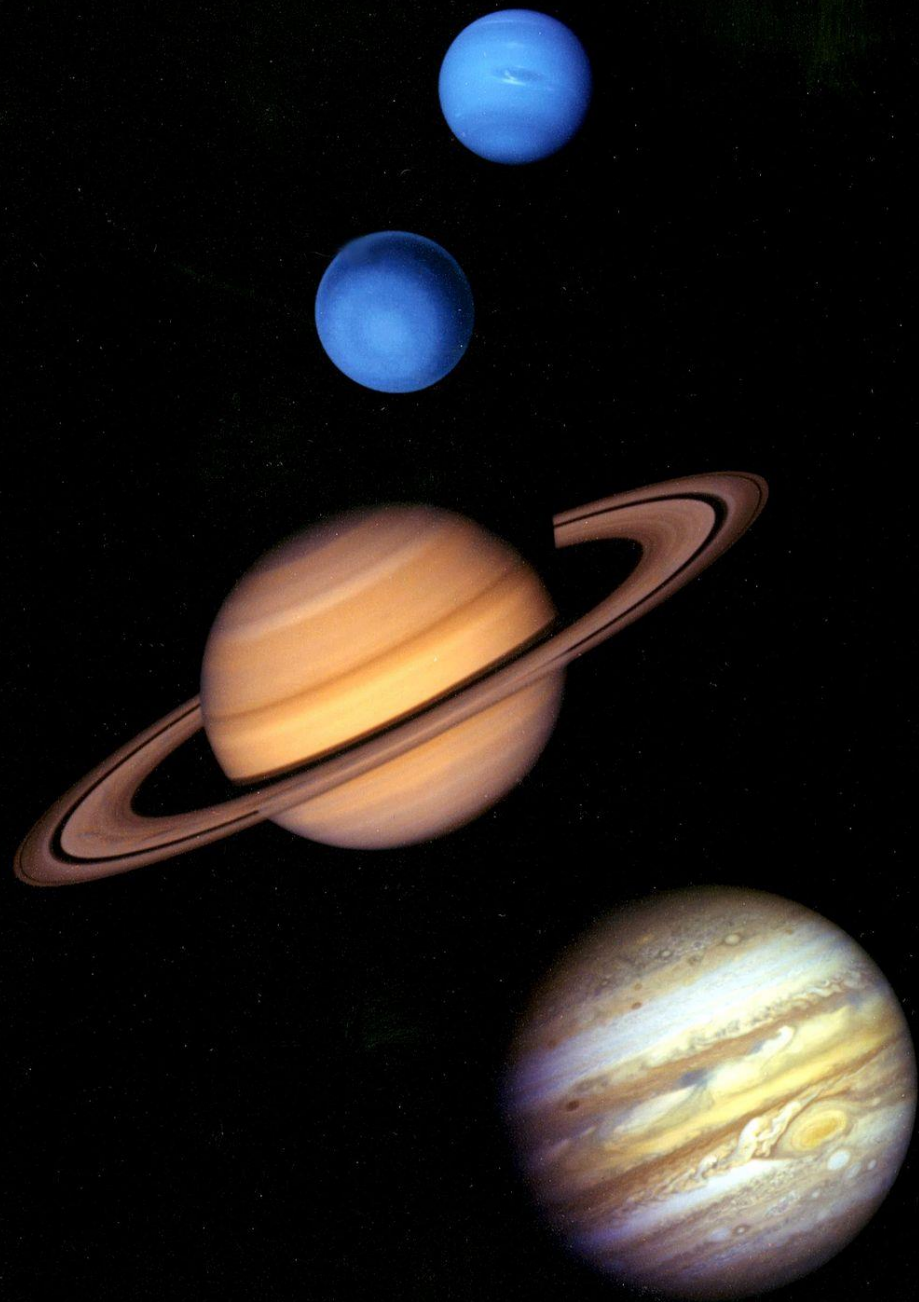
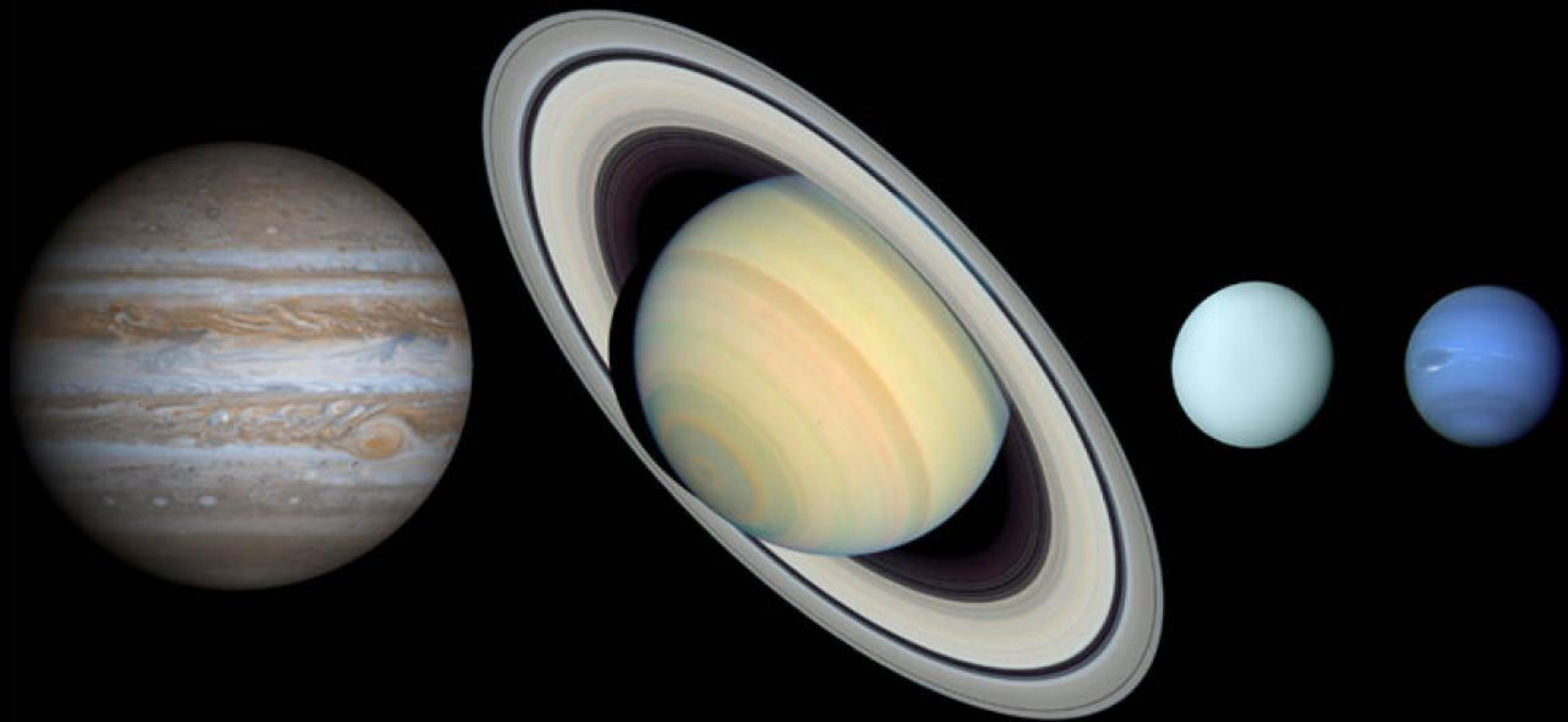


# Планеты-гиганты



Дмитрий Горинов  
ИКИ РАН



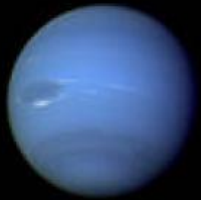


♃



♄

♅



♆

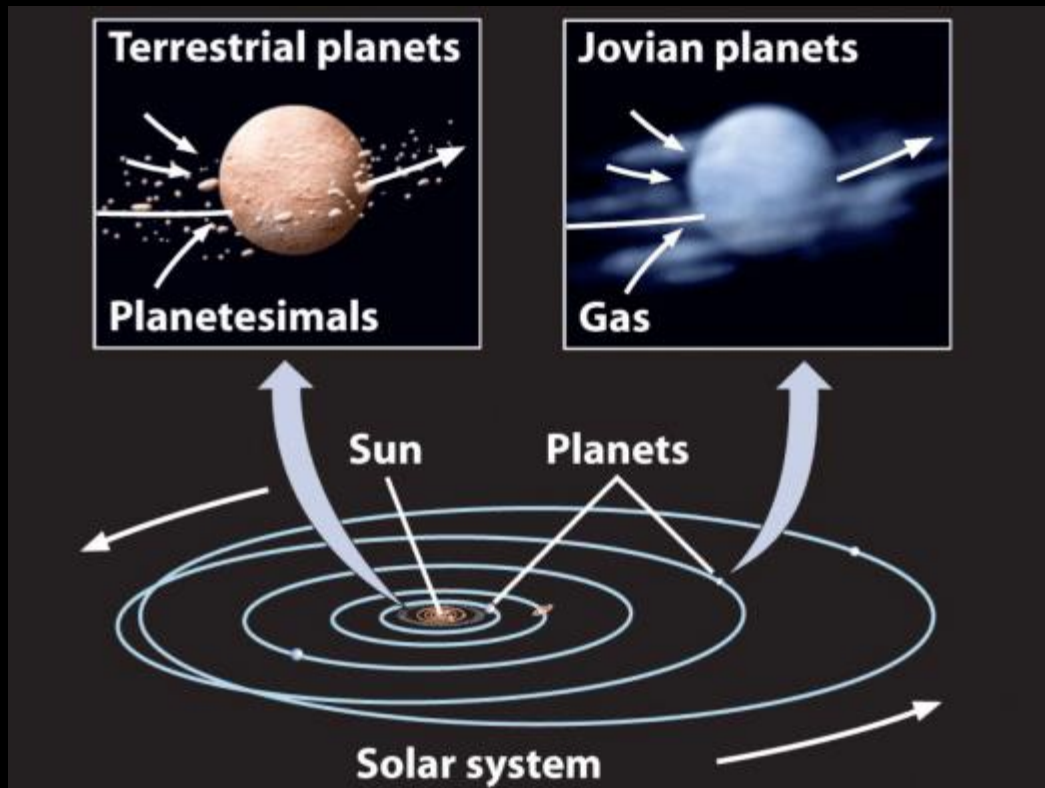


$\omega$



$\hbar$

## Формирование планет-гигантов из протопланетарного диска



Внутренние планетезимали формировались из каменных и металлических частиц; Внешние – ещё и из ледяных частиц.

Внешние планетезимали стали ядрами будущих планет.

Большие массы ( $\sim 15 M_{\text{земли}}$ ) позволили им захватить **H** и **He** в больших количествах.

За Нептуном низкая плотность протопланетного диска не позволила сформироваться большим ядрам – им, как следствие, не удалось захватить достаточно газа для атмосферы (объекты пояса Койпера)



♃

$M = 318 M_{\text{земли}}$   
 $L \text{ до Солнца} = 5.2$   
AU  
 $T_{1 \text{ бар}} = 165 \text{ K}$   
89%  $\text{H}_2$ , 10% He



♄

$M = 95 M_{\text{земли}}$   
 $L \text{ до Солнца} = 9.6$   
AU  
 $T_{1 \text{ бар}} = 134 \text{ K}$   
96%  $\text{H}_2$ , 3% He

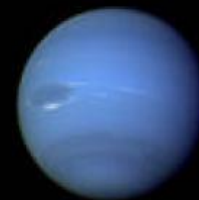
♅

$M = 15 M_{\text{земли}}$   
 $L \text{ до Солнца} = 19 \text{ AU}$   
 $T_{1 \text{ бар}} = 76 \text{ K}$   
83%  $\text{H}_2$ , 15% He, 2%  
 $\text{CH}_4$



♆

$M = 17 M_{\text{земли}}$   
 $L \text{ до Солнца} = 30$   
AU  
 $T_{1 \text{ бар}} = 72 \text{ K}$   
80%  $\text{H}_2$ , 19% He, 1%  
 $\text{CH}_4$





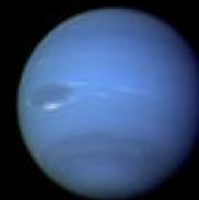
♃

$M = 318 M_{\text{земли}}$   
 $L \text{ до Солнца} = 5.2 \text{ AU}$   
 $T_{1 \text{ бар}} = 165 \text{ K}$   
89%  $\text{H}_2$ , 10% He



♄

$M = 95 M_{\text{земли}}$   
 $L \text{ до Солнца} = 9.6 \text{ AU}$   
 $T_{1 \text{ бар}} = 134 \text{ K}$   
96%  $\text{H}_2$ , 3% He



♅

$M = 15 M_{\text{земли}}$   
 $L \text{ до Солнца} = 19 \text{ AU}$   
 $T_{1 \text{ бар}} = 76 \text{ K}$   
83%  $\text{H}_2$ , 15% He, 2%  $\text{CH}_4$

♆

$M = 17 M_{\text{земли}}$   
 $L \text{ до Солнца} = 30 \text{ AU}$   
 $T_{1 \text{ бар}} = 72 \text{ K}$   
80%  $\text{H}_2$ , 19% He, 1%  $\text{CH}_4$

Spacecraft
Orbit
Inner
Atmosphere
Magnetic
Moons



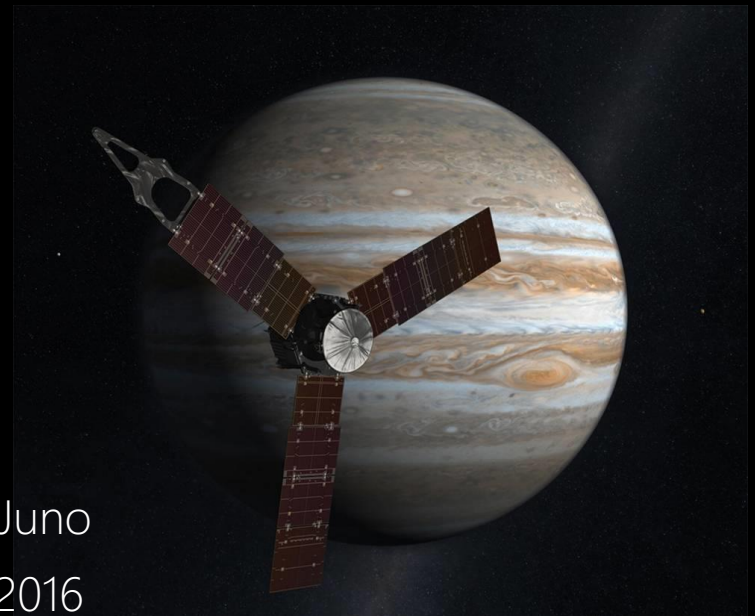
Pioneer 10-11  
1973-74



Voyager 1-2  
1979



Galileo  
1995

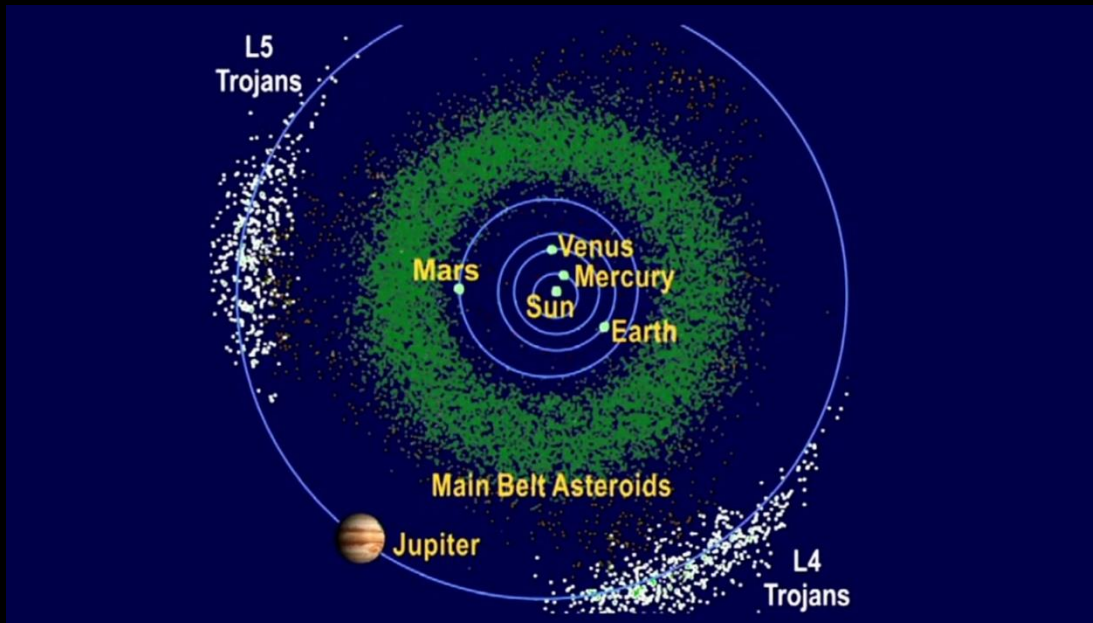


Juno  
2016

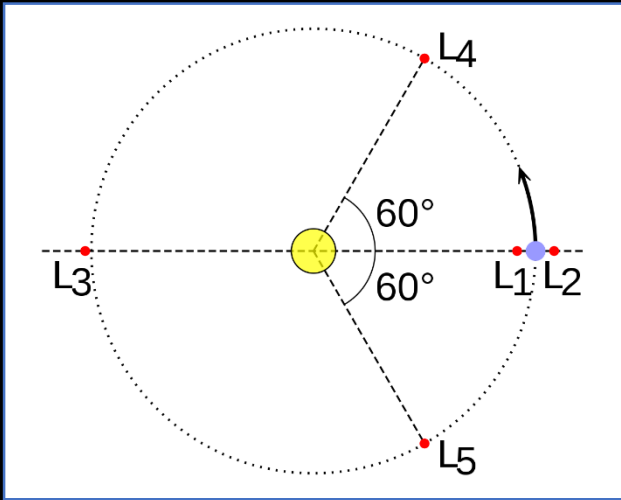


Spacecraft
Orbit
Inner
Atmosphere
Magnetic
Moons

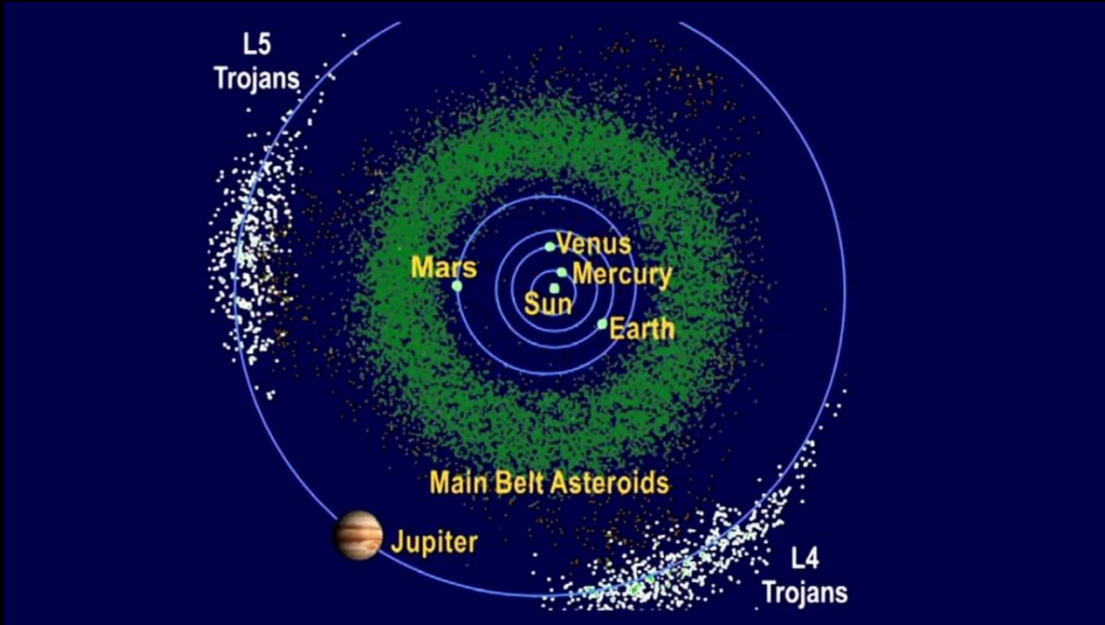
Гравитация Юпитера влияет на распределение астероидов



