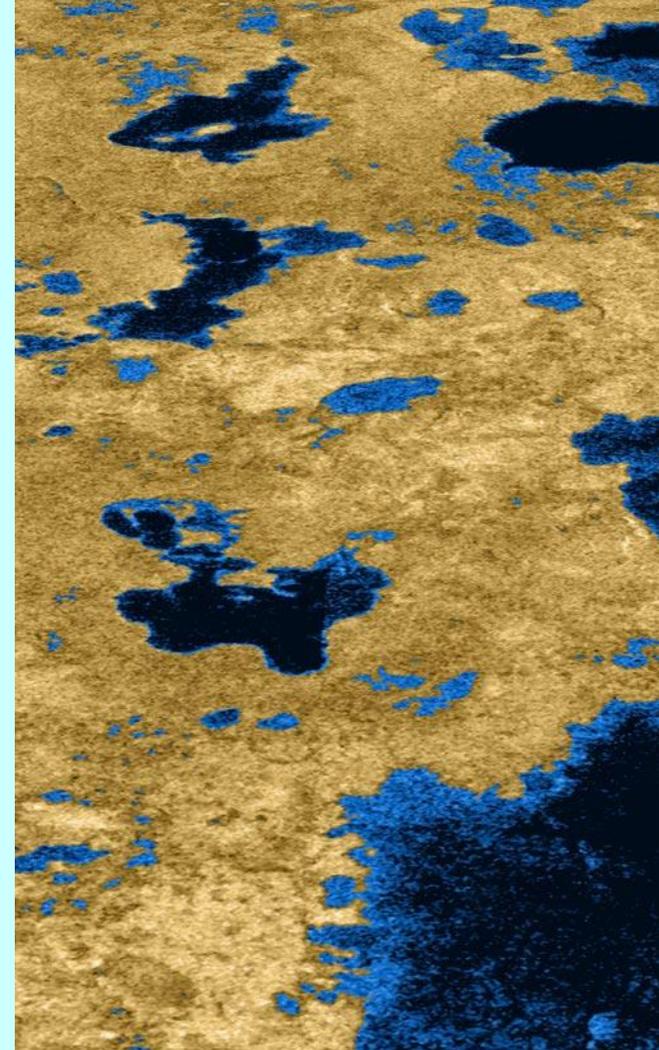
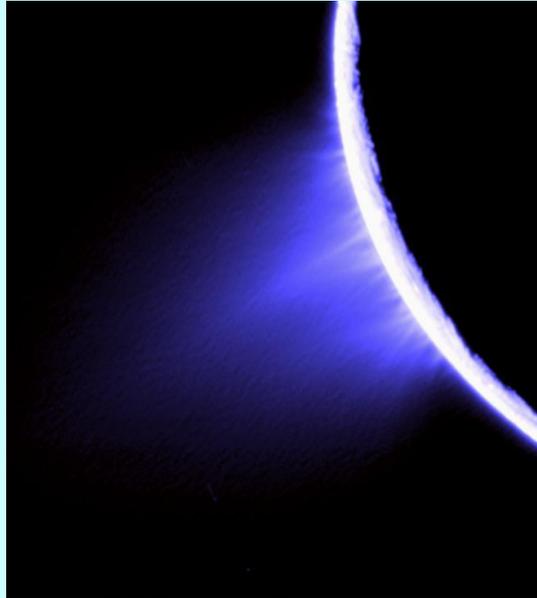
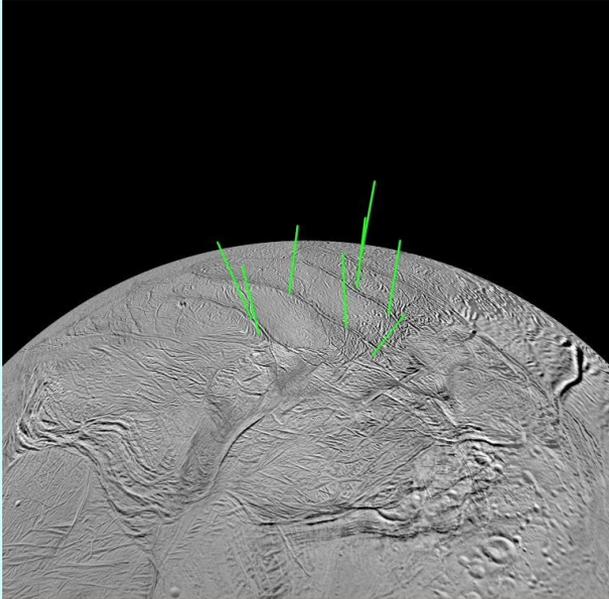


Спутники планет испытывают взаимные приливные взаимодействия в гравитационном поле планеты, что создает их уникальные природные свойства.

Система спутников и колец Сатурна

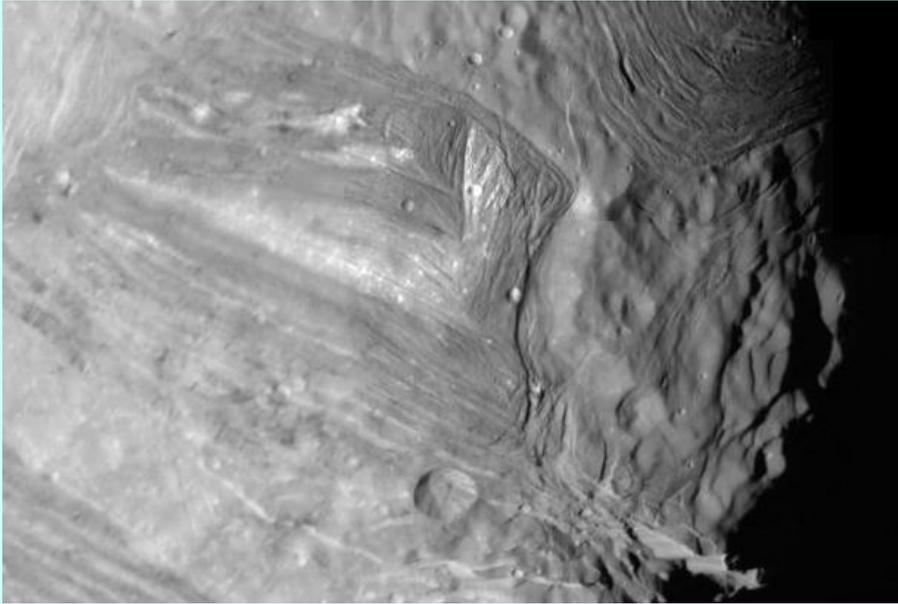


Спутники Сатурна Энцелад и Титан



- На Энцеладе размером всего ~ 500 км обнаружены водяные гейзеры, обусловленные, вероятно, приливными силами. Под его ледяной поверхностью могут находиться резервуары воды.
- На поверхности Титана обнаружены следы жидкого и замерзшего метана при $T_s = 92$ К.
- Вероятно комплексные химические реакции с участием углеводородов - начальные этапы перехода от сложной органики к биологии, подобные тем, которые могли быть на ранней Земле.