Spacecraft
Orbit
Inner
Atmosphere
Magnetic
Moons



Гравитация Юпитера влияет на распределение астероидов



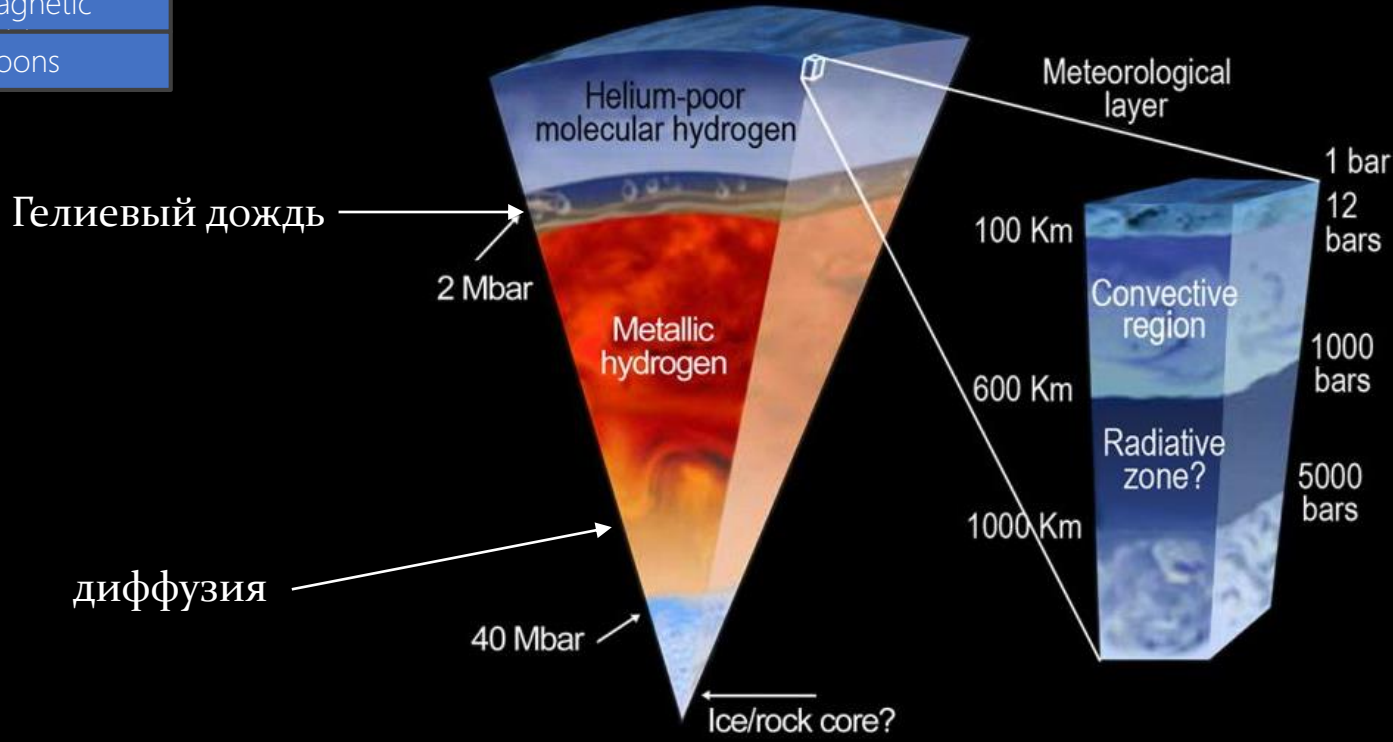
Spacecraft
Orbit
Inner
Atmosphere
Magnetic
Moons



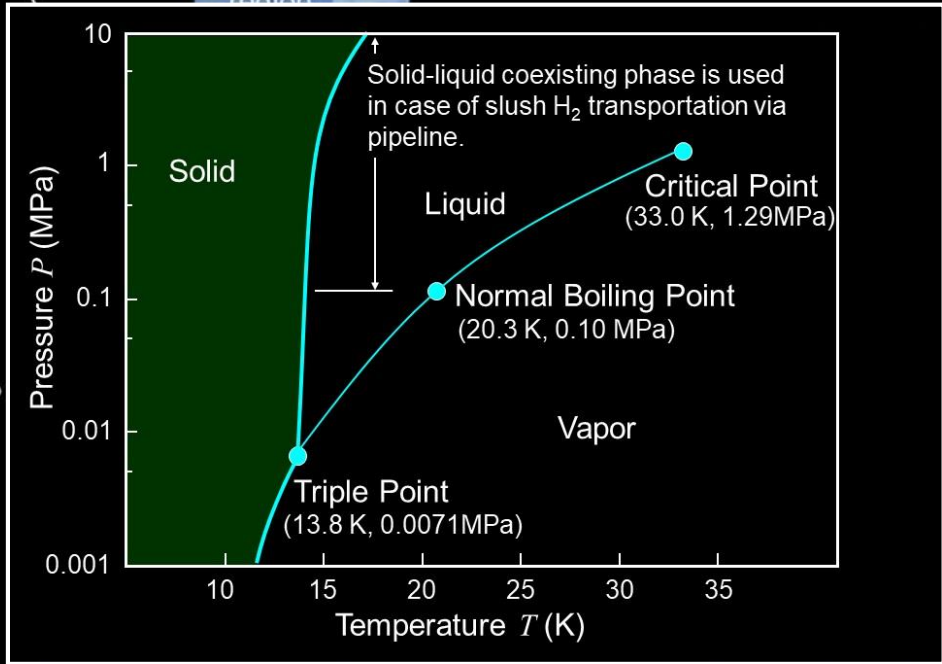
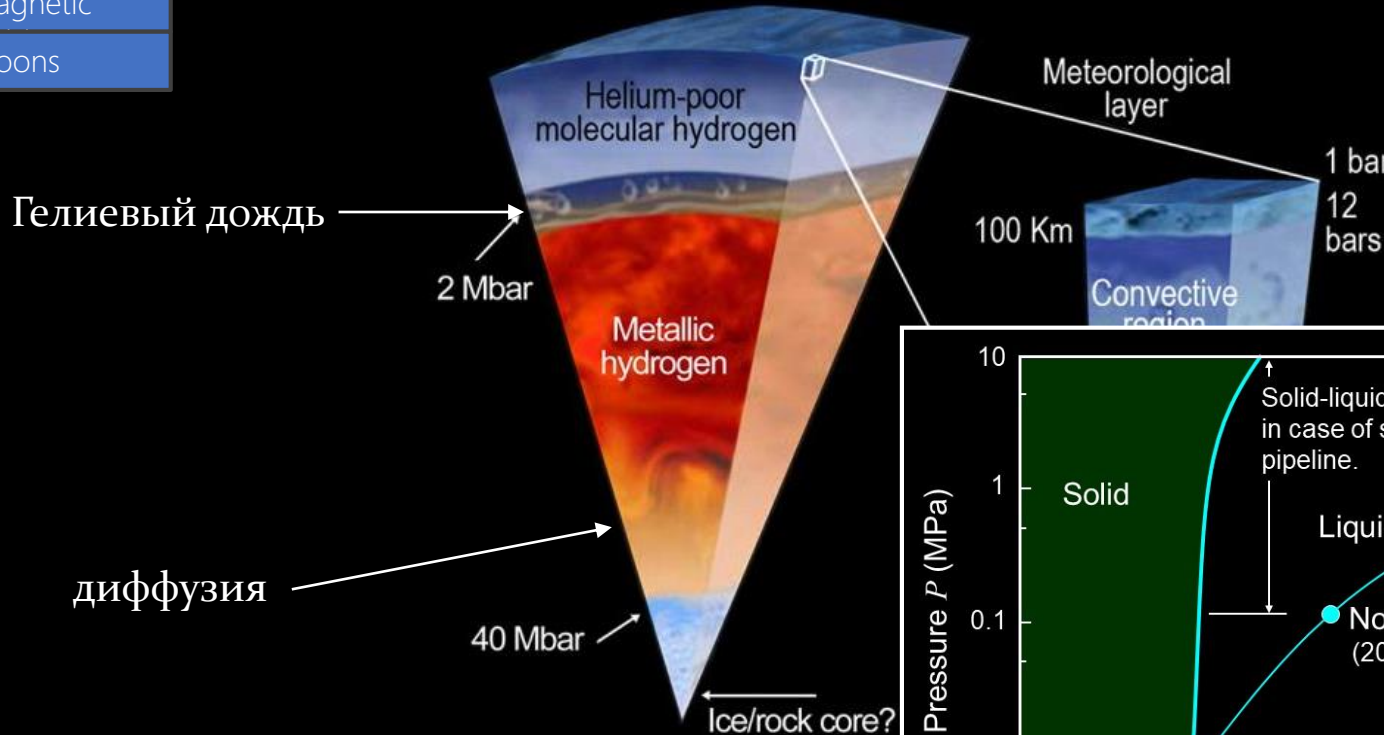
Наклон оси  $3^\circ$  - нет сезонных вариаций

Период обращения вокруг оси **9.9 ч**

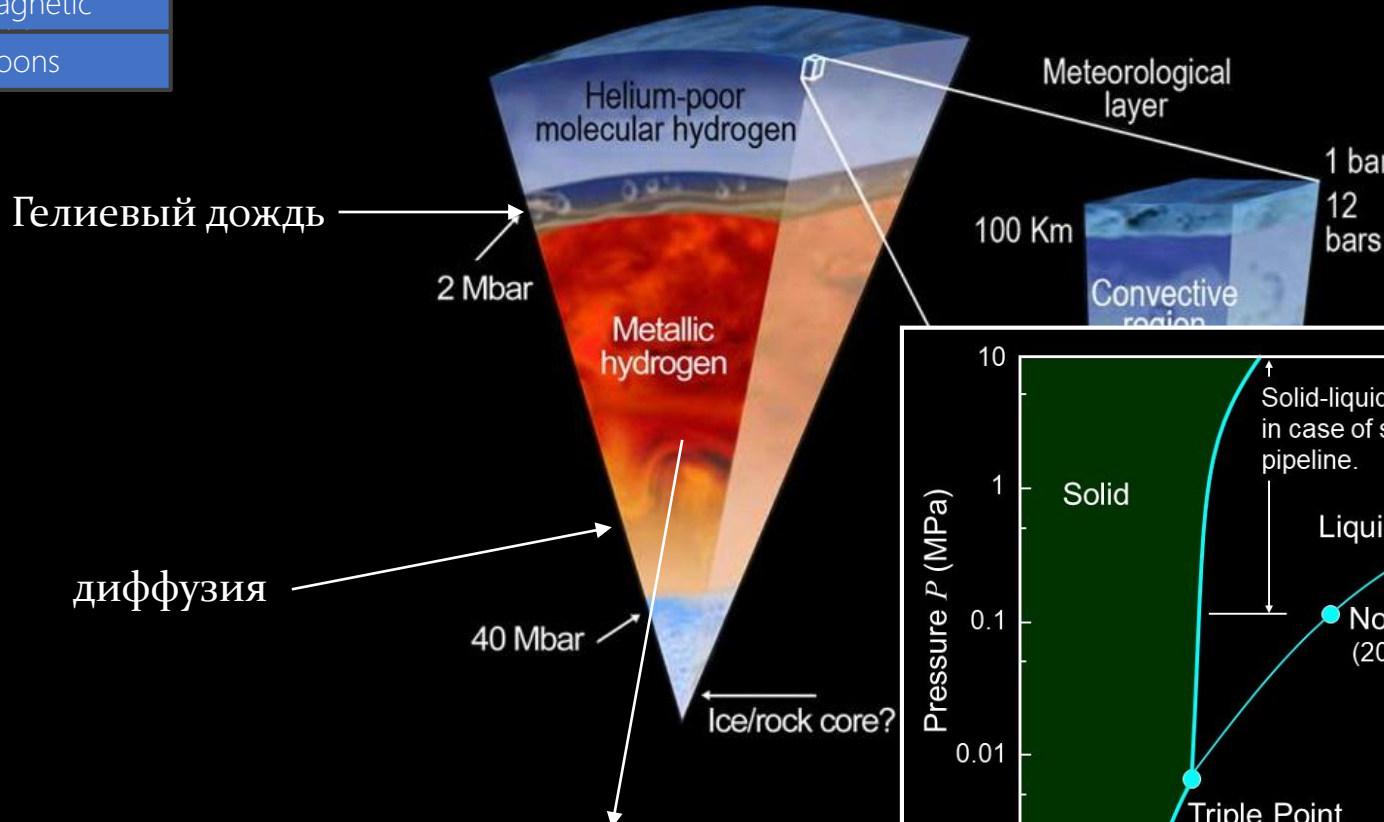
Spacecraft
Orbit
Inner
Atmosphere
Magnetic
Moons



Spacecraft
Orbit
Inner
Atmosphere
Magnetic
Moons



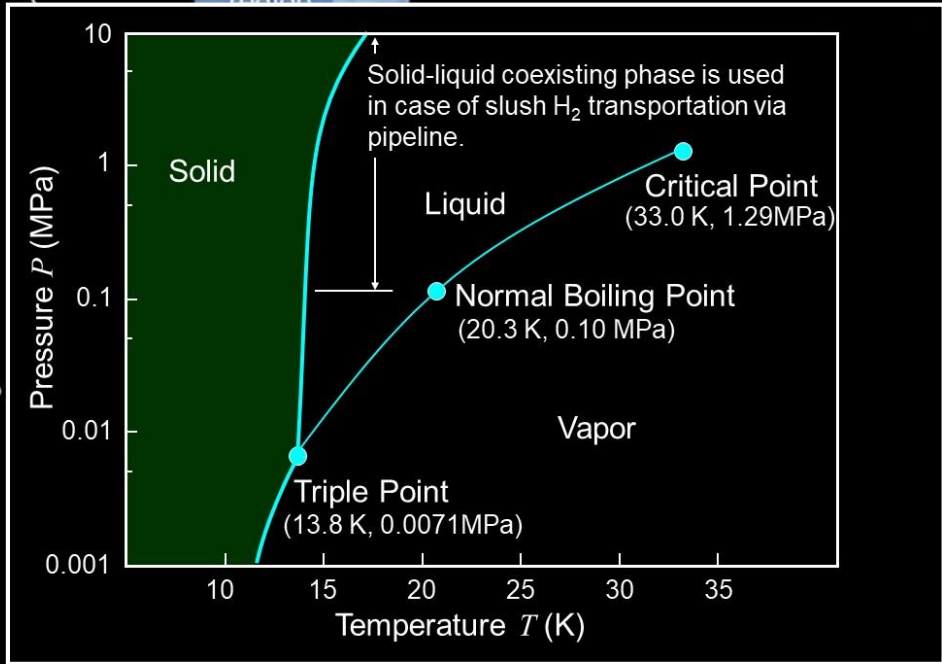
- Spacecraft
- Orbit
- Inner
- Atmosphere
- Magnetic
- Moons



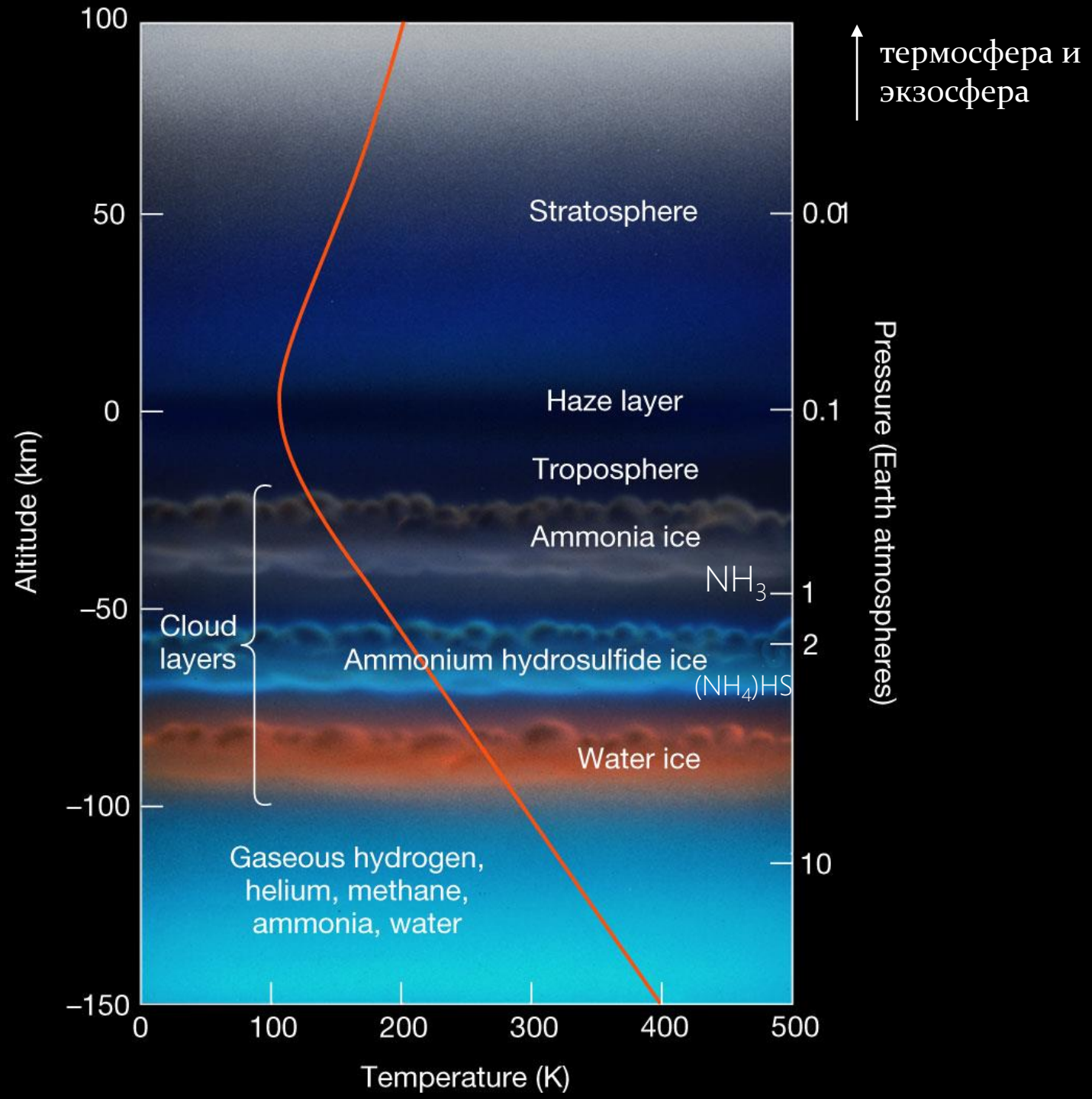
Гелиевый дождь

диффузия

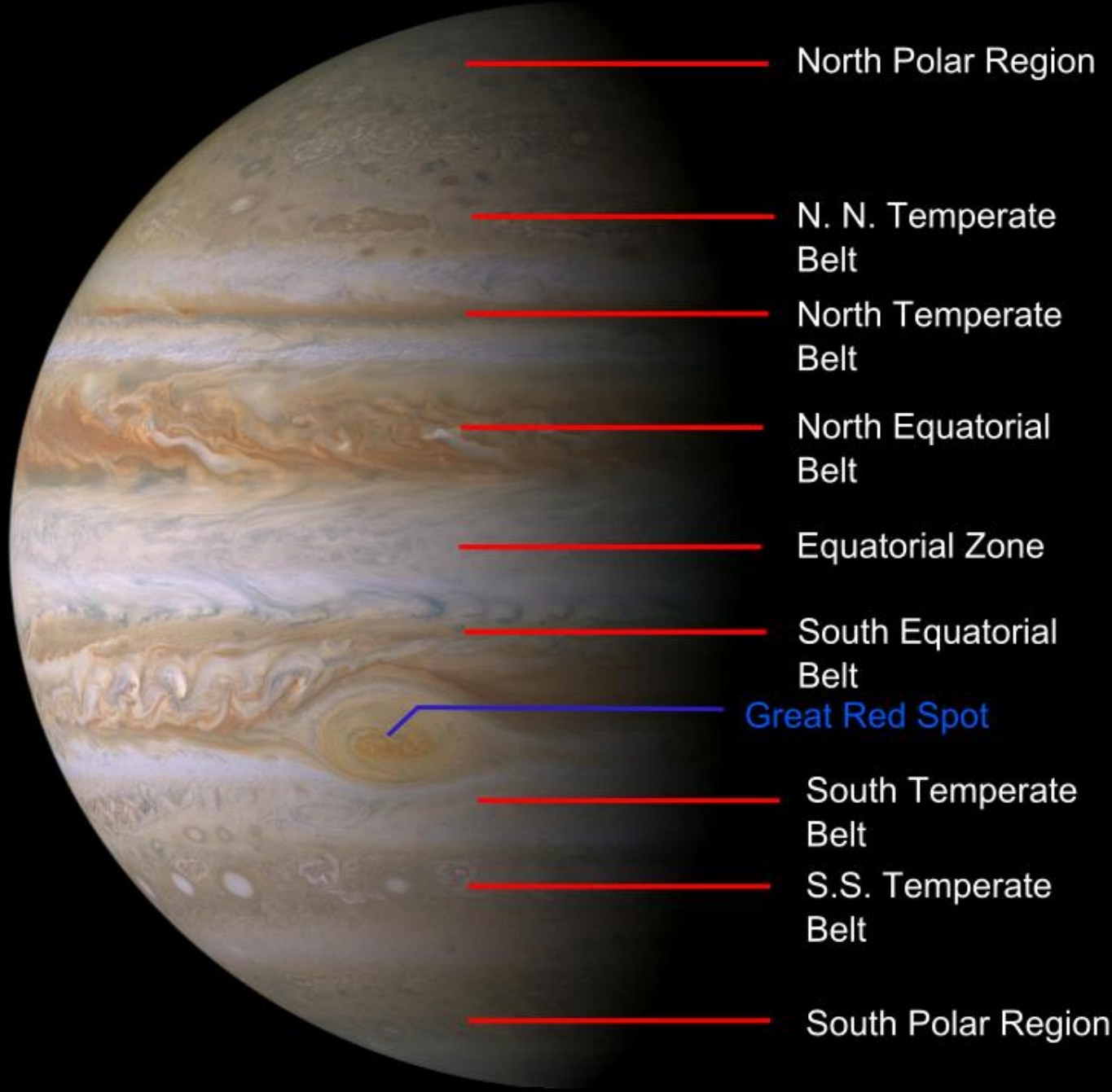
генерация магнитного поля  
период вращения вокруг оси ~10 ч



- Spacecraft
- Orbit
- Inner
- Atmosphere
- Magnetic
- Moons



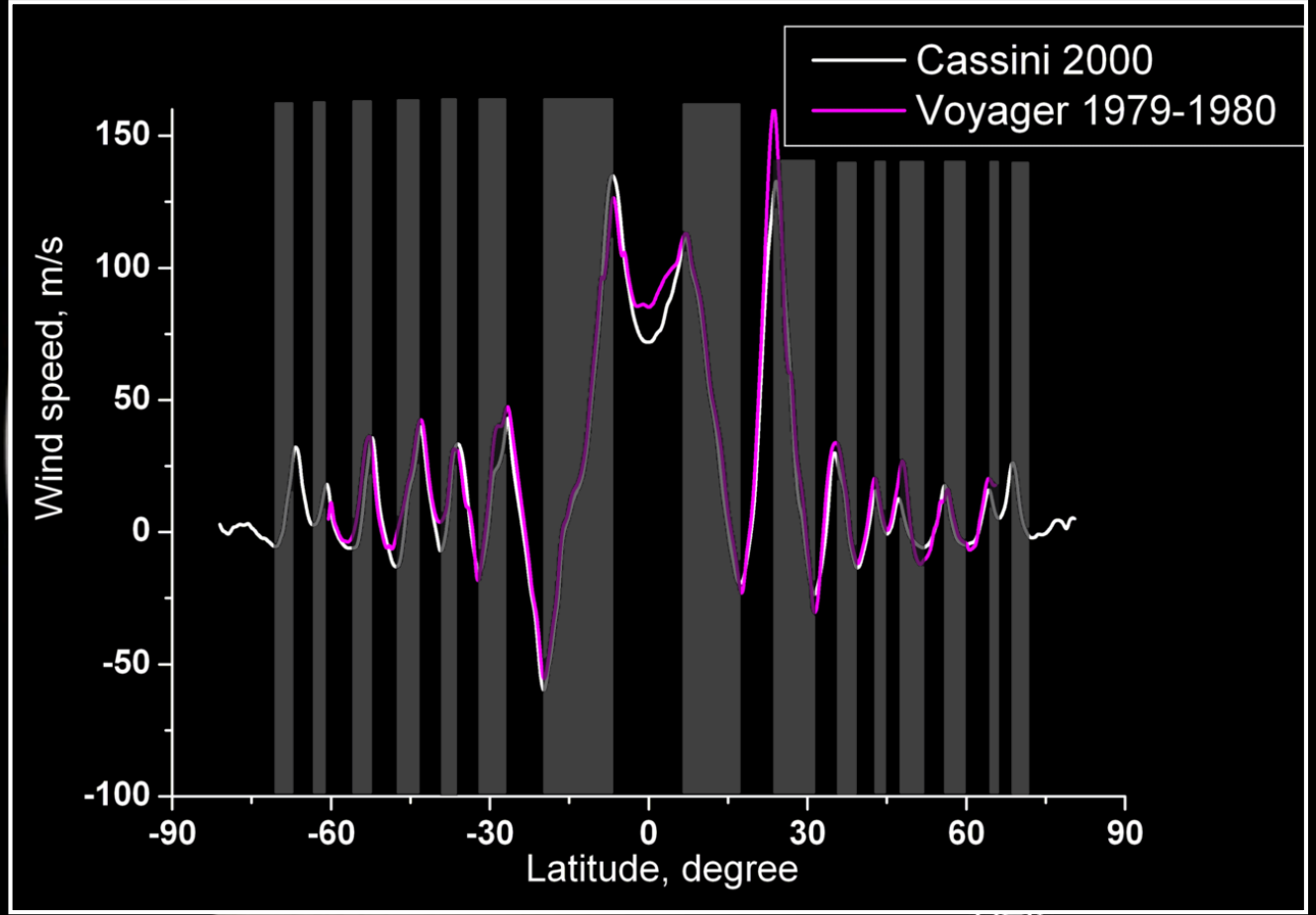
Spacecraft
Orbit
Inner
Atmosphere
Magnetic
Moons





Spacecraft
Orbit
Inner
Atmosphere
Magnetic
Moons

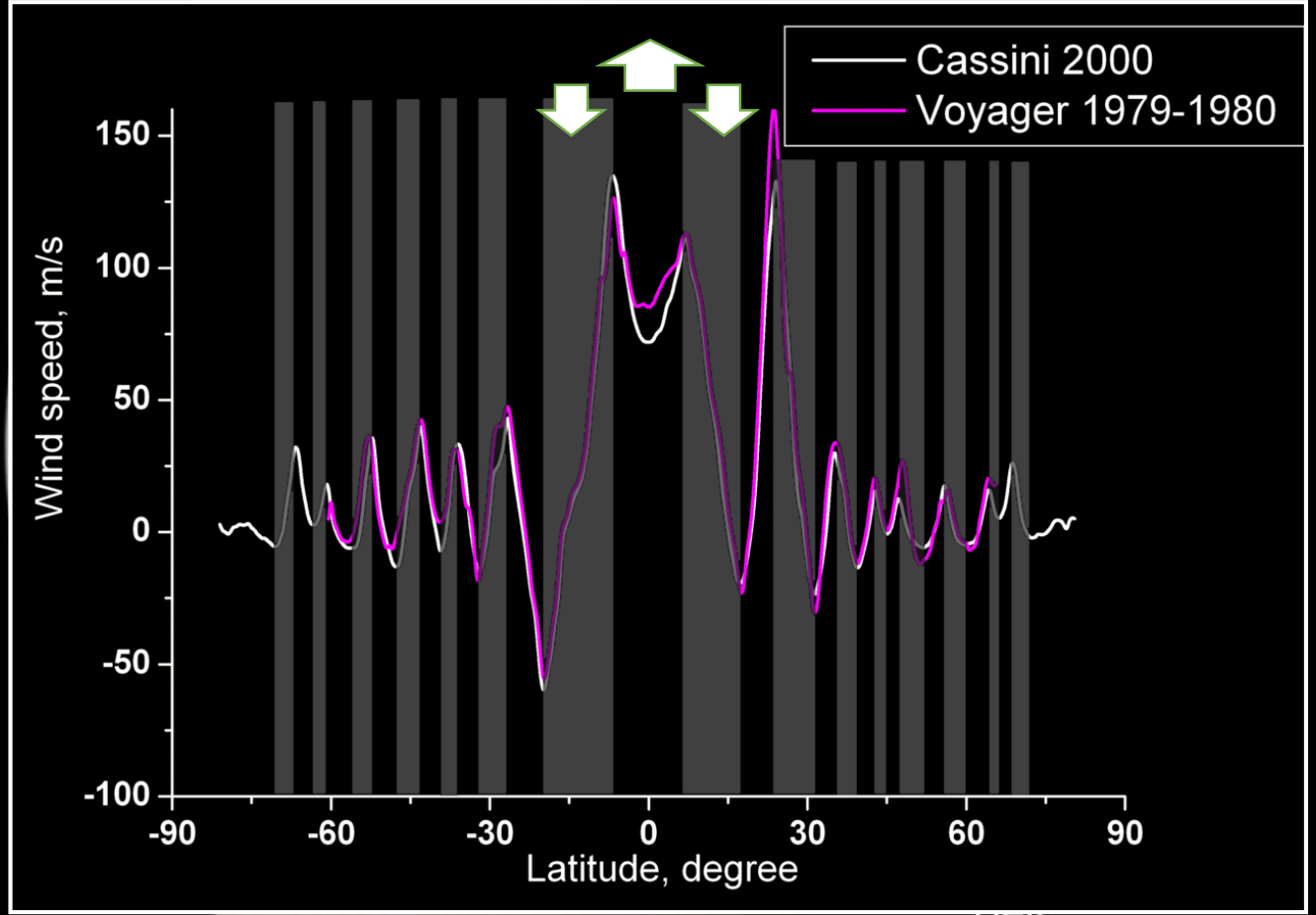
North Polar Region



South Polar Region

Spacecraft
Orbit
Inner
Atmosphere
Magnetic
Moons

North Polar Region



South Polar Region

Spacecraft

Orbit

Inner

Atmosphere

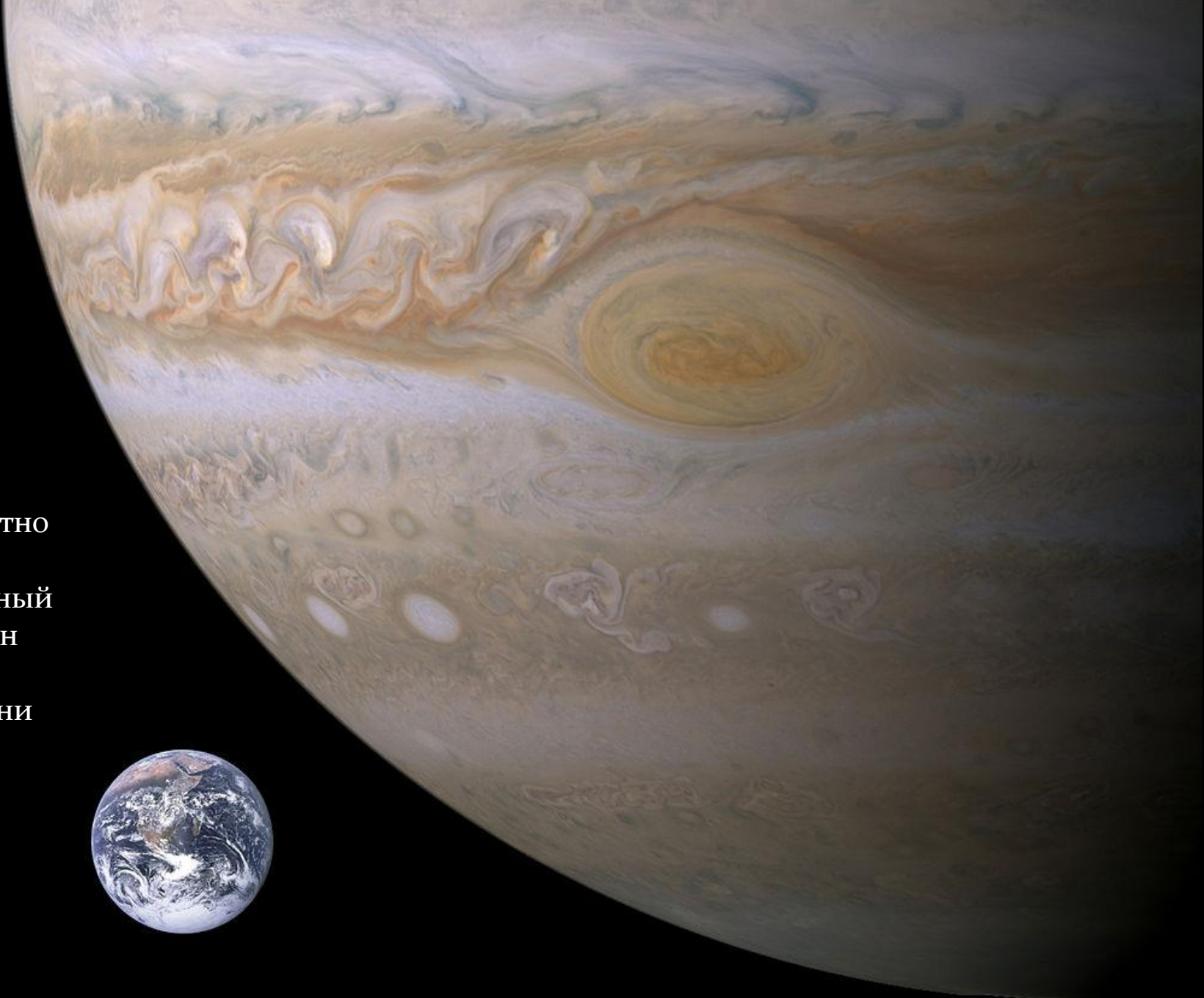
Magnetic

Moons

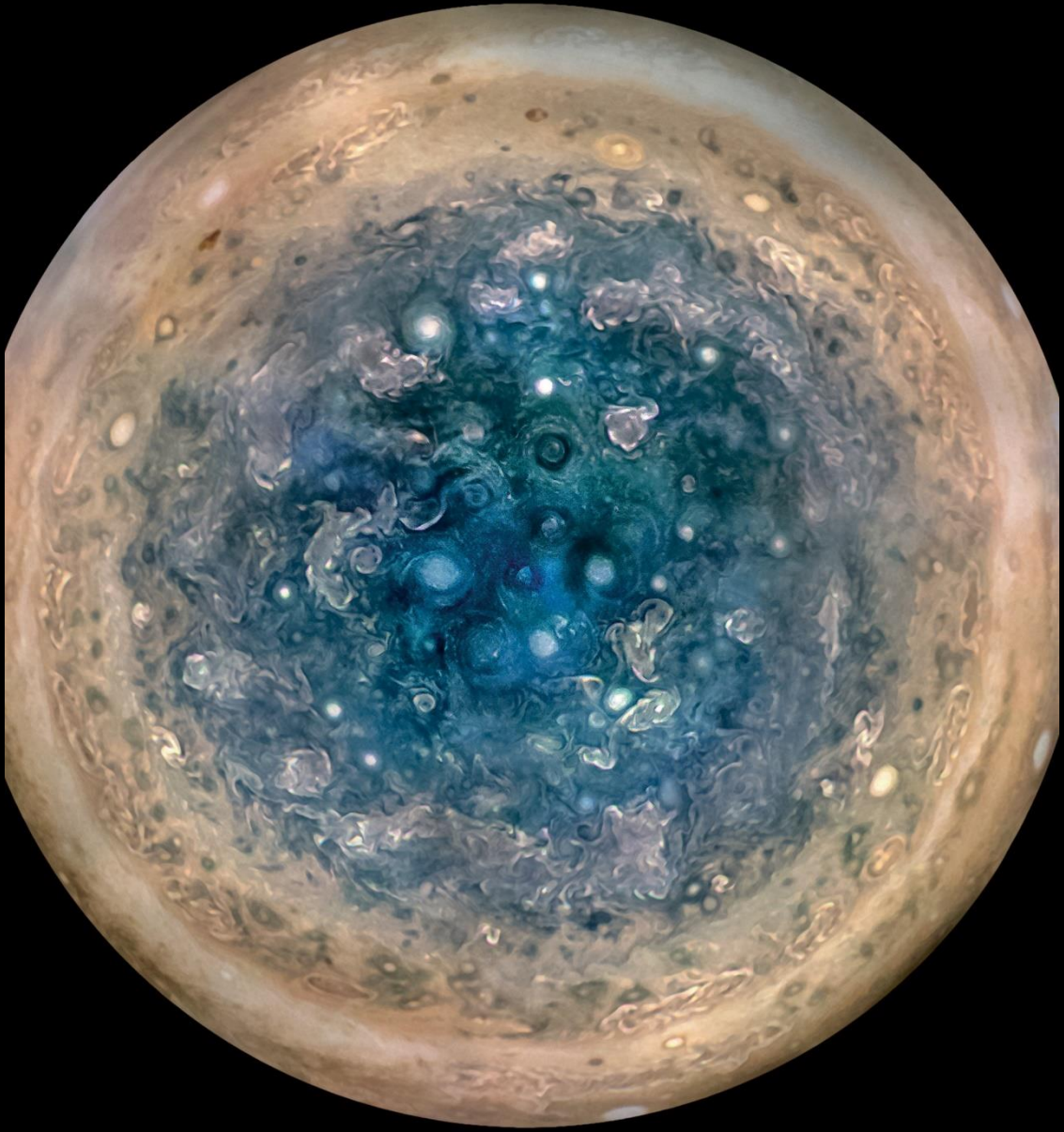
Большое  
красное пятно  
(GRS) –  
стационарный  
антициклон