Примеры других спутников



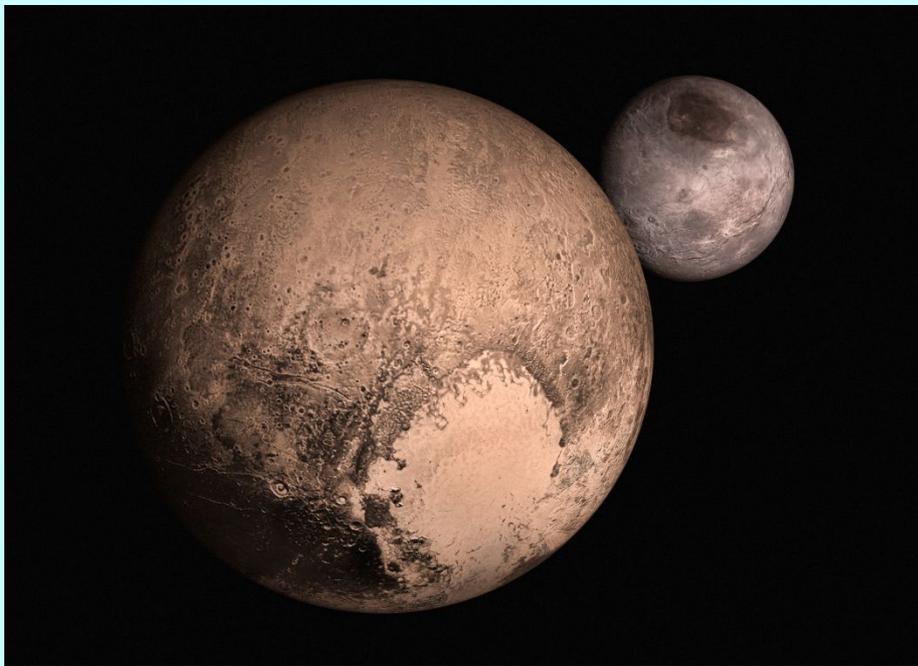
- **Сильно модифицированная поверхность Миранды обусловлена разогревом при ударных воздействиях**
- **Феба является сильно пористым телом наподобие кометного ядра.**



Плутон и Харон: Миссия «Новые горизонты»

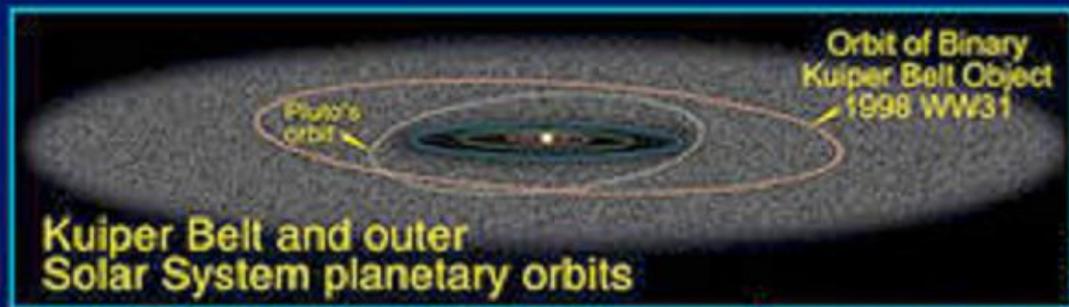


Двойная система Плутон-Харон имеет синхронное вращение (аналог геостационарного ИСЗ).



Малые тела: астероиды и КОМЕТЫ

Основные семейства малых тел



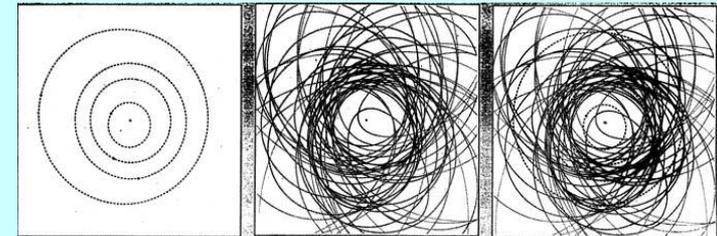
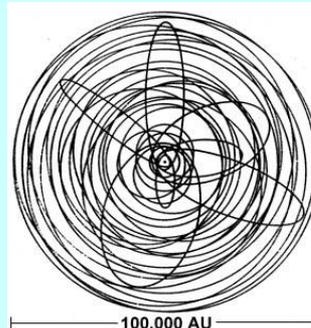
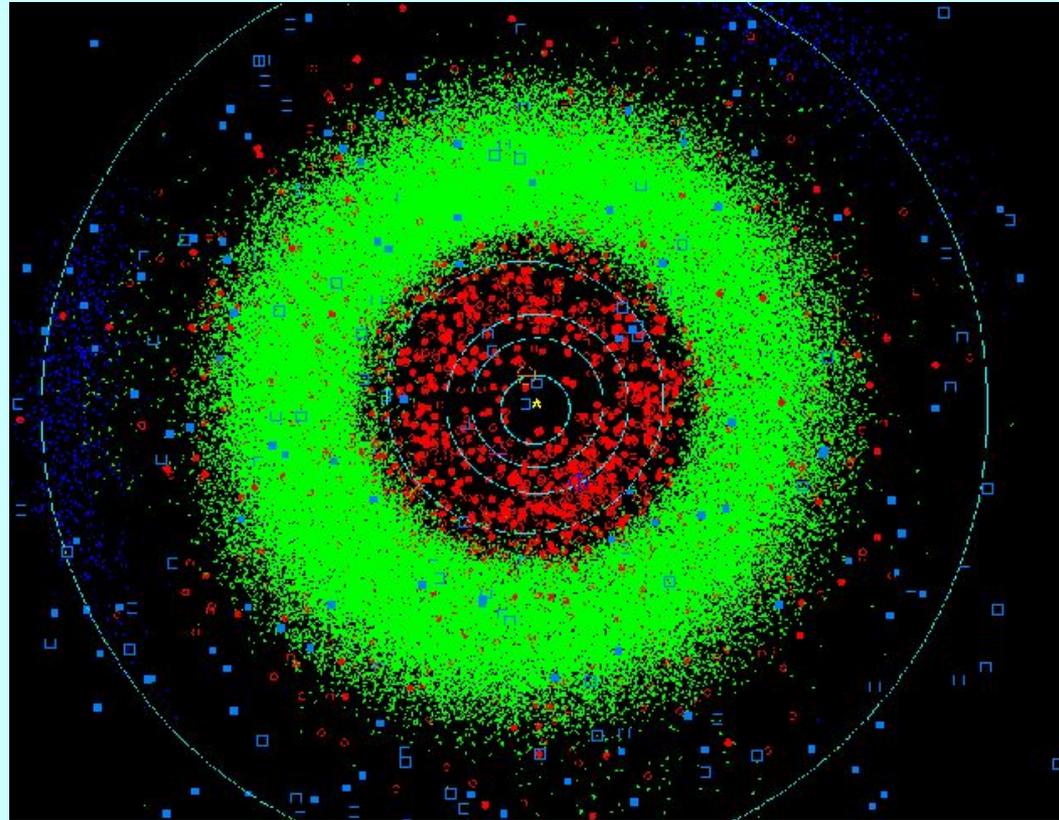
Kuiper Belt and outer Solar System planetary orbits