Время жизни  
>350 лет

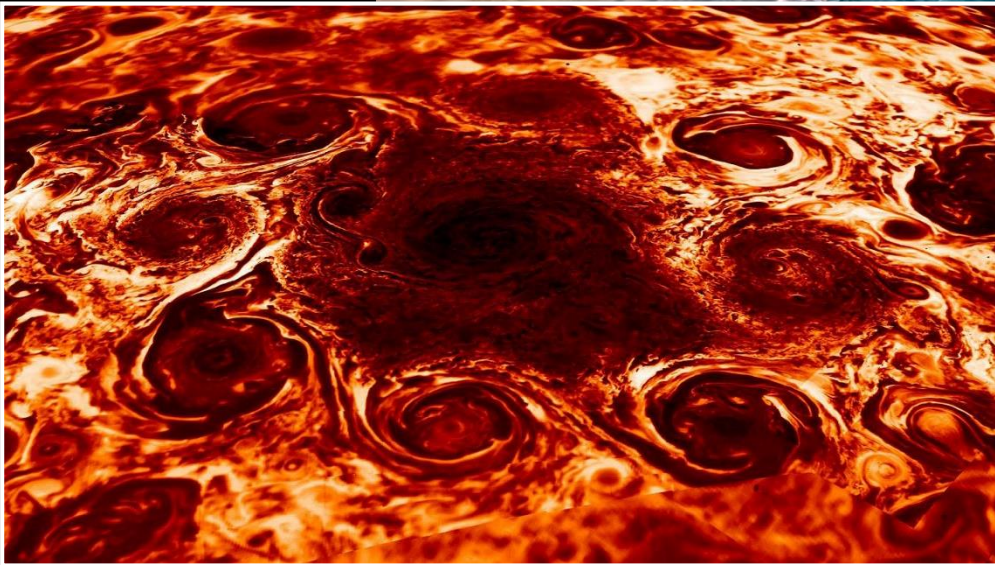
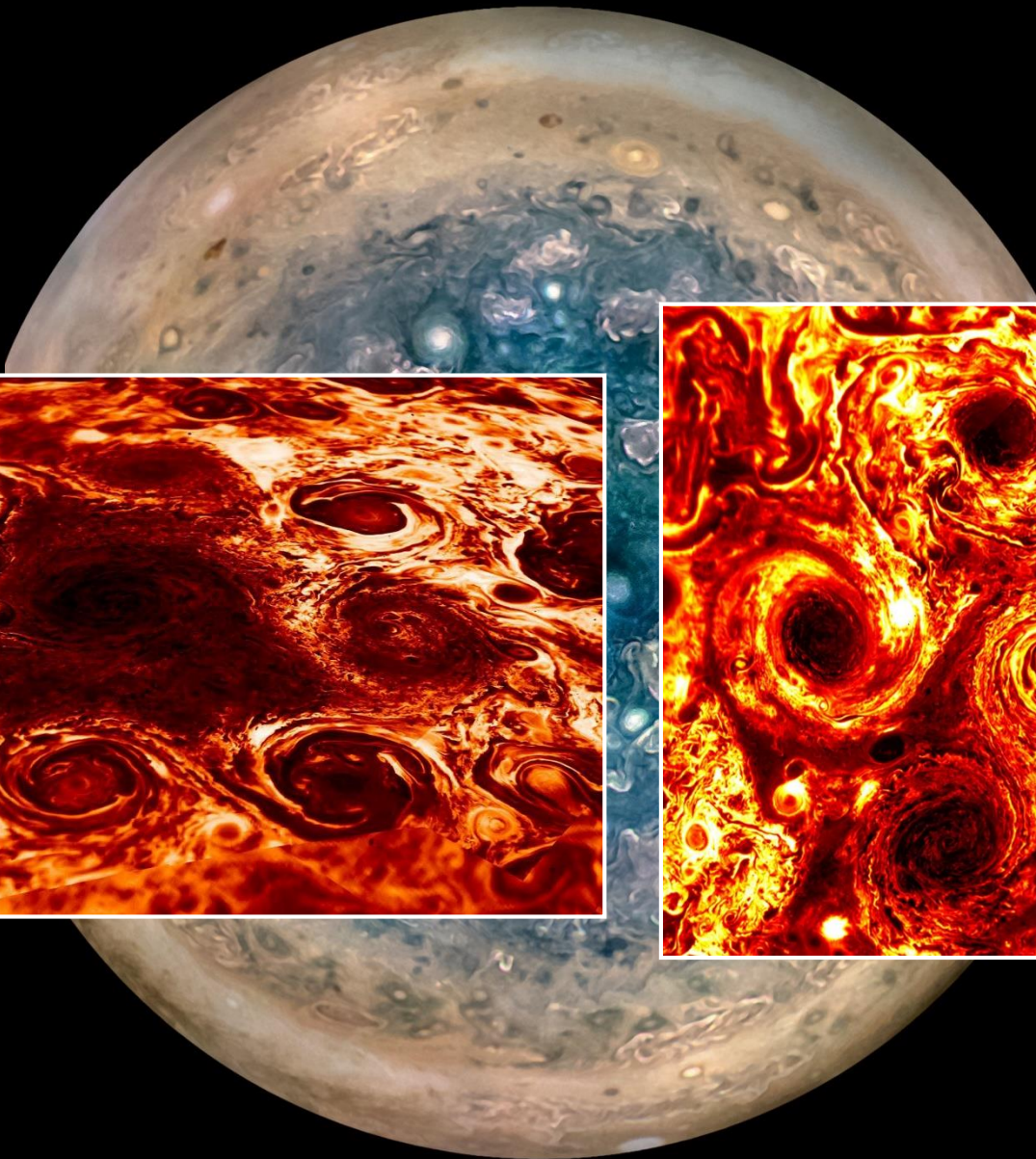
$V \sim 120$  м/с



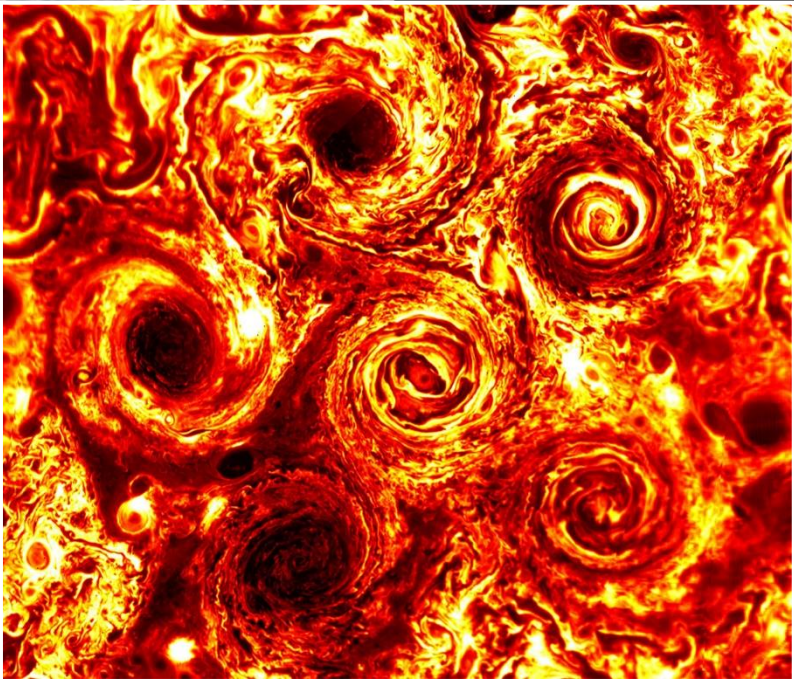
Spacecraft
Orbit
Inner
Atmosphere
Magnetic
Moons



- Spacecraft
- Orbit
- Inner
- Atmosphere
- Magnetic
- Moons

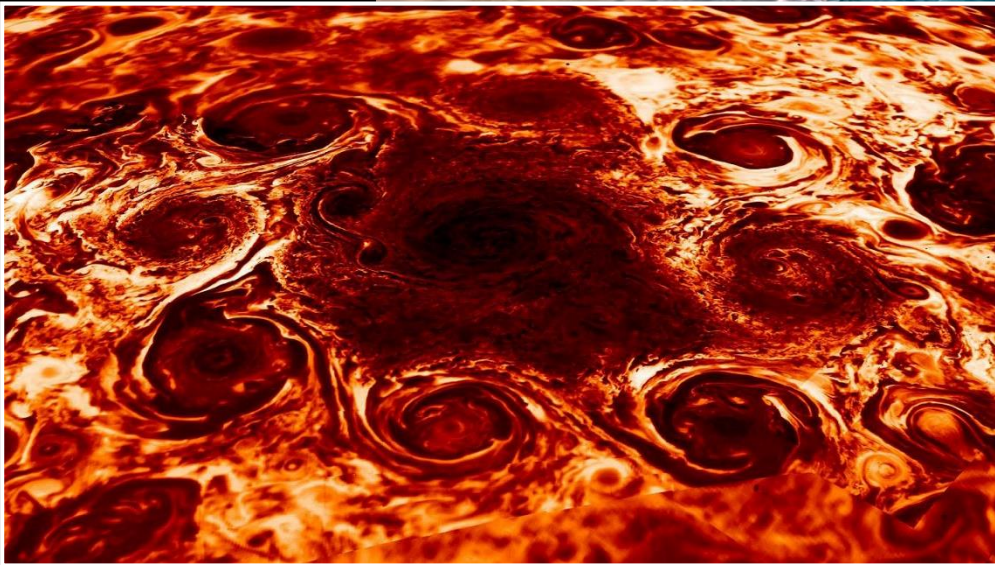
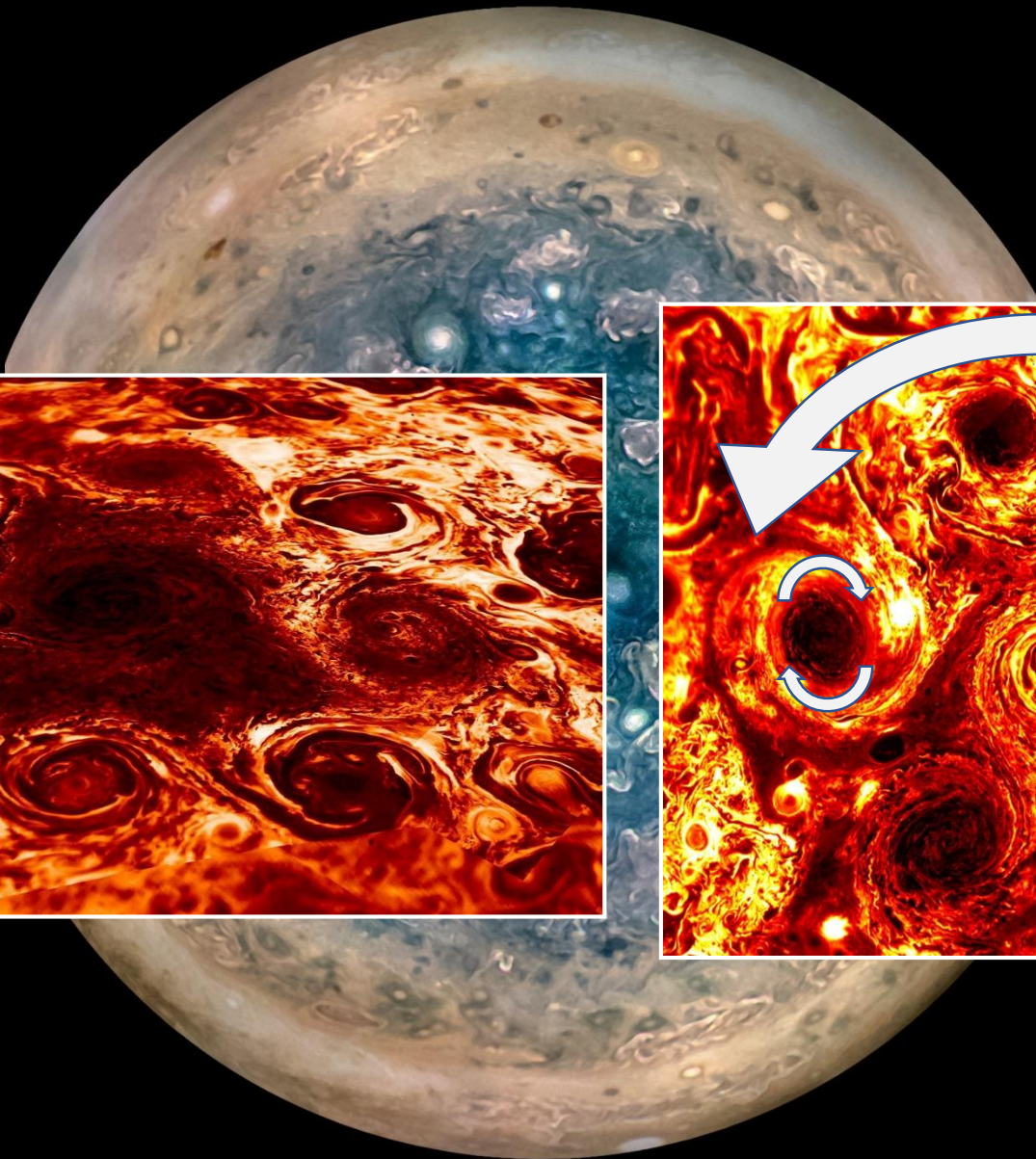


Северный полюс

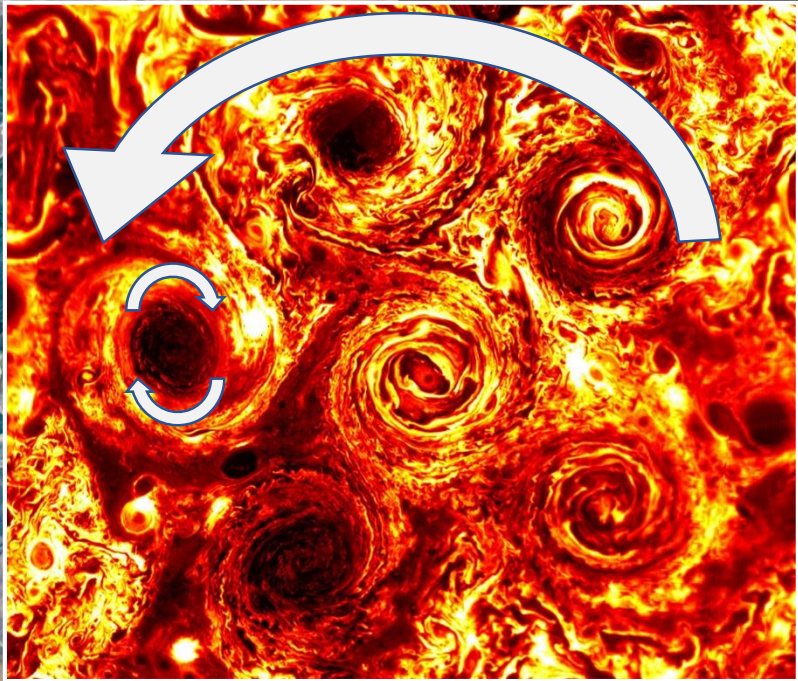


Южный полюс

- Spacecraft
- Orbit
- Inner
- Atmosphere
- Magnetic
- Moons

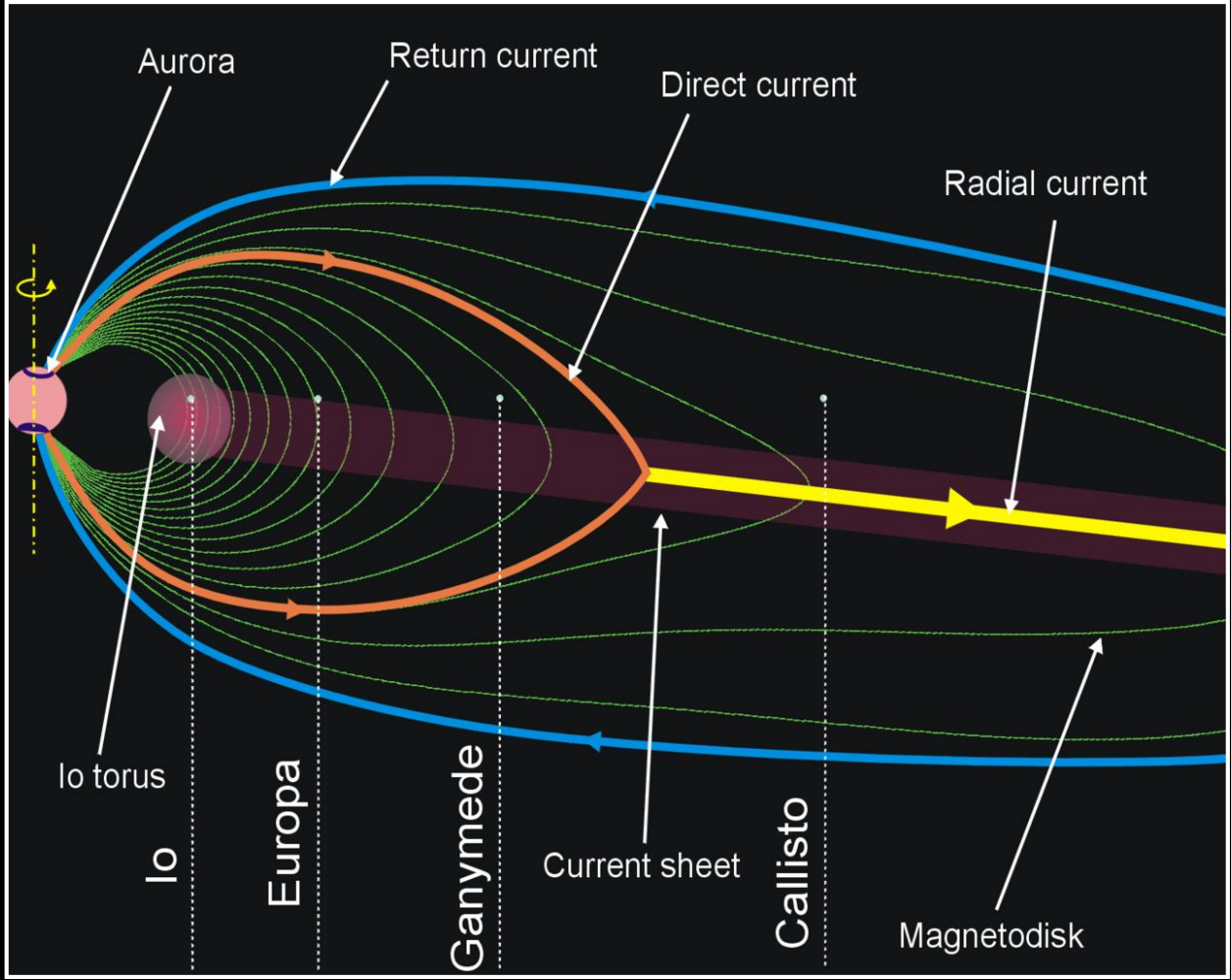


Северный полюс

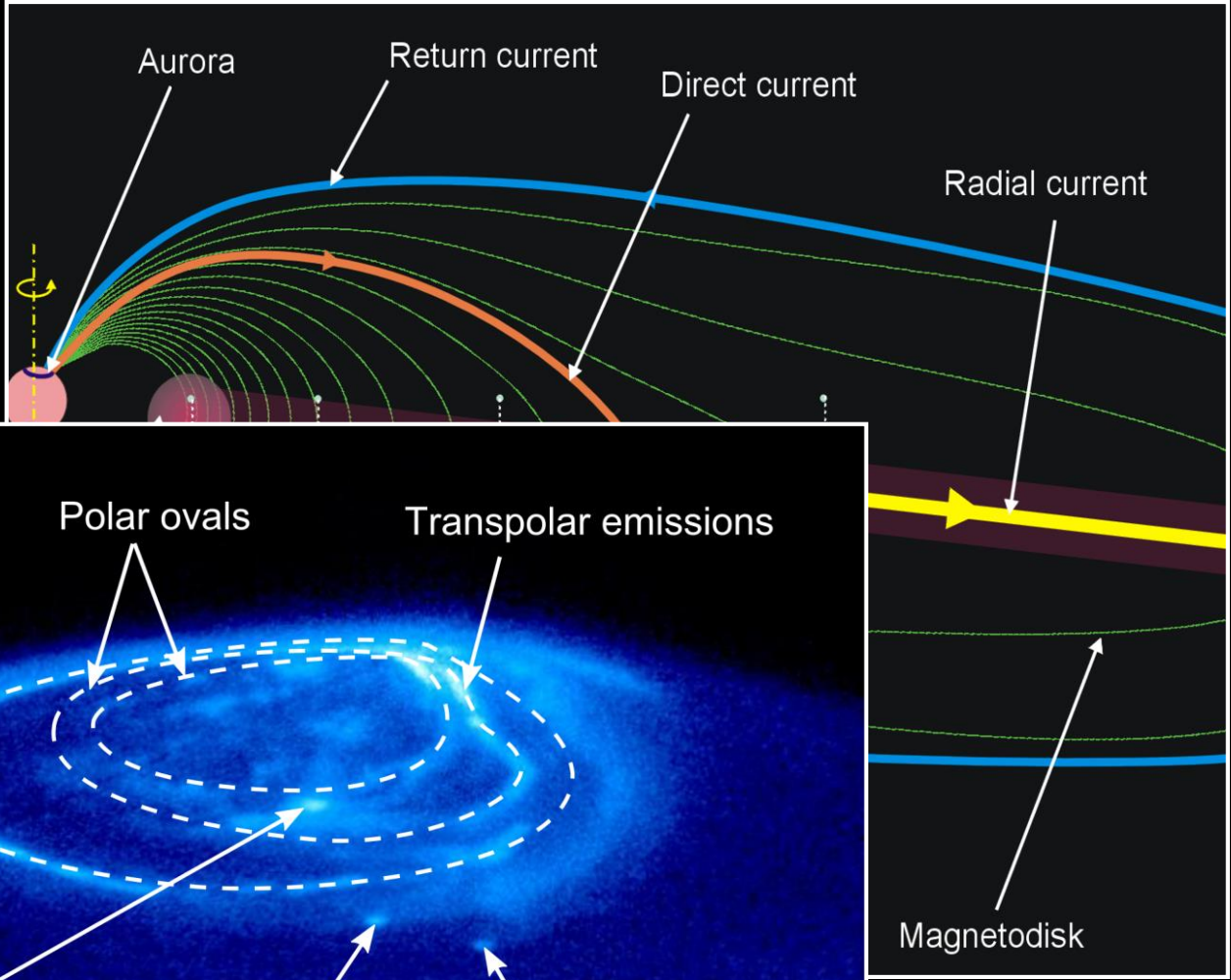


Южный полюс

Spacecraft
Orbit
Inner
Atmosphere
Magnetic
Moons

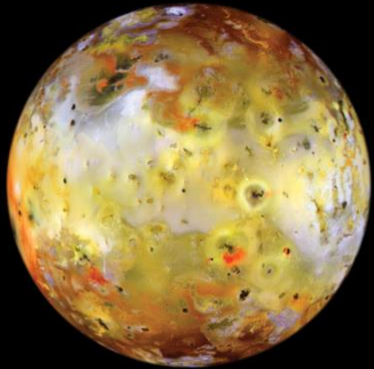


Spacecraft
Orbit
Inner
Atmosphere
Magnetic
Moons

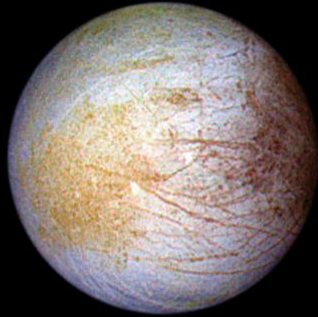




Spacecraft
Orbit
Inner
Atmosphere
Magnetic
Moons



Io



Europa

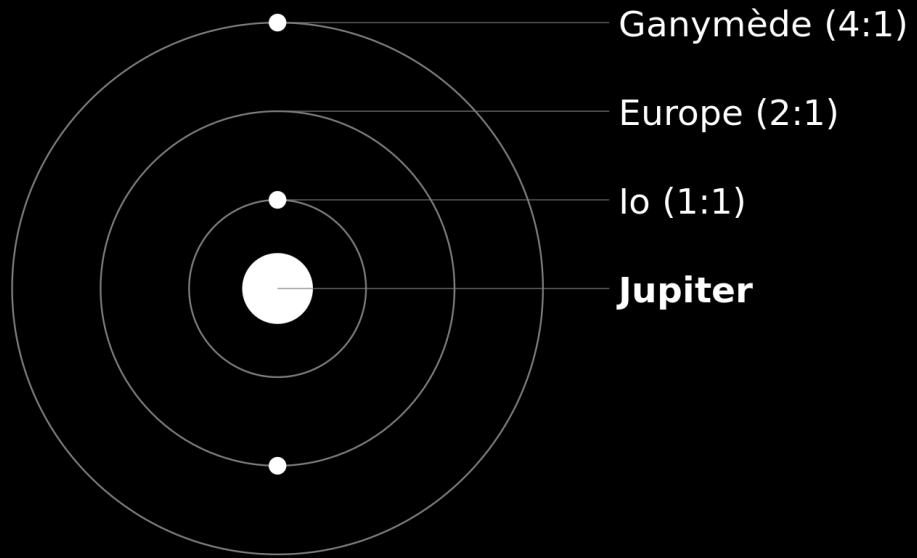


Ganymede



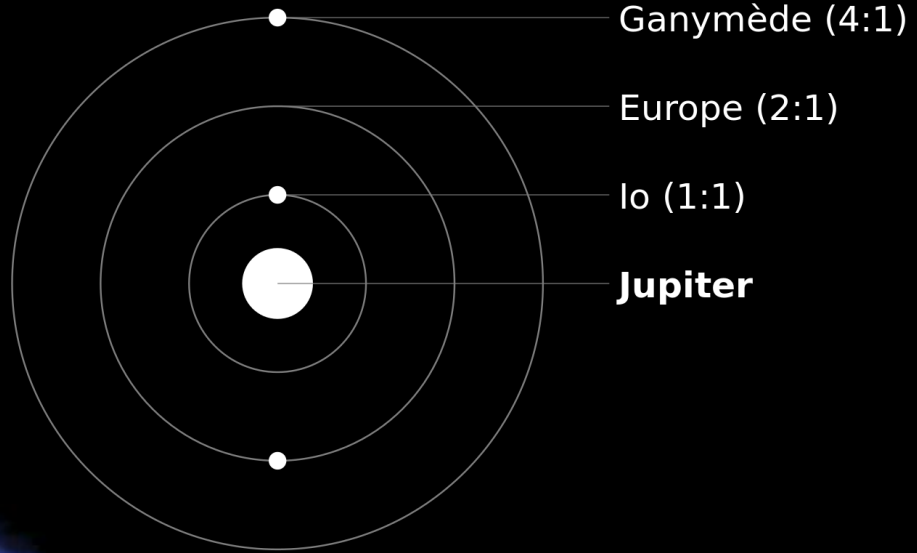
Callisto

Spacecraft
Orbit
Inner
Atmosphere
Magnetic
Moons



Spacecraft
Orbit
Inner
Atmosphere
Magnetic
Moons

Io



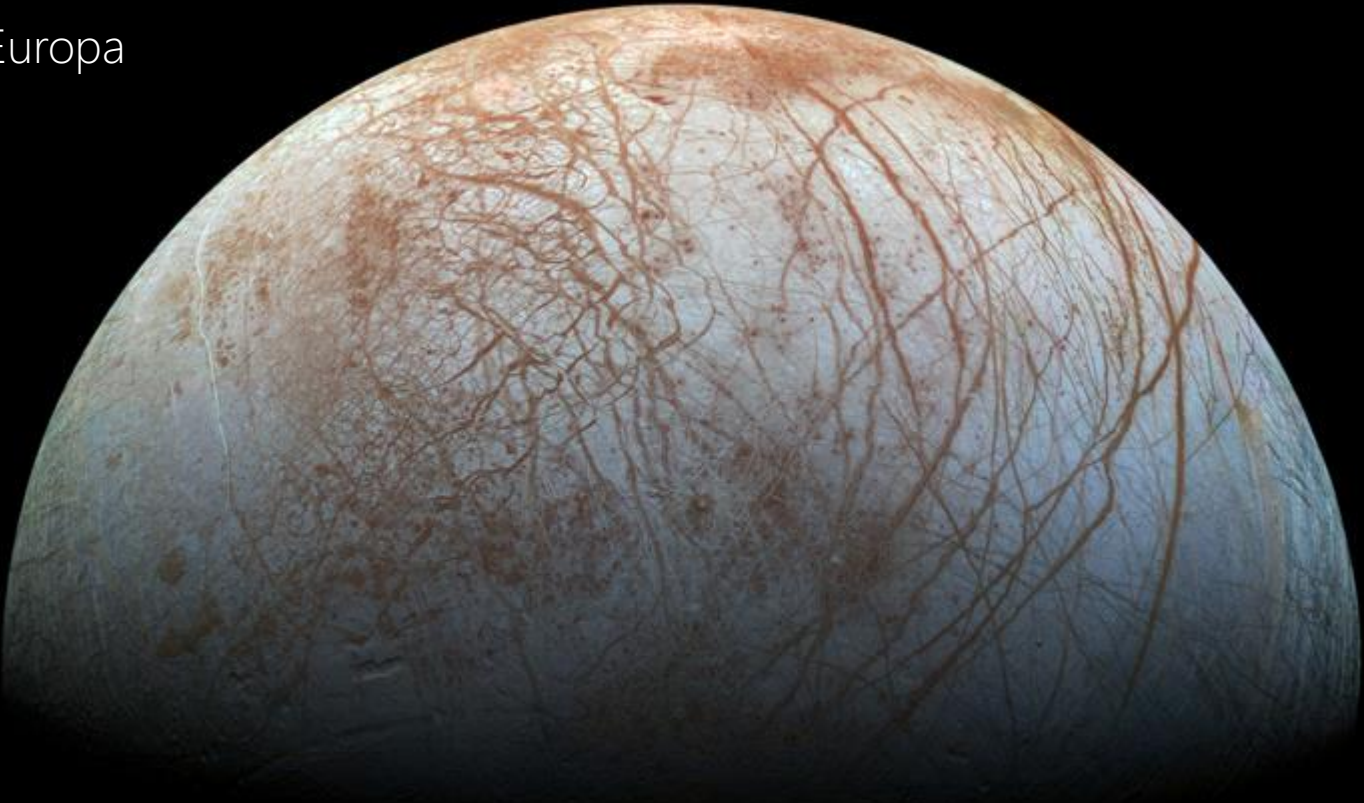
Приливные силы в 20000 раз выше, чем на Земле

$T_{Surf} \sim 110 \text{ K}$   
 $\sim 1000\text{K}$  на поверхности вулканов

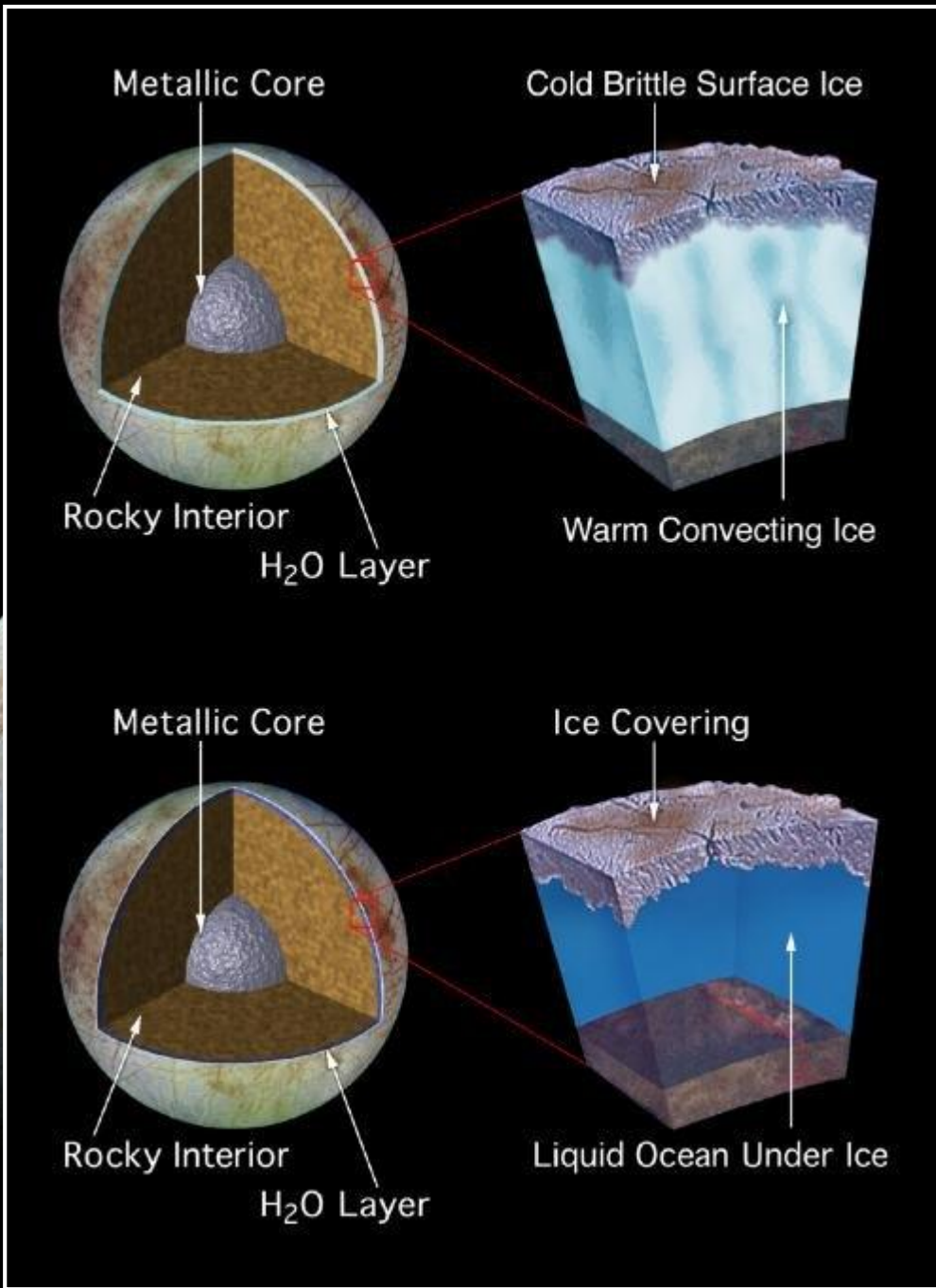


- Spacecraft
- Orbit
- Inner
- Atmosphere
- Magnetic
- Moons

Europa



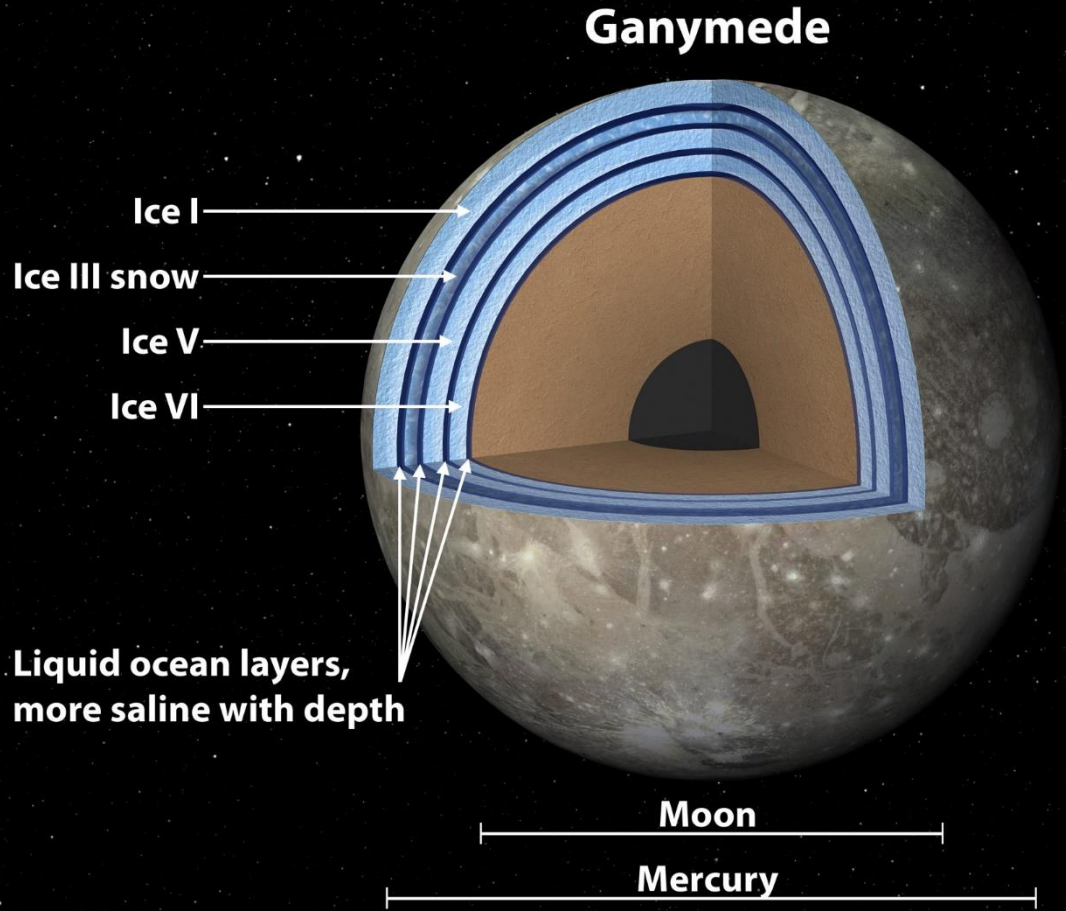
Spacecraft
Orbit
Inner
Atmosphere
Magnetic
Moons



Толщина льда –  
10-30 км

Толщина океана  
– ~100 км

Spacecraft
Orbit
Inner
Atmosphere
Magnetic
Moons





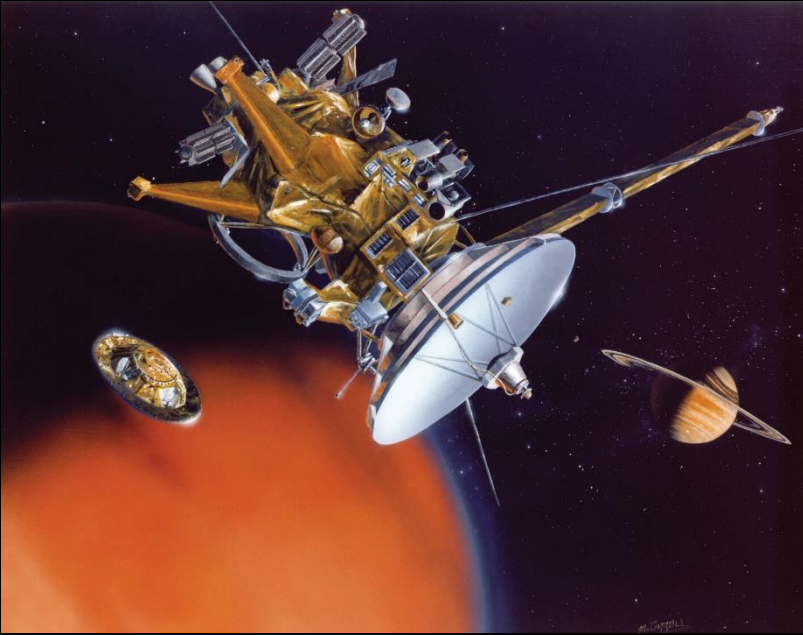
Spacecraft
Orbit
Inner
Atmosphere
Magnetic
Moons