The Oort Cloud (comprising many billions of comets)

- Пояс Койпера за орбитой Плутона (~ 40 – 100 а.е.), карликовые планеты-плутоиды и астероиды-кометы ~ 10^8 тел.
- Облако Оорта (~ 10^3 – 10^5 а.е., ~ 10^{13} комет)

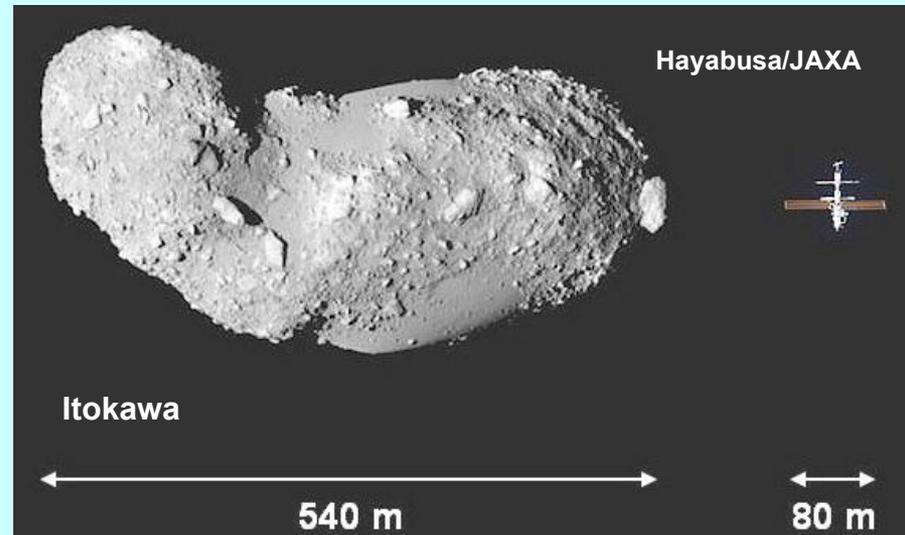
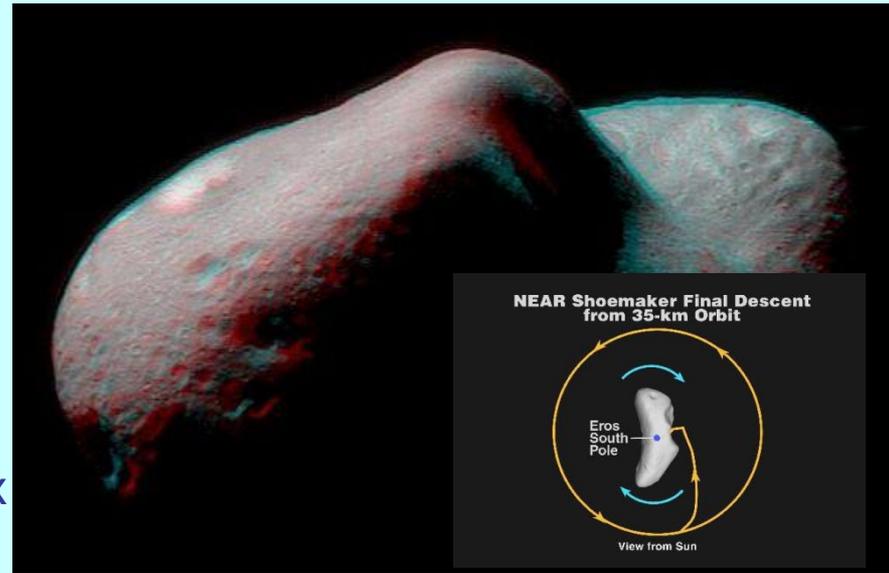
Главный пояс астероидов и астероиды, сближающиеся с Землёй (NEO)

- **Главный пояс астероидов** расположен между орбитами Марса и Юпитера на расстояниях от 2,8 до 3,4 а.е.
- Часть астероидов постоянно дрейфует во внутренние области Солнечной системы, образуя группы астероидов, сближающихся с Землей.
- **3 Группы NEO:**
 - **Амур** – пересекающие орбиту Марса, приближающиеся к орбите Земли и эволюционирующие в NEO за 100 - 1000 лет.
 - **Аполлон** – пересекающие орбиту Земли.
 - **Атон** – заходящие внутрь орбиты Земли.
- NEO представляют большую потенциальную угрозу Земле.