Pioneer 11  
1979



Voyager 1-2  
1980-81

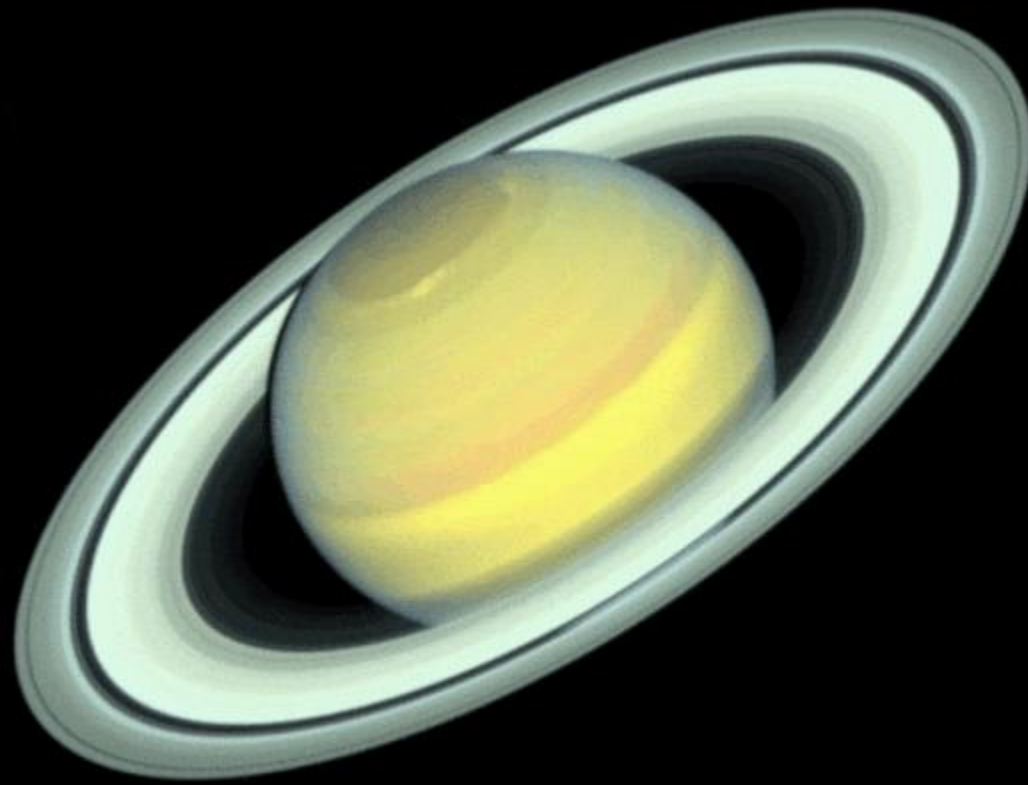


Cassini-Huygens  
2004



Наклон оси  $27^\circ$  - есть сезонные вариации

Spacecraft
Orbit
Inner
Atmosphere
Magnetic
Moons



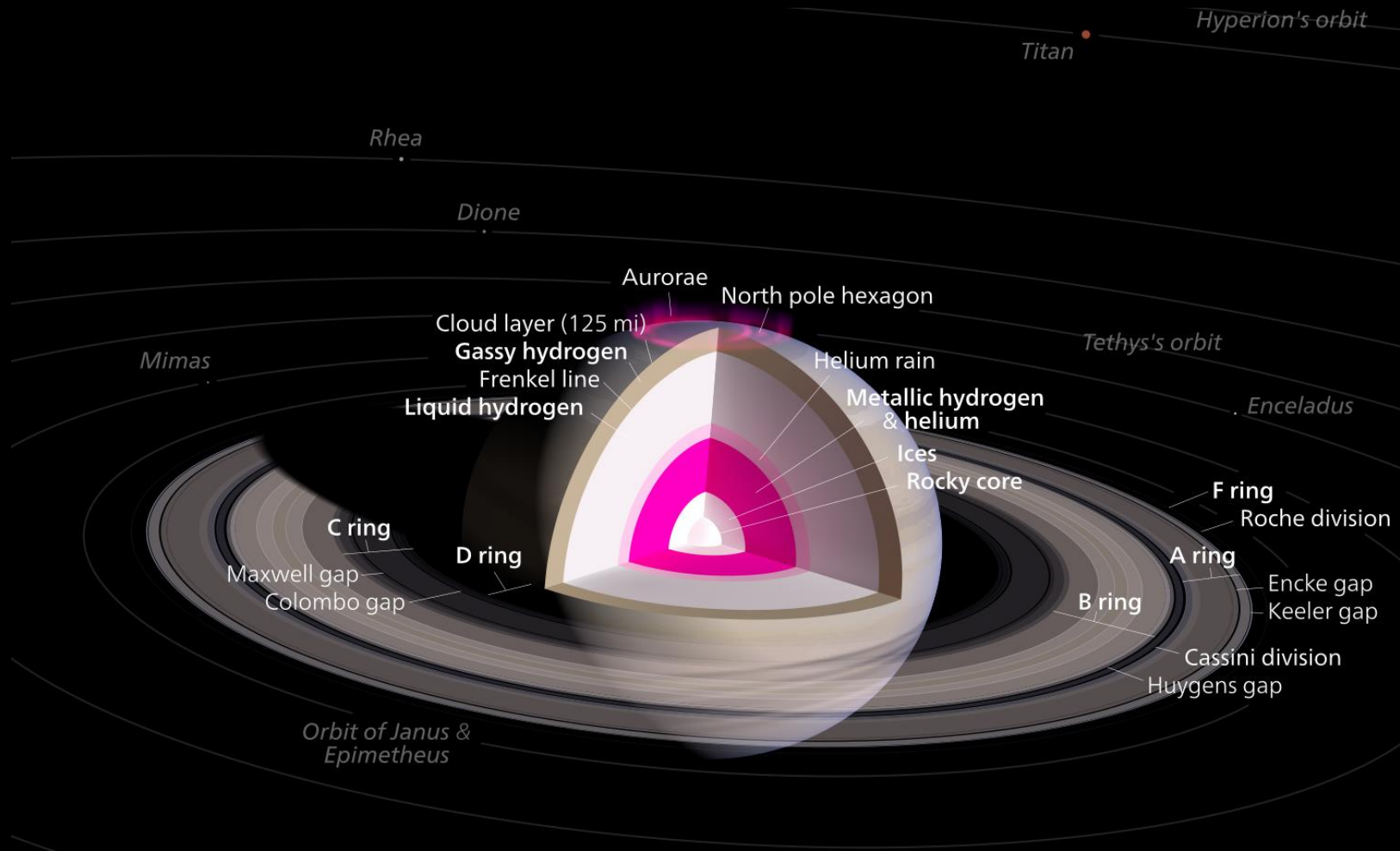
Период обращения вокруг оси  $10.7$  ч





Средняя плотность **0.7 г/см<sup>3</sup>**

Spacecraft
Orbit
Inner
Atmosphere
Magnetic
Moons



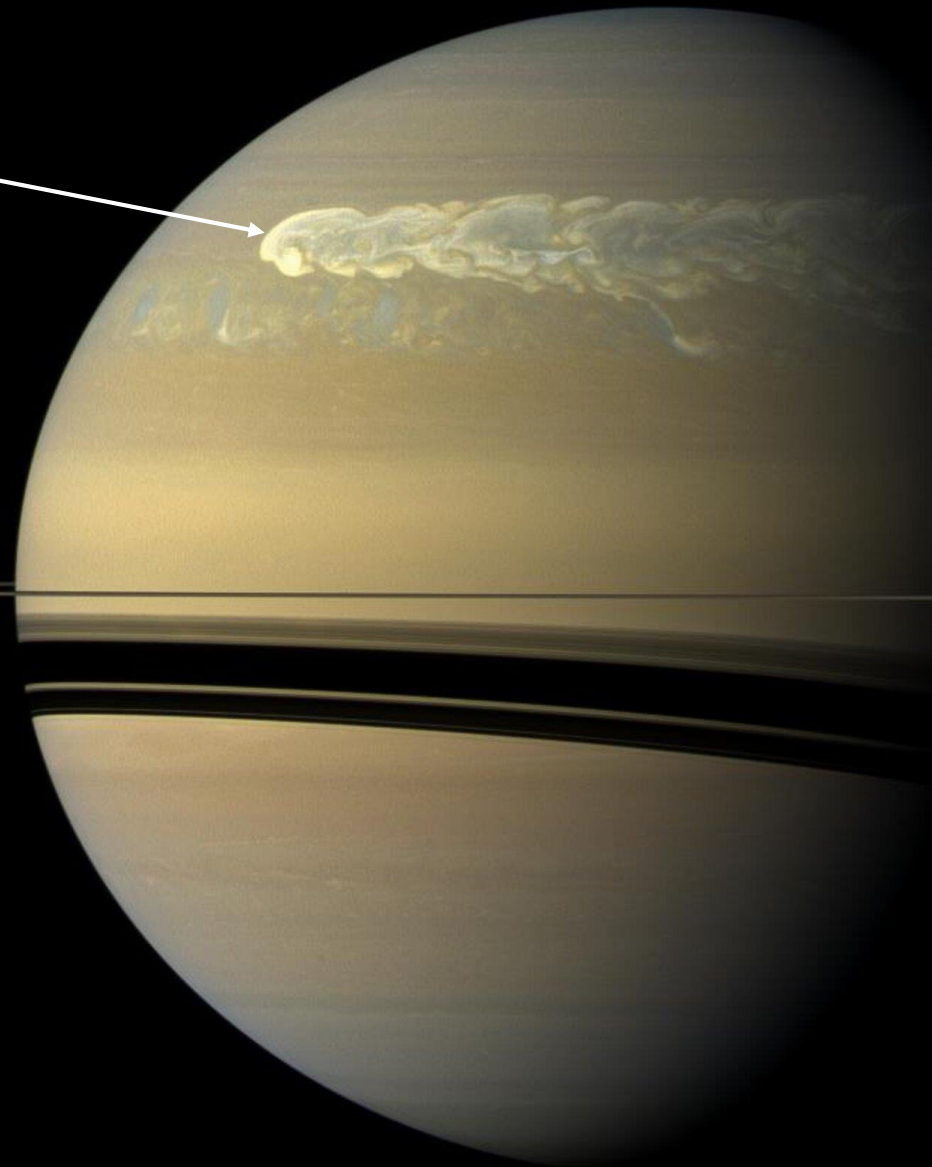
Генерация энергии: механизм Кельвина-Гельмгольца + ???

(гелиевый дождь?)

h

Spacecraft
Orbit
Inner
Atmosphere
Magnetic
Moons

Шторм с периодом 30 лет,  
длительностью 9 месяцев

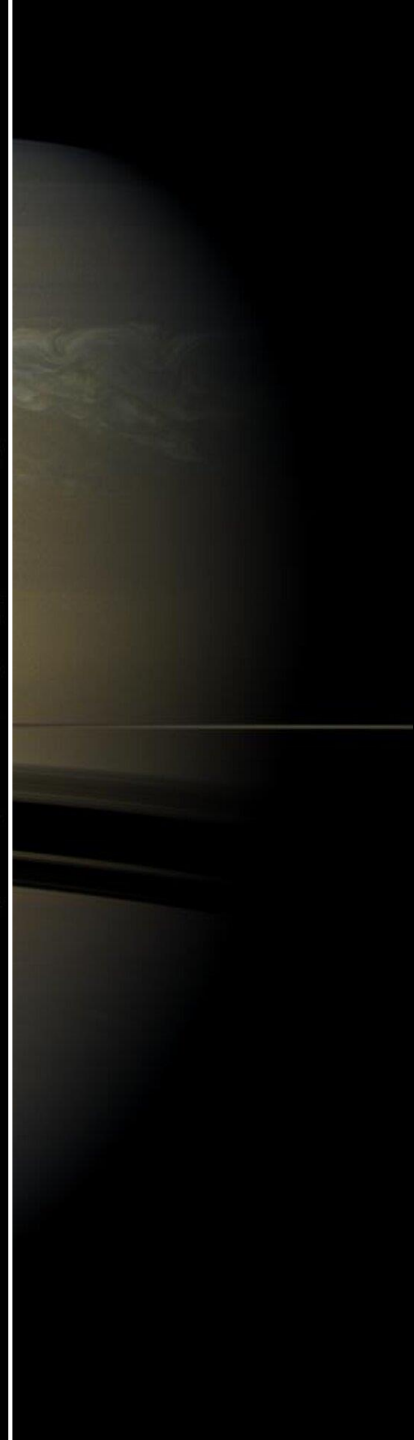
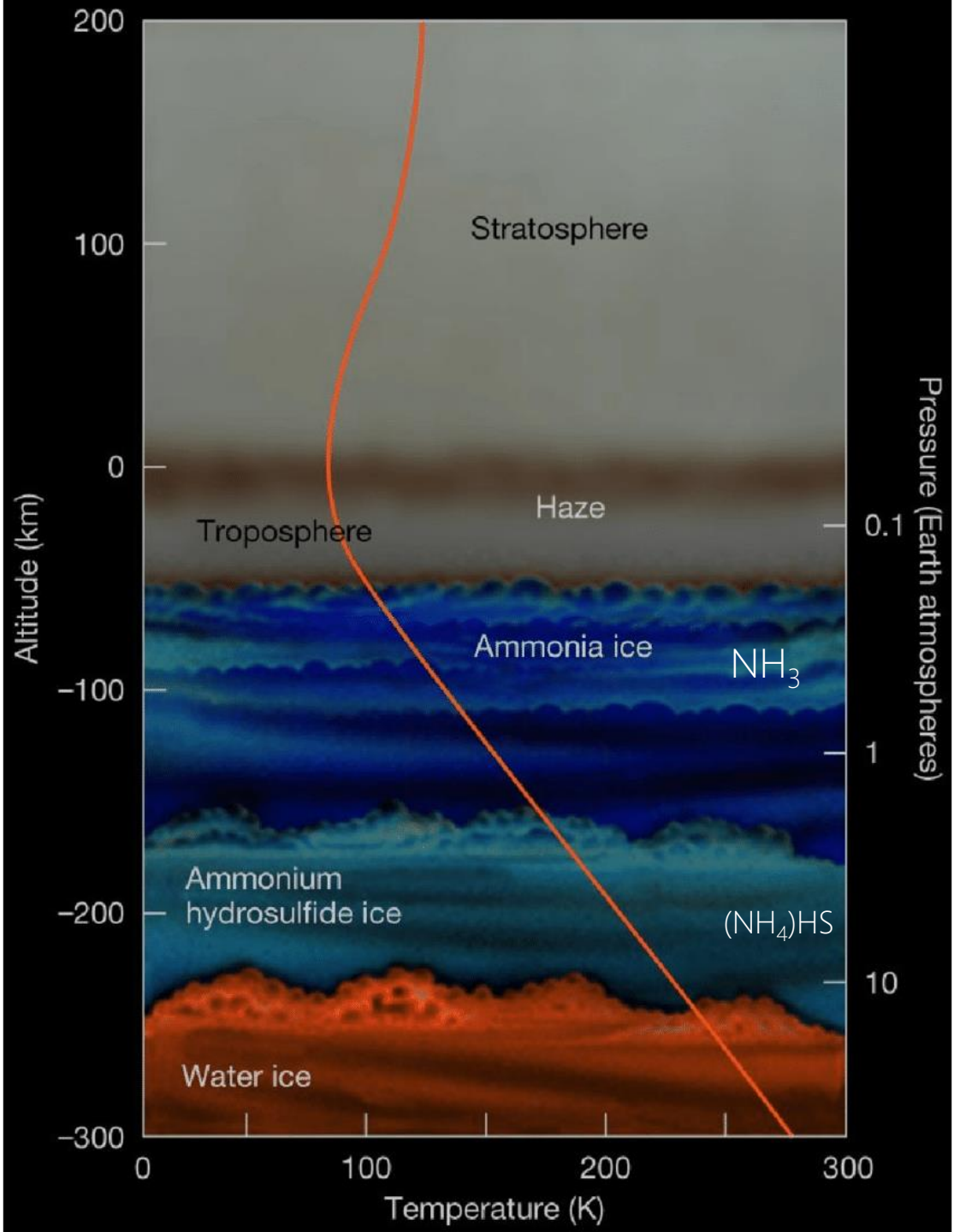


$V_{\max} \sim 500 \text{ м/с}$

h

- Spacecraft
- Orbit
- Inner
- Atmosphere
- Magnetic
- Moons

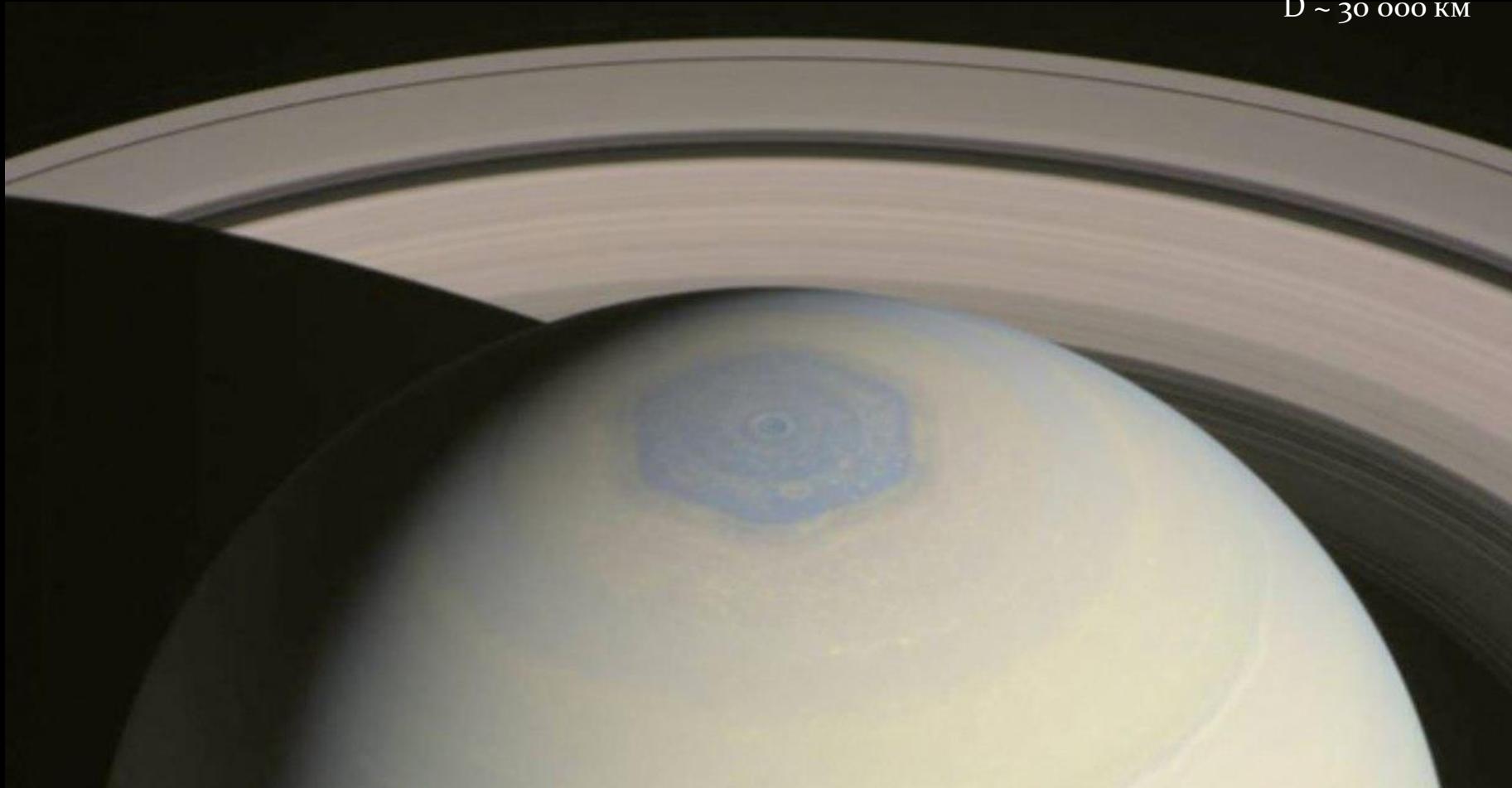
$$V_{\max} \sim 500 \text{ m/c}$$





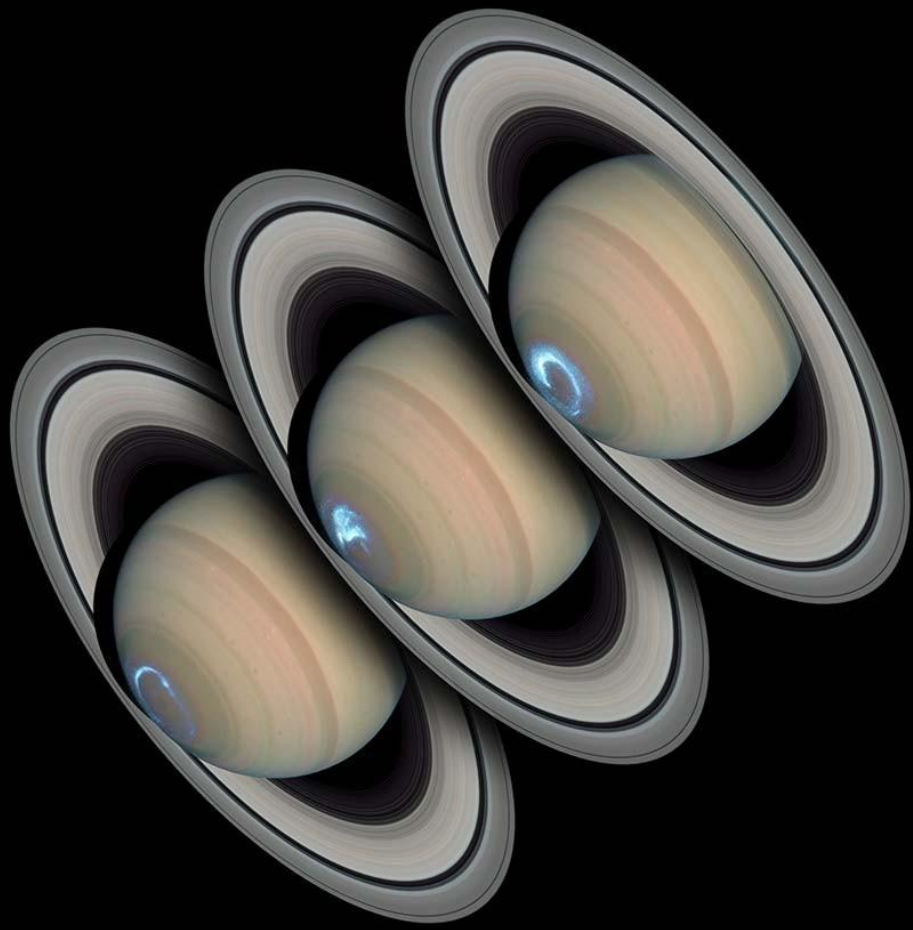
Spacecraft
Orbit
Inner
Atmosphere
Magnetic
Moons

Стационарный северный полярный вихрь  
D ~ 30 000 км



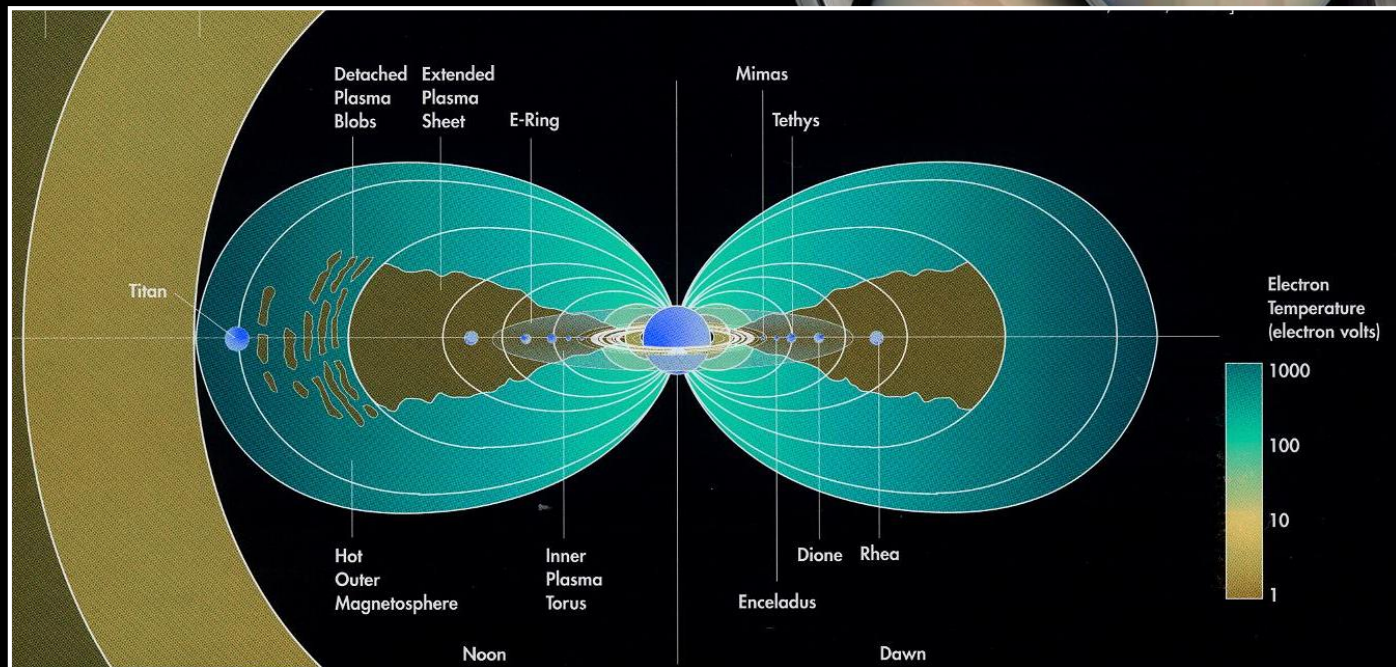
h

Spacecraft
Orbit
Inner
Atmosphere
Magnetic
Moons





Spacecraft
Orbit
Inner
Atmosphere
Magnetic
Moons

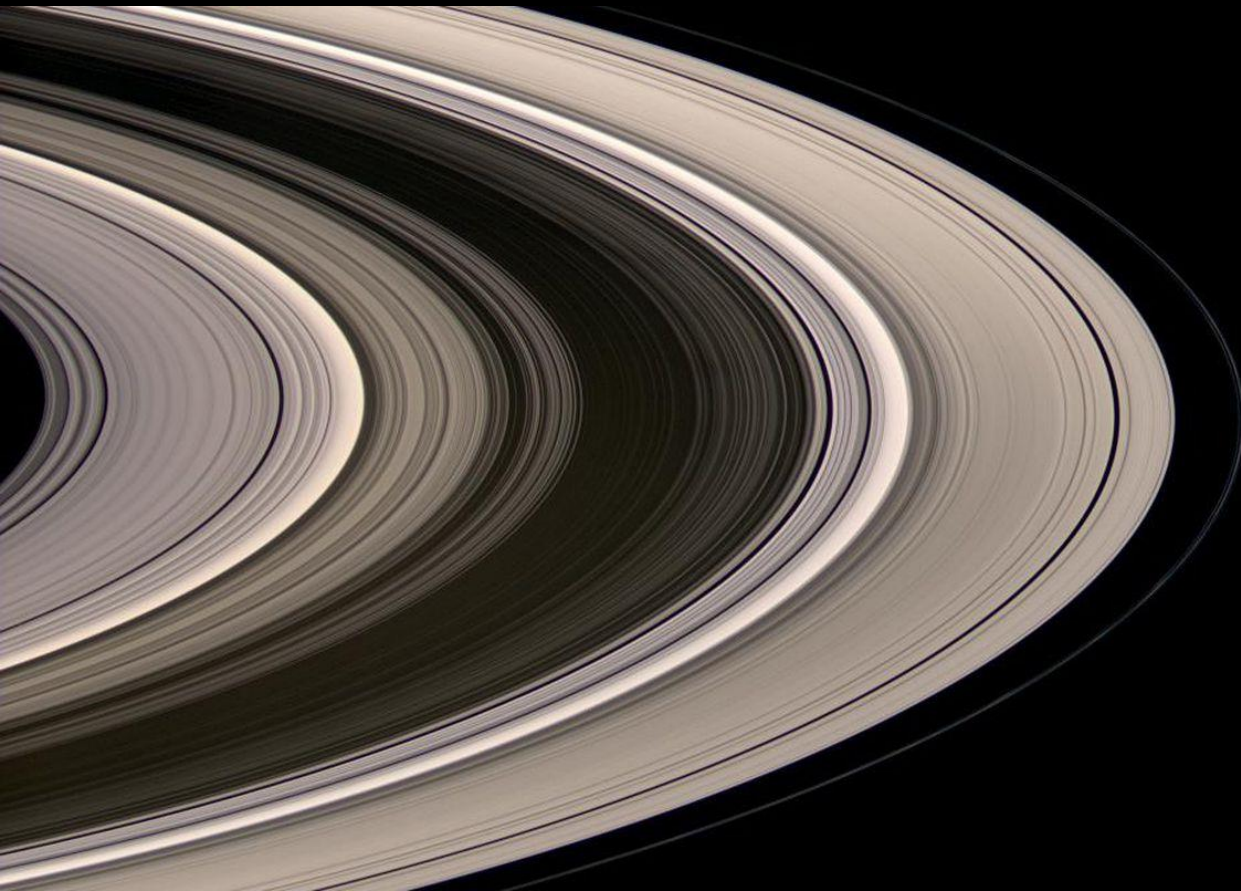


20 мкТл – 1/20 от индукции магнитосферы Юпитера



Spacecraft
Orbit
Inner
Atmosphere
Magnetic
Moons

6 – 120 тыс. км от Сатурна  
Толщина: 5-50 м  
Состав: водяной лёд + кремниевые и углеродные соединения  
Орбиты контролируются спутниками-«пастухами»  
Возраст: 10-100 млн лет





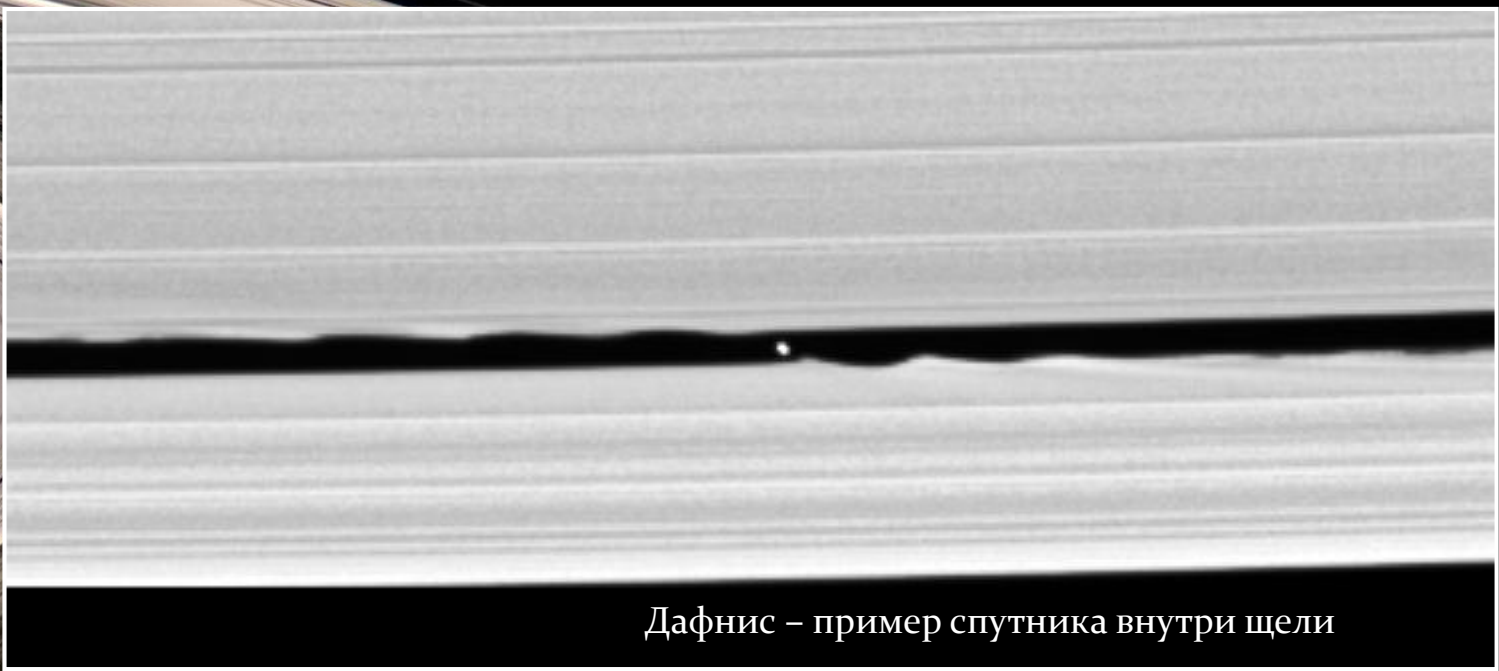
Spacecraft
Orbit
Inner
Atmosphere
Magnetic
Moons

6 – 120 тыс. км от Сатурна

Толщина: 5-50 м

Состав: водяной лёд + кремниевые и углеродные соединения

Орбиты контролируются спутниками-«пастухами»



Дафнис – пример спутника внутри щели





Spacecraft
Orbit
Inner
Atmosphere
Magnetic
Moons

Япет



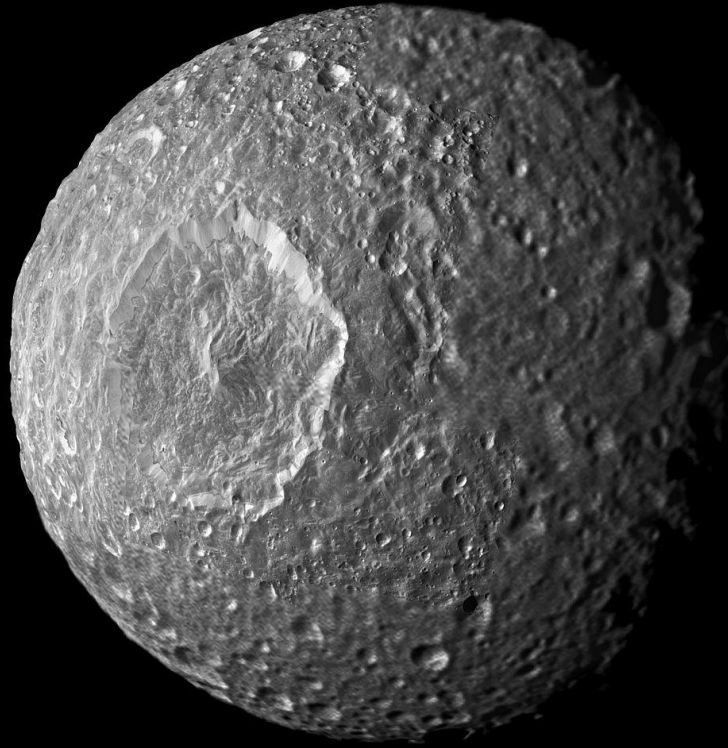
Альbedo изменяется от 0.03 до 0.6

Тёмные участки – пыль с внешнего кольца Фебы



Spacecraft
Orbit
Inner
Atmosphere
Magnetic
Moons

Мимас



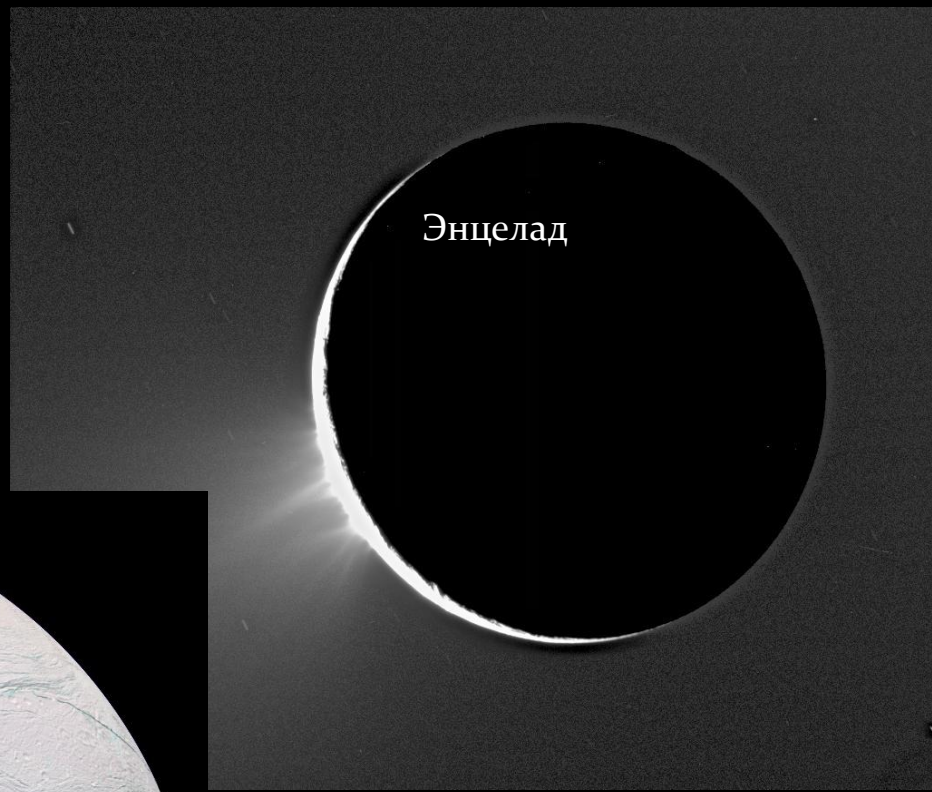
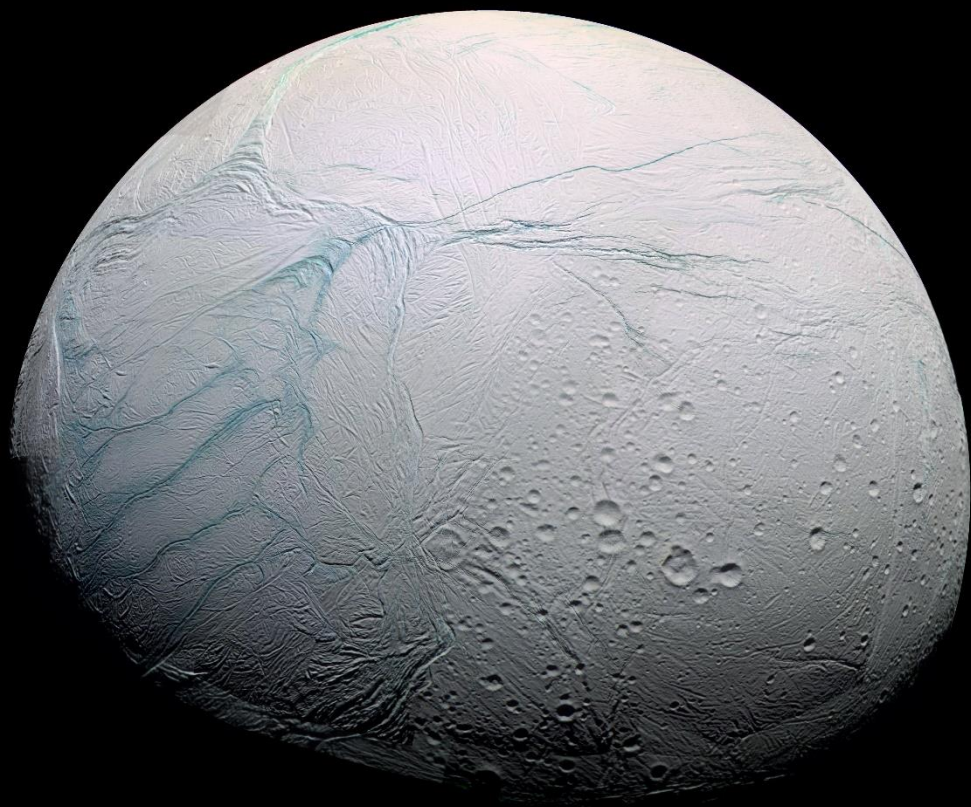
Низкая плотность – состоит в основном из водяного льда