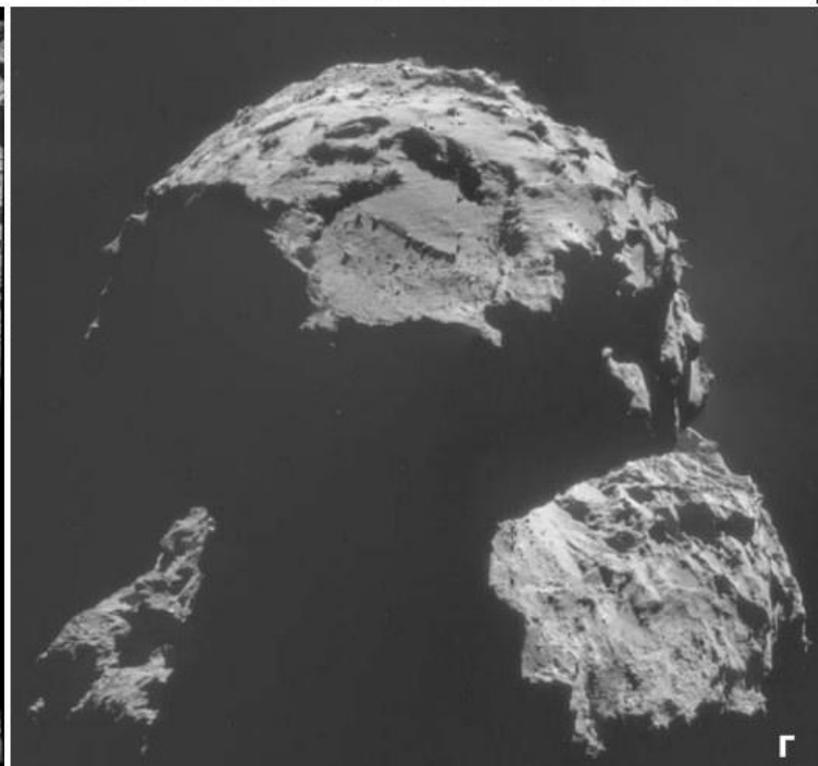
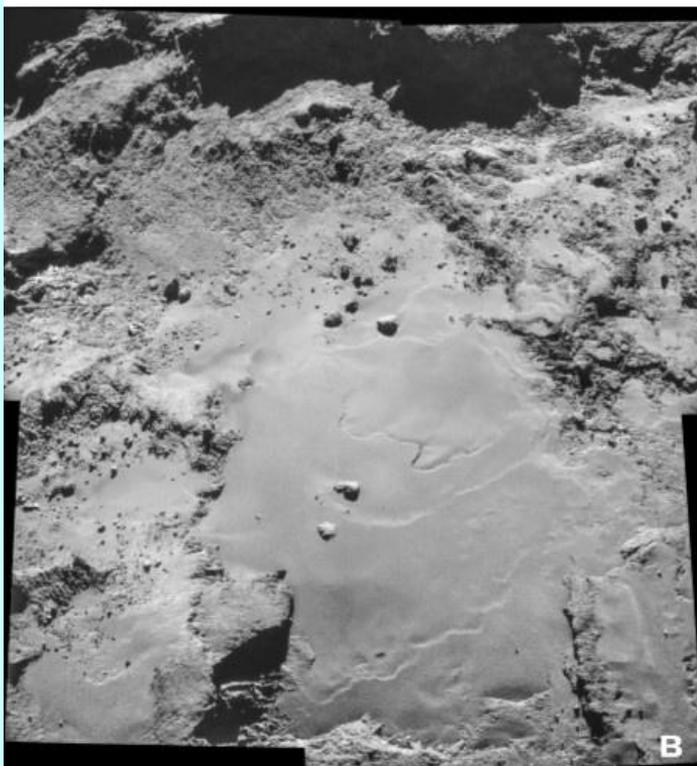
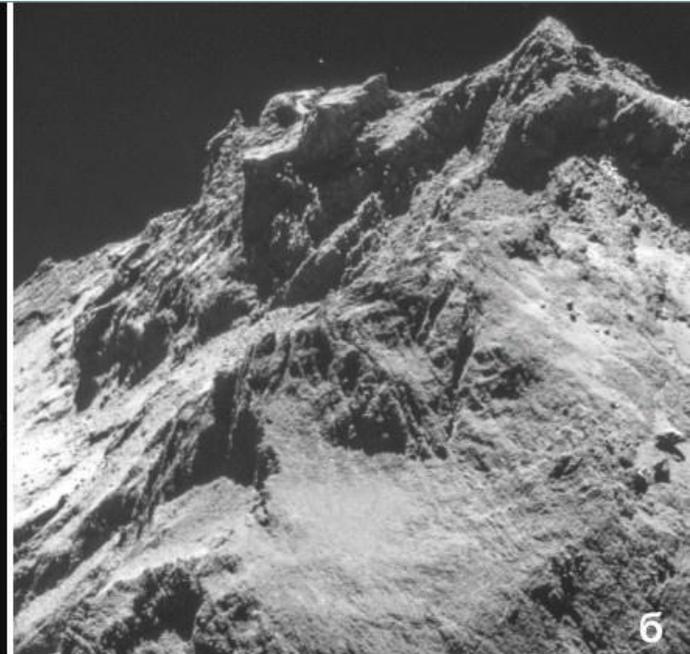


Астероиды

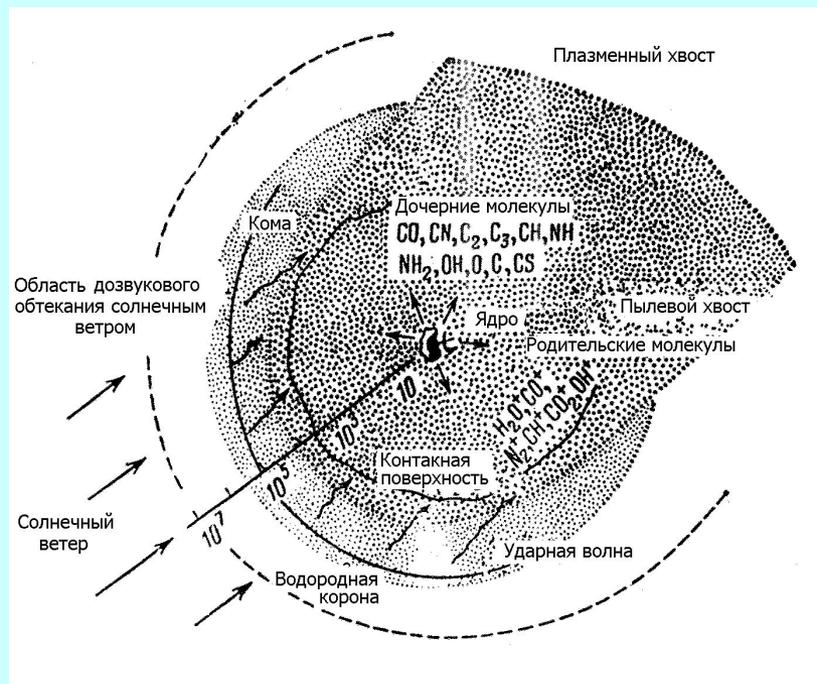
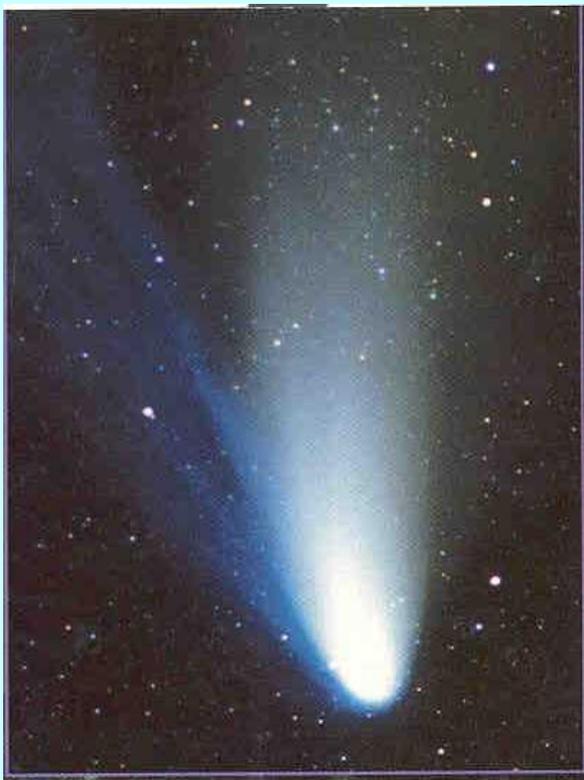
- Кометы и астероиды содержат первичное вещество, из которого сформировалась Солнечная система.
- Доставка проб этого вещества на Землю – ключ к решению проблемы генезиса планет.
- Космохимия – основа реконструкции химических и фазовых процессов, лежащих в основе зарождения и ранних этапов эволюции небесных тел.



**Комета
67P
Чурюмова-
Герасименко
(Фото с КА
«Розетта»)**



Кометы



- Ядро кометы – «грязный снежный ком» (~ 10-15 км).
- При сближении кометы с Солнцем сублимация льда вместе с пылью образует кому и протяженный хвост.

Миграционно – столкновительные процессы

- .Миграция малых тел в Солнечной системе приводит к их столкновениям с планетами.
- Вследствие миграции происходит транспорт вещества - планеты не изолированы!.
- Миграция ледяных малых тел с периферии Солнечной системы могла компенсировать дефицит летучих на планетах земной группы и сыграть ключевую роль в образовании гидросферы и атмосферы Земли.
- Количество воды, доставленной за счет миграции малых тел могло быть равным объему земных океанов.
- С миграцией малых тел связана проблема астероидной опасности.



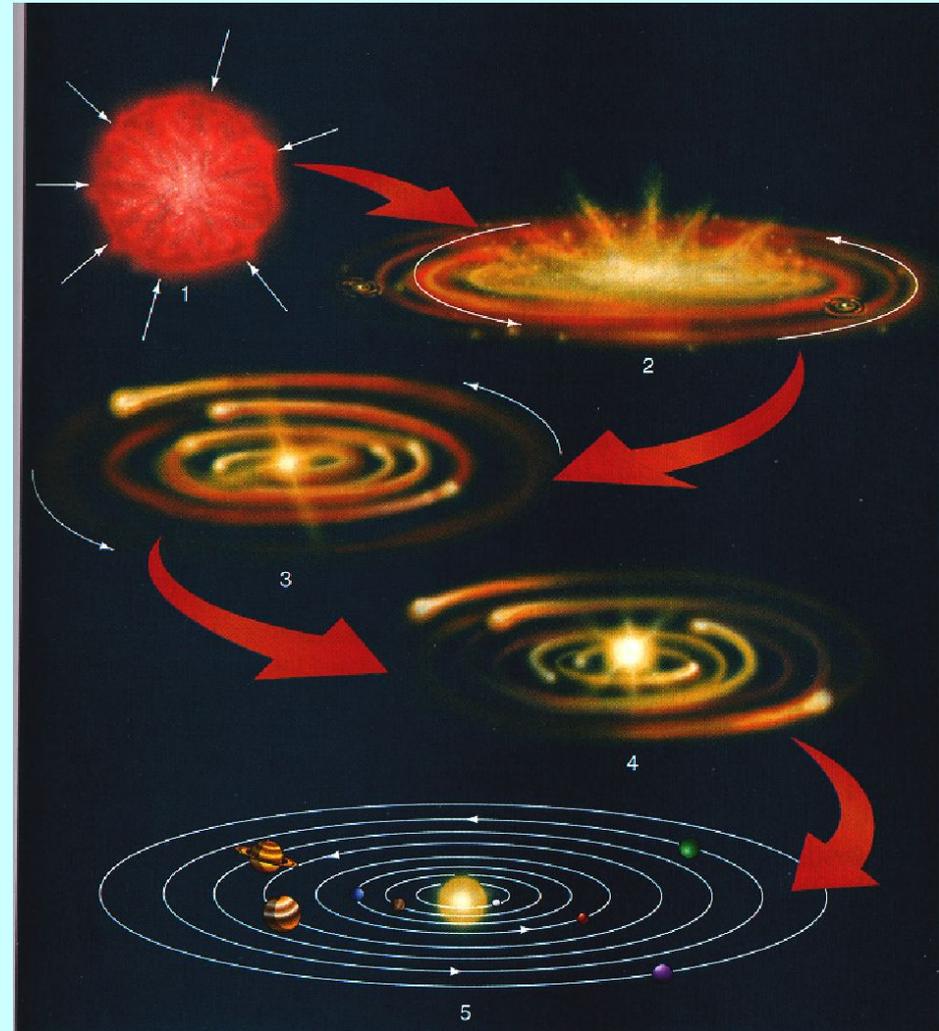
Как мы возникли?

Космогония: Происхождение и эволюция Солнечной системы.

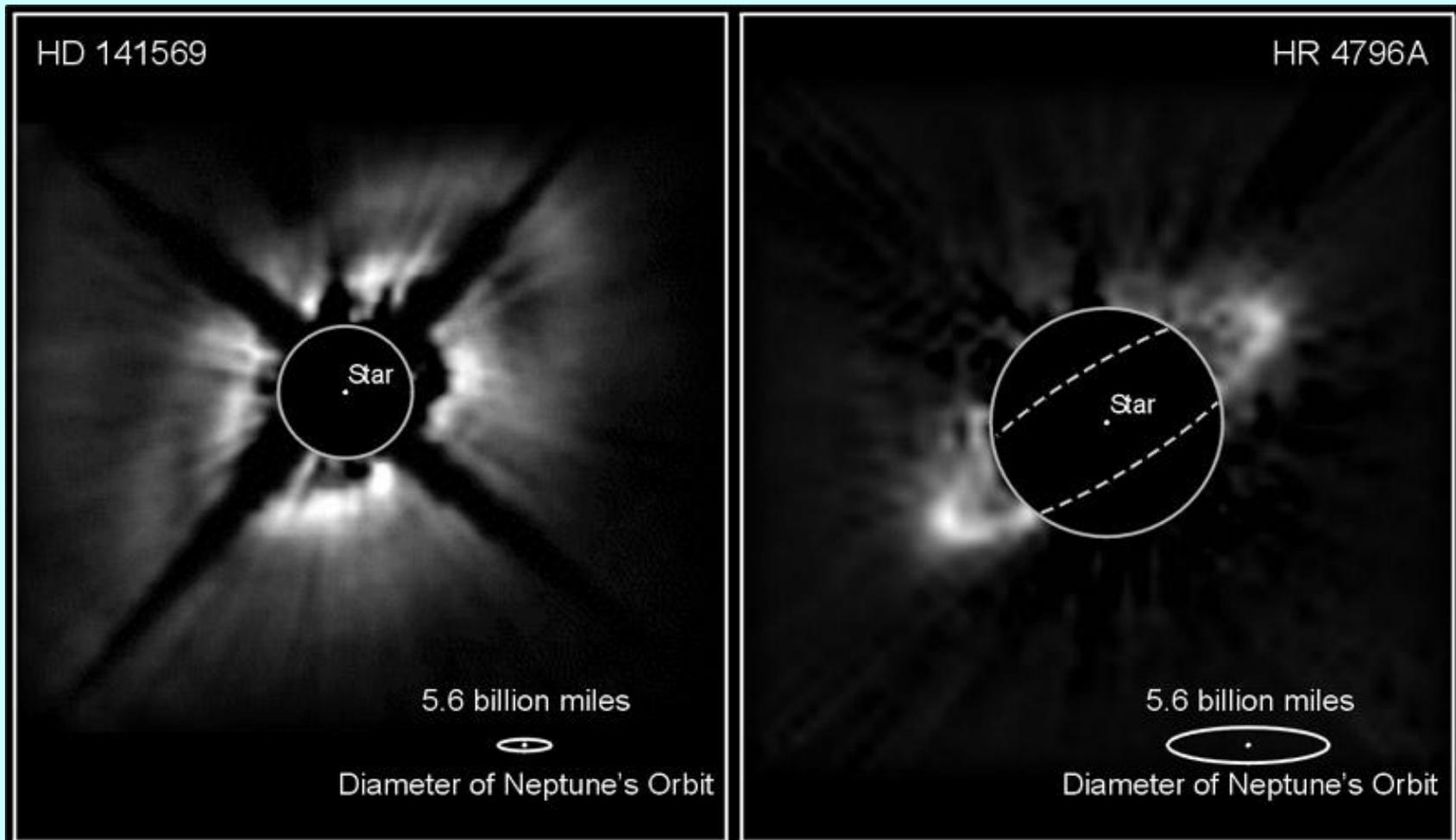
Другие планетные системы, экзопланеты.

Фундаментальные основы космогонии

- Планеты образуются из газопылевых дисков, которые формируются вокруг звезд, рождающихся в молекулярных облаках.
- Протопланетные диски размером порядка нашей Солнечной системы обнаружены у соседних звезд.
- Механические и космохимические свойства Солнечной системы налагают важные ограничения на создаваемые космогонические модели.
- До недавнего времени нам был известен лишь один пример планетной системы – наша Солнечная система.
- Большой прогресс в космогонии достигнут благодаря открытию у многих звёзд аккреционных протопланетных дисков и свыше 4000 экзопланет и планетных систем.



Газопылевые диски вокруг звёзд

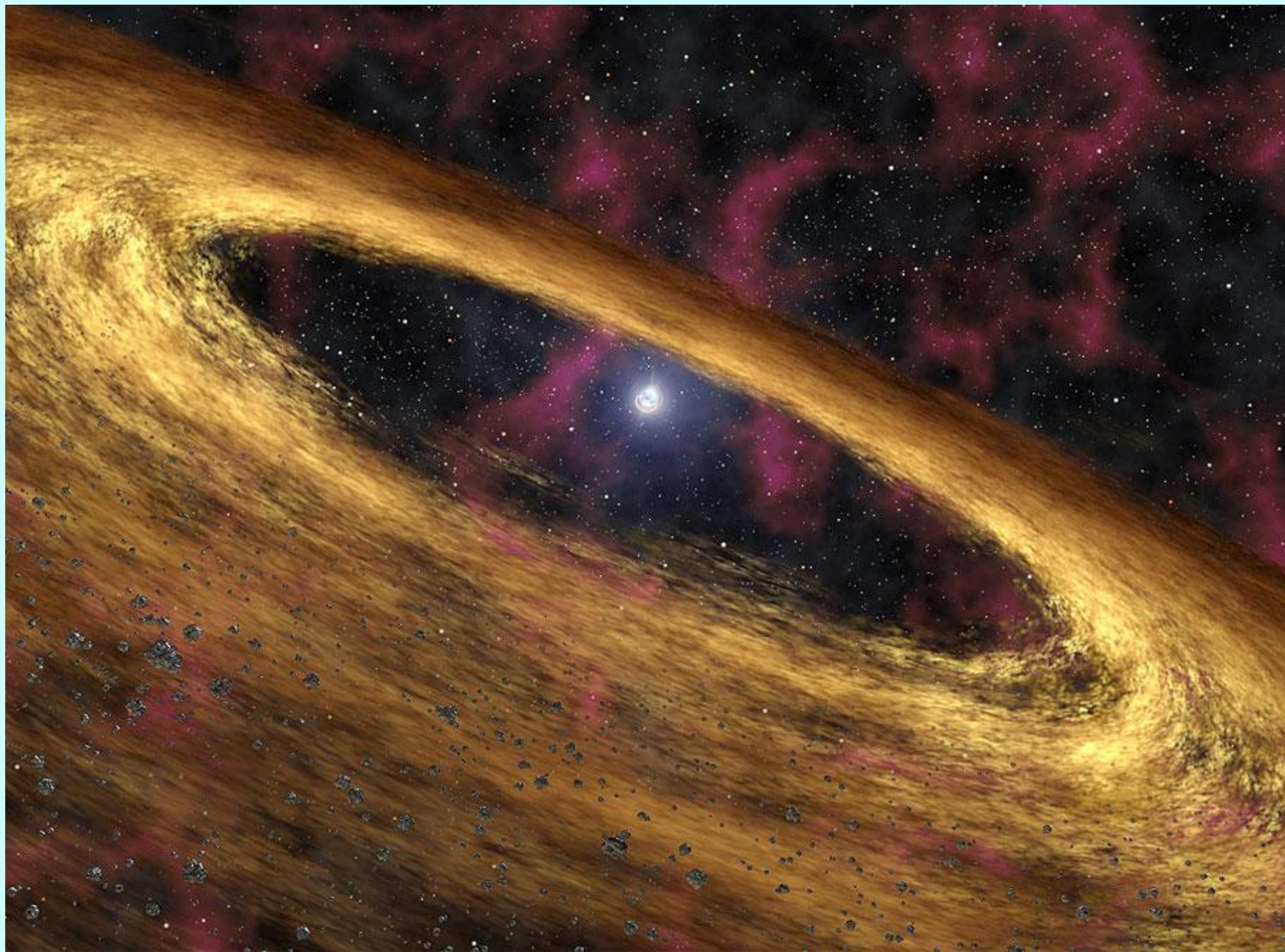


Dust Disks around Stars

PRC99-03 • STScI OPO • January 8, 1999

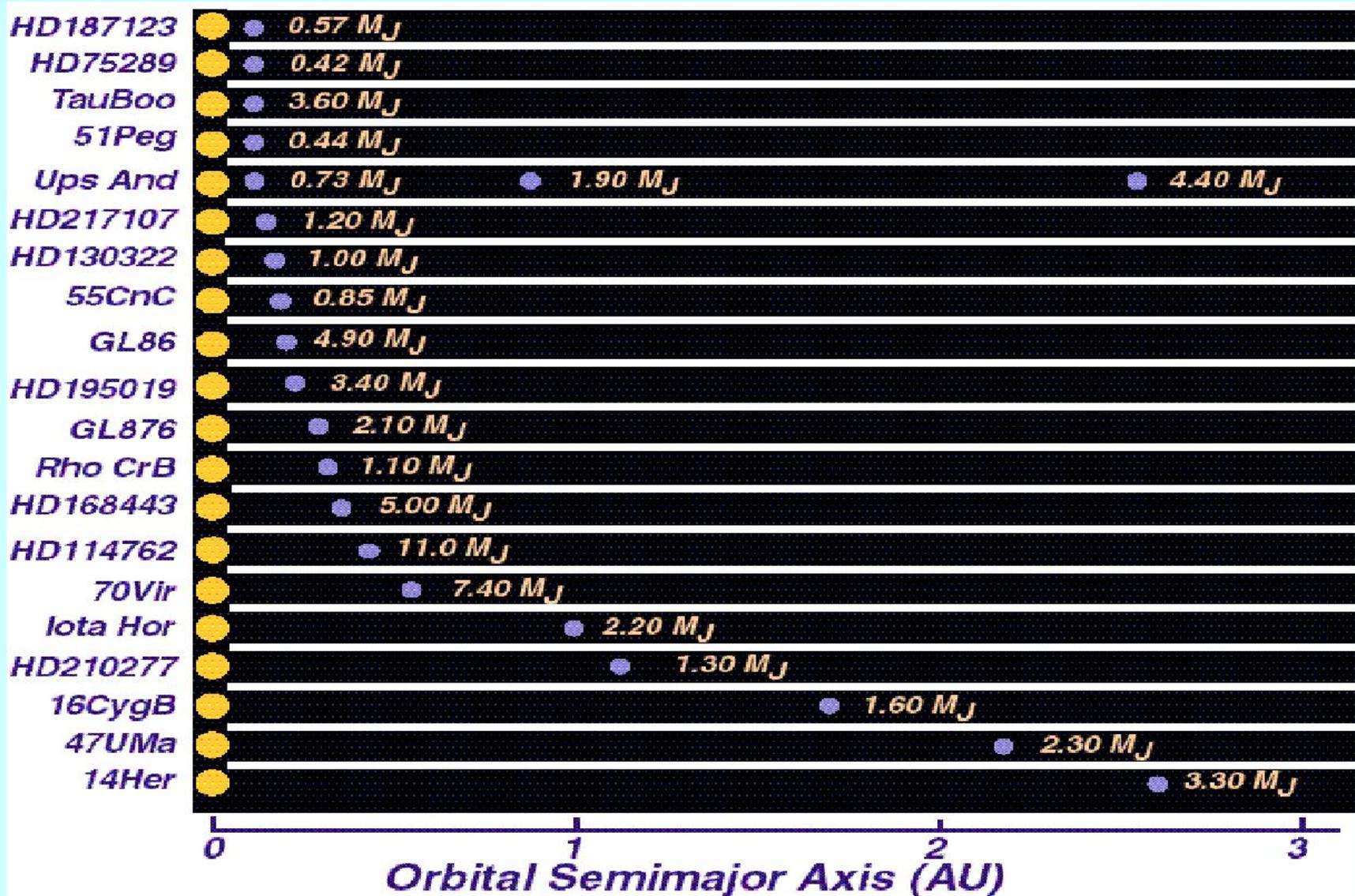
B. Smith (University of Hawaii), G. Schneider (University of Arizona),
E. Becklin and A. Weinberger (UCLA) and NASA

HST • NICMOS



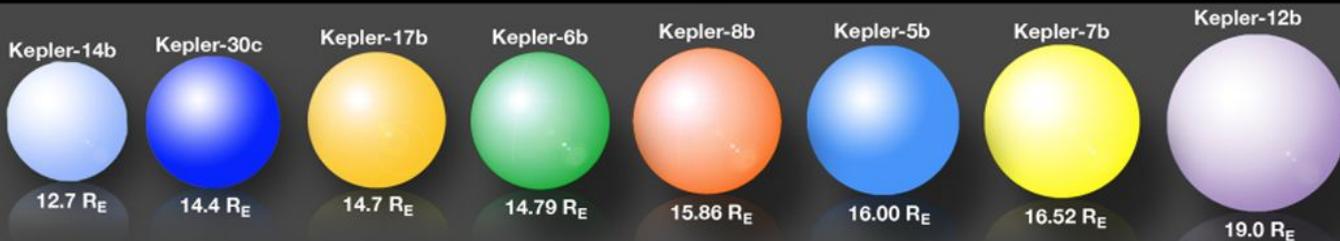
Примеры внесолнечных планет:

Распределение по массам и большим полуосям



Экзопланеты

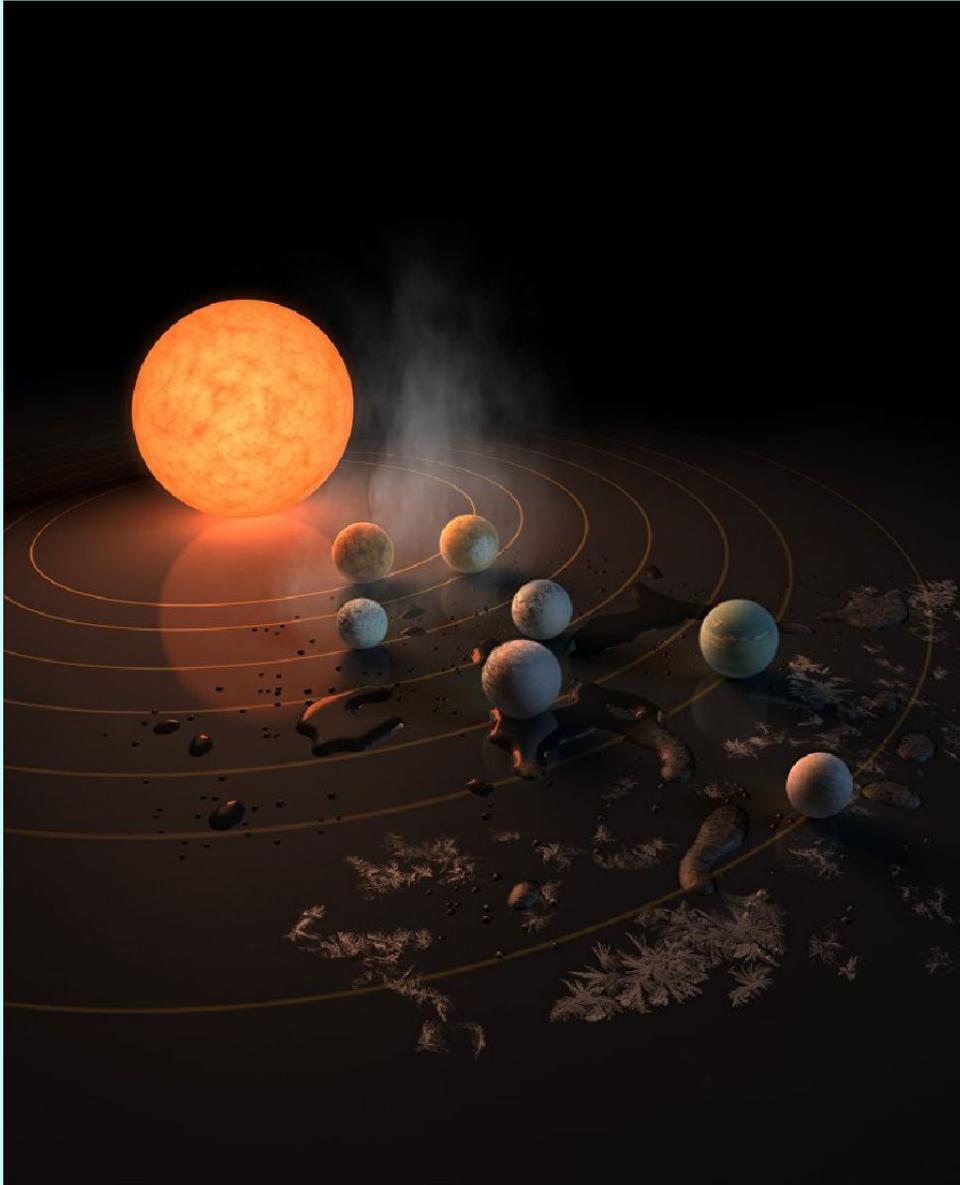
Планеты открытые телескопом Кеплер (на 27 февраля 2012г.)



Экзопланеты вблизи родительской звезды



Планетная “семья” Trappist-1

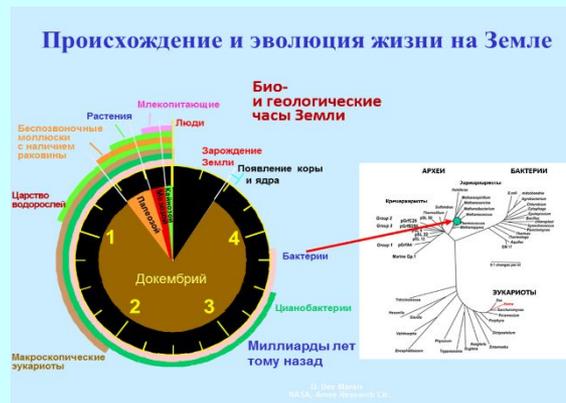


- В этой планетной системе все 7 планет находятся внутри области, размер которой в 20 раз меньше расстояния между Землей и Марсом.
- Сама область расположена близко к родительской звезде красному карлику с температурой поверхности $\sim 4\,000\text{ K}$.
- Две планеты находятся в области с благоприятным климатом, на их поверхности может быть жидкая вода.

**Как возникла жизнь?
Астробиология: Есть ли жизнь
и внеземной разум во
Вселенной?**

Ключевые вопросы астробиологии:

- Как жизнь возникла и эволюционировала?
- Каковы необходимые предпосылки и природные условия для возникновения жизни?
- Что выделило Землю среди других планет Солнечной системы для возникновения жизни и её развития до интеллектуального уровня?
- Существует ли примитивная жизнь на Марсе и Европе, Энцеладе, как происходила эволюция органического вещества на Титане?
- Какова вероятность локального (*in situ*) возникновения жизни по сравнению с её приносом извне (гипотеза панспермии)?
- Каковы перспективы поиска внеземных цивилизаций (проблема SETI)?

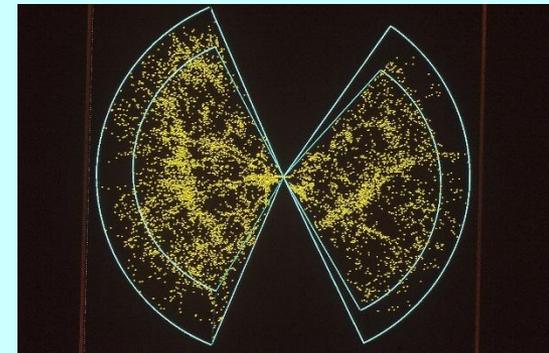
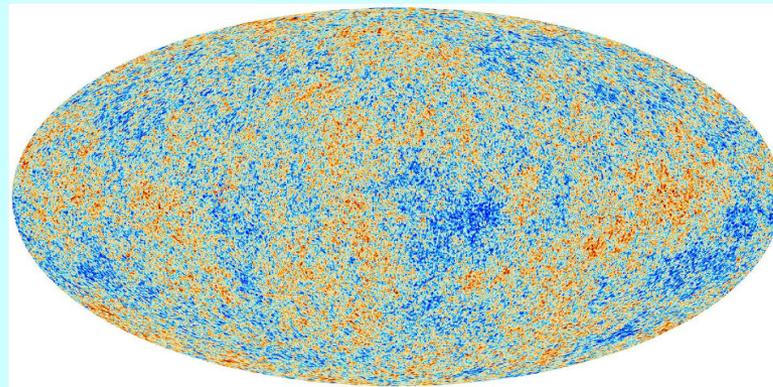
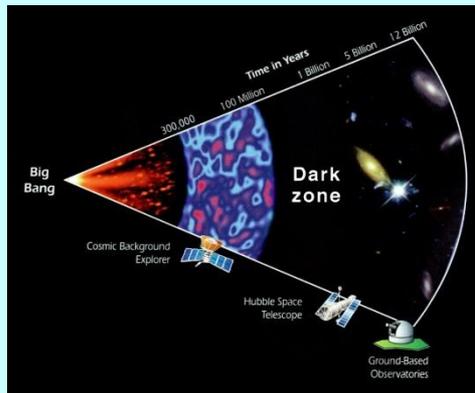


**Откуда мы пришли и куда
движемся?**

**Космология: Происхождение,
эволюция и судьба Вселенной**

1. Гипотеза Большого взрыва и данные в ее поддержку:

- хаббловское разбегание галактик;
- фоновое микроволновое излучение (СМВ), $T = 2.735 \text{ K}$;
- флуктуации СМВ, как источник космической паутины;
- наличие первичных легких элементов (hydrogen, deuterium, helium, and lithium) в нужной пропорции.



2. Теория суперинфляции

3 Синергизм макро- и микромира

4 Стандартная модель и Великое объединение

5 Мультивселенная и кротовые норы

Основные темы

- Понятие космоса составляют области пространства от Земли до границ наблюдаемой Вселенной ($\sim 13,7$ млрд. св. лет = $\sim 4 \times 10^9$ пк), которые включают в себя многообразие сред с различными свойствами.
- Наше ближайшее космическое окружение Солнечная система ($\sim 10^5$ а.е. = $\sim 10^{-1}$ пк) – это уникальная природная среда с огромным разнообразием небесных тел, природных механизмов и взаимодействий.
- Венера и Марс служат предельными моделями эволюции Земли, изучаемой на основе сравнительной планетологии.
- Малые тела: Главный пояс астероидов, пояс Койпера и облако Оорта.
- Космические исследования принципиально изменили представления об окружающей среде, о природе галактик, звёзд, планет, их спутников, комет, астероидов и свойствах вещества в экстремальных условиях.
- Открытие аккреционных дисков, внесолнечных планет обеспечили прогресс в решении фундаментальных проблем космогонии.
- Новое научное направление – астробиология изучает комплекс проблем, связанных с происхождением и поиском жизни во Вселенной.
- Космология стала экспериментальной наукой и обогатила наши представления о зарождении, эволюции и судьбе Вселенной.
- Перспективы космических исследований до середины XXI столетия - переход к освоению Луны и пилотируемому полёту к Марсу.