Ударный кратер ~130 км

Ответственен за создание щели Кассини вследствие орбитального резонанса

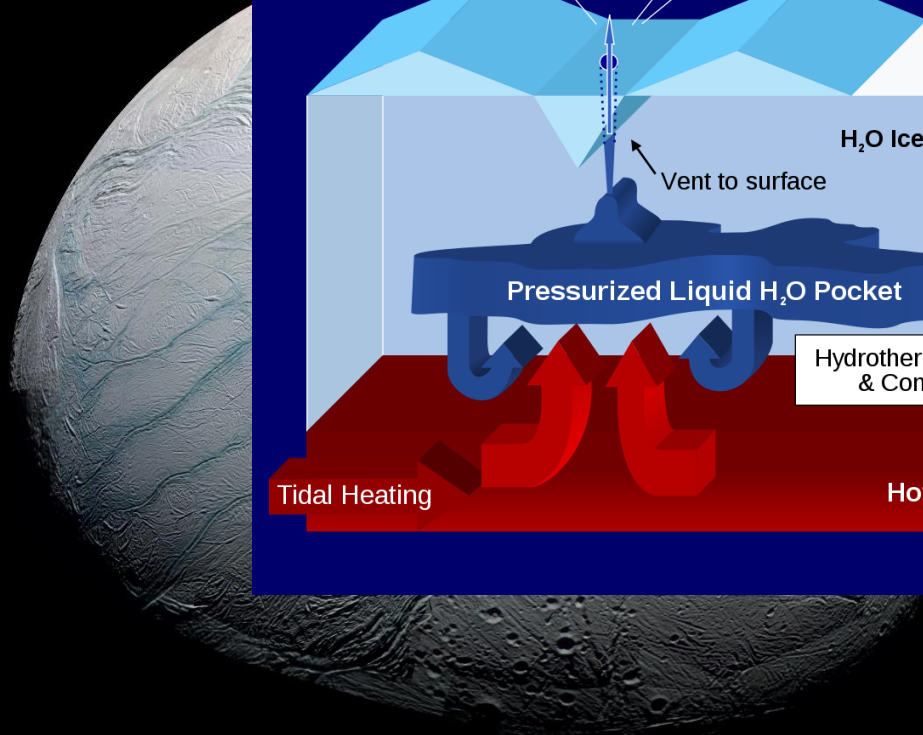
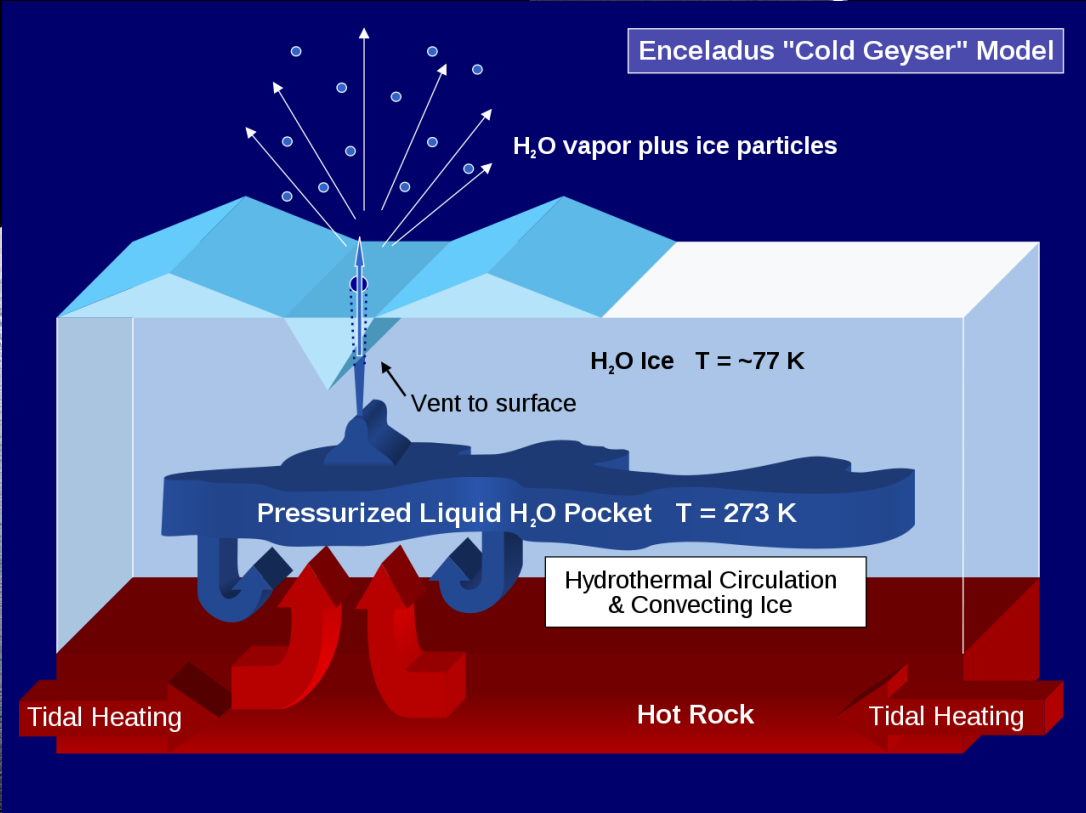
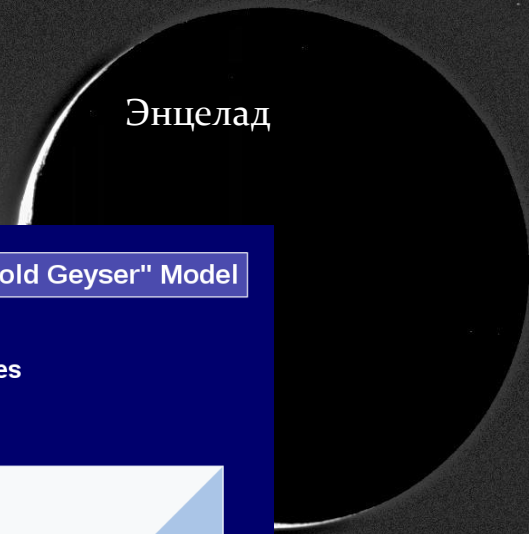


Spacecraft
Orbit
Inner
Atmosphere
Magnetic
Moons





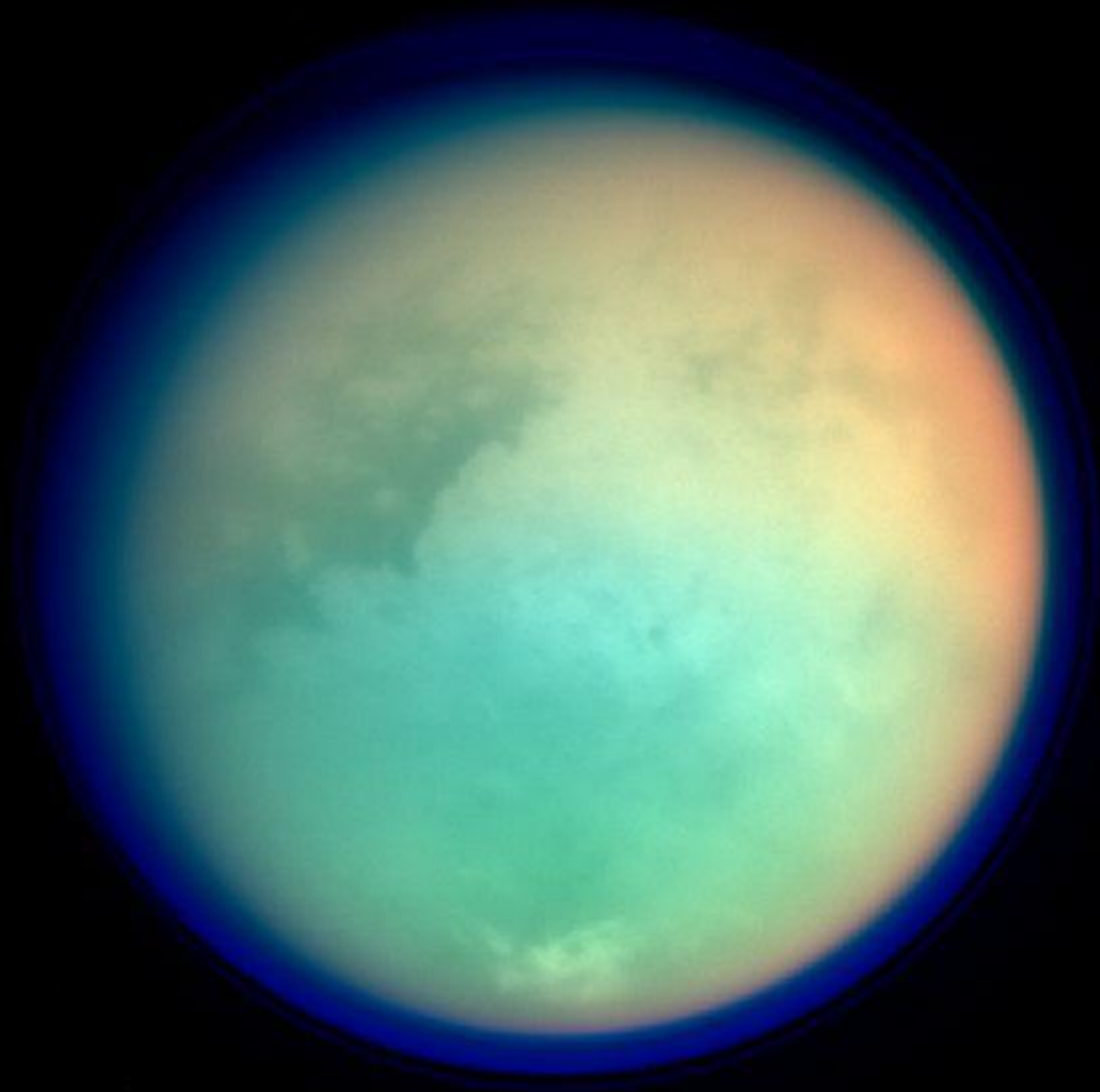
Spacecraft
Orbit
Inner
Atmosphere
Magnetic
Moons





Spacecraft
Orbit
Inner
Atmosphere
Magnetic
Moons

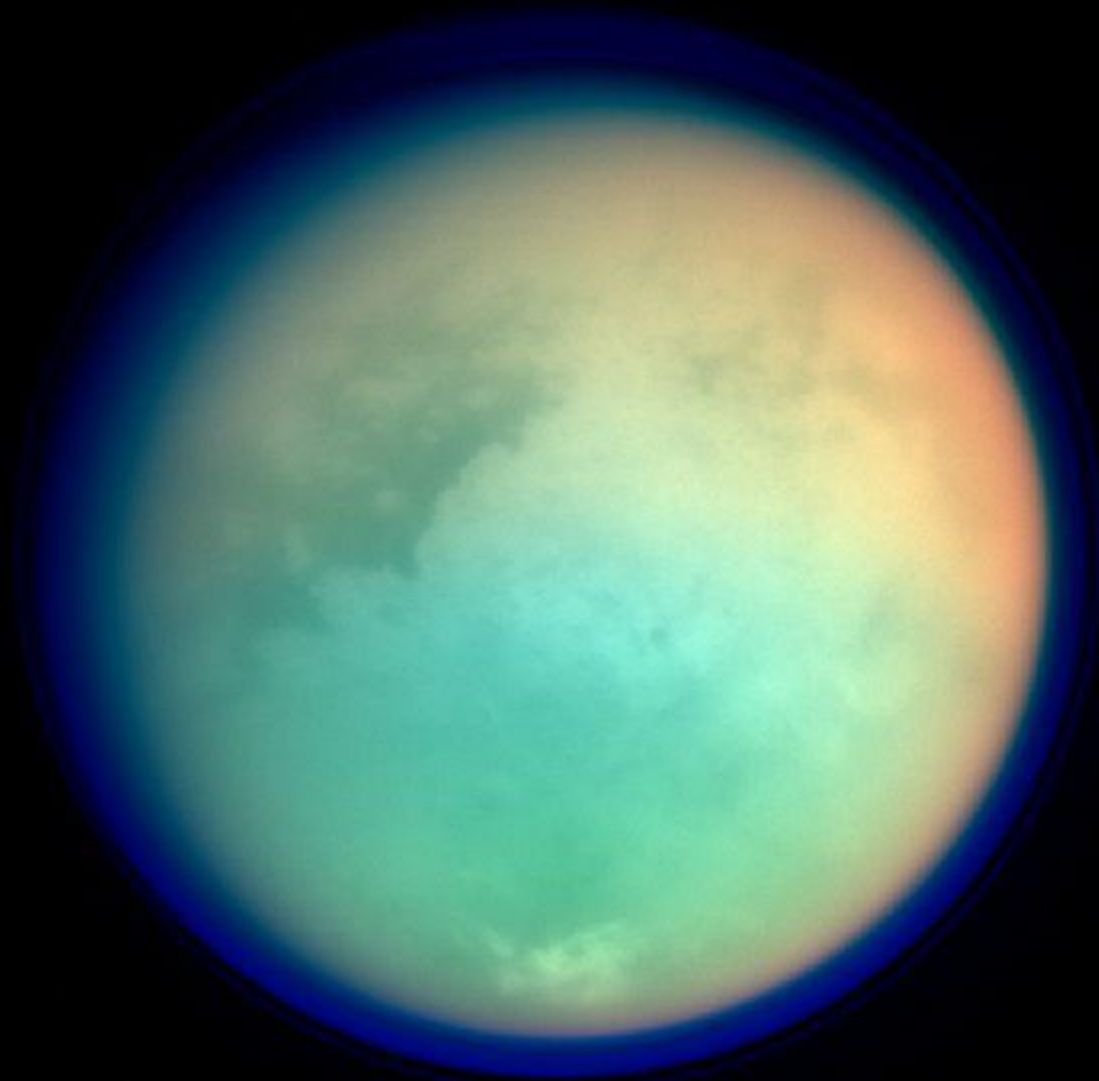
Титан





Spacecraft
Orbit
Inner
Atmosphere
Magnetic
Moons

Титан



Плотная азотная атмосфера (распад аммиака вследствие кометной бомбардировки)

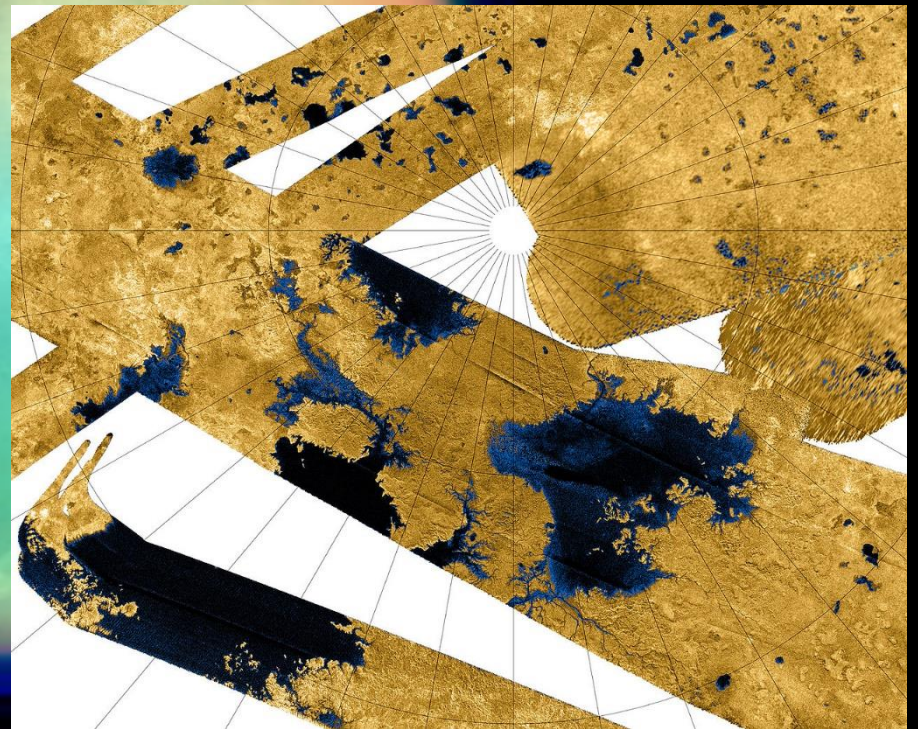
Метановый океан и атмосферный цикл



Spacecraft
Orbit
Inner
Atmosphere
Magnetic
Moons



Титан





Spacecraft
Orbit
Inner
Atmosphere
Magnetic
Moons

Voyager 2  
1986







Spacecraft
Orbit
Inner
Atmosphere
Magnetic
Moons

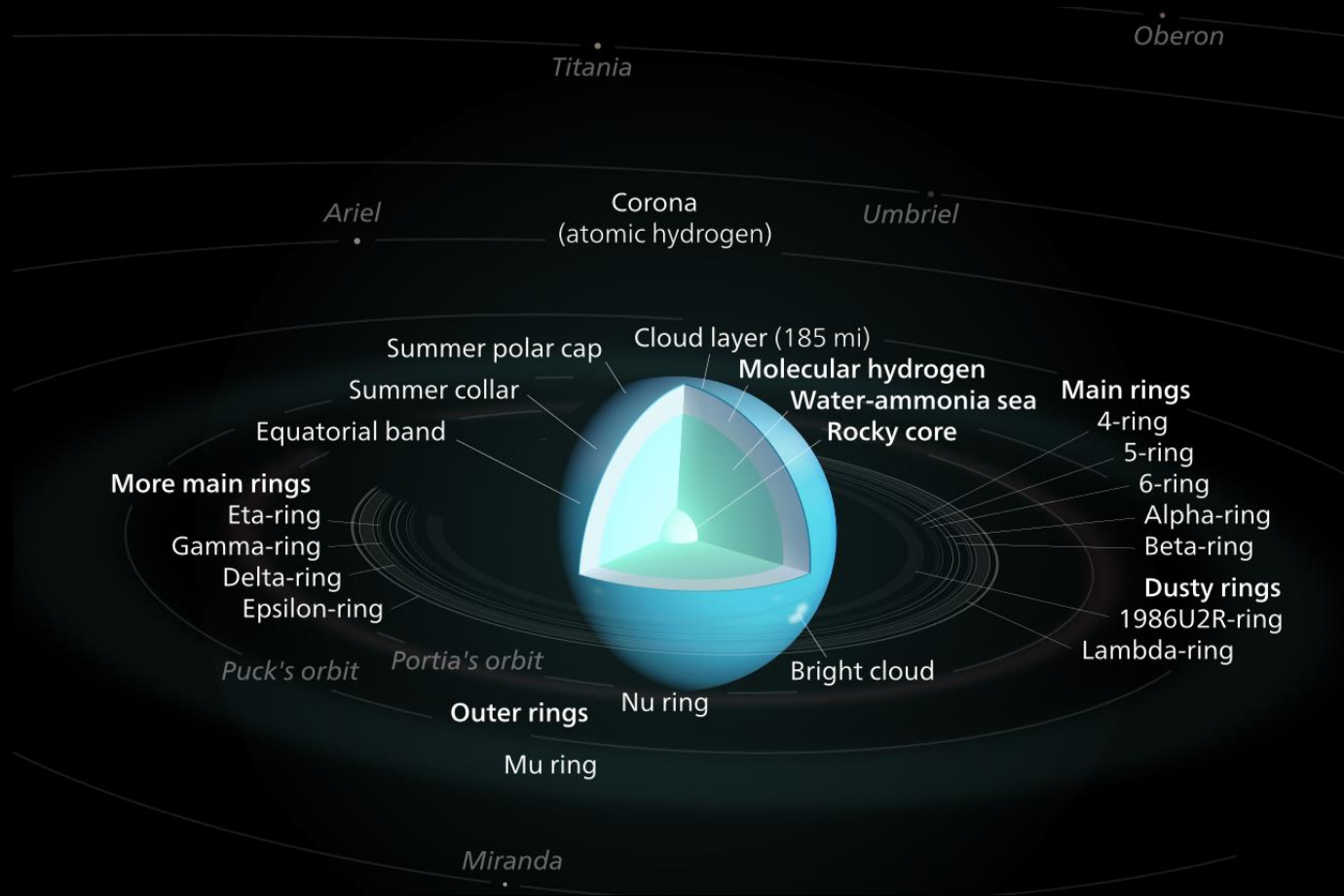


1 ⬆️ день = 17 ч  
1 ⬆️ год = 84 года

«полярная» зима длится 21 год



Spacecraft
Orbit
Inner
Atmosphere
Magnetic
Moons

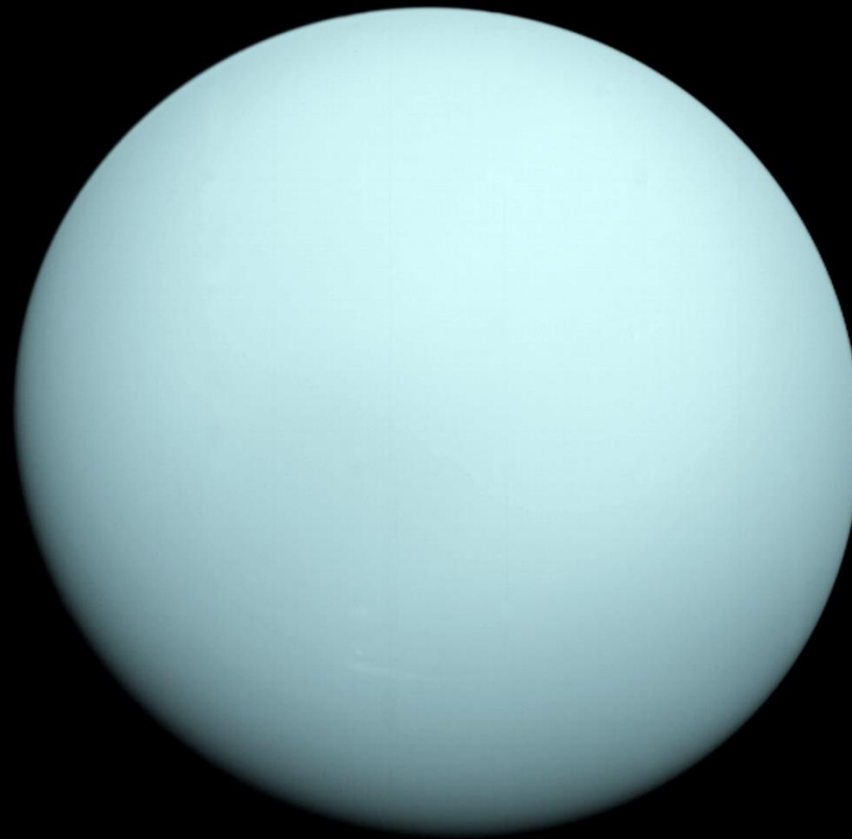


Высокие  $p$ ,  $T$  могут расщеплять молекулы  $\text{CH}_4$   
Углерод под давлением принимает форму алмаза

Возможны слои ионной и сверхионной воды



Spacecraft
Orbit
Inner
Atmosphere
Magnetic
Moons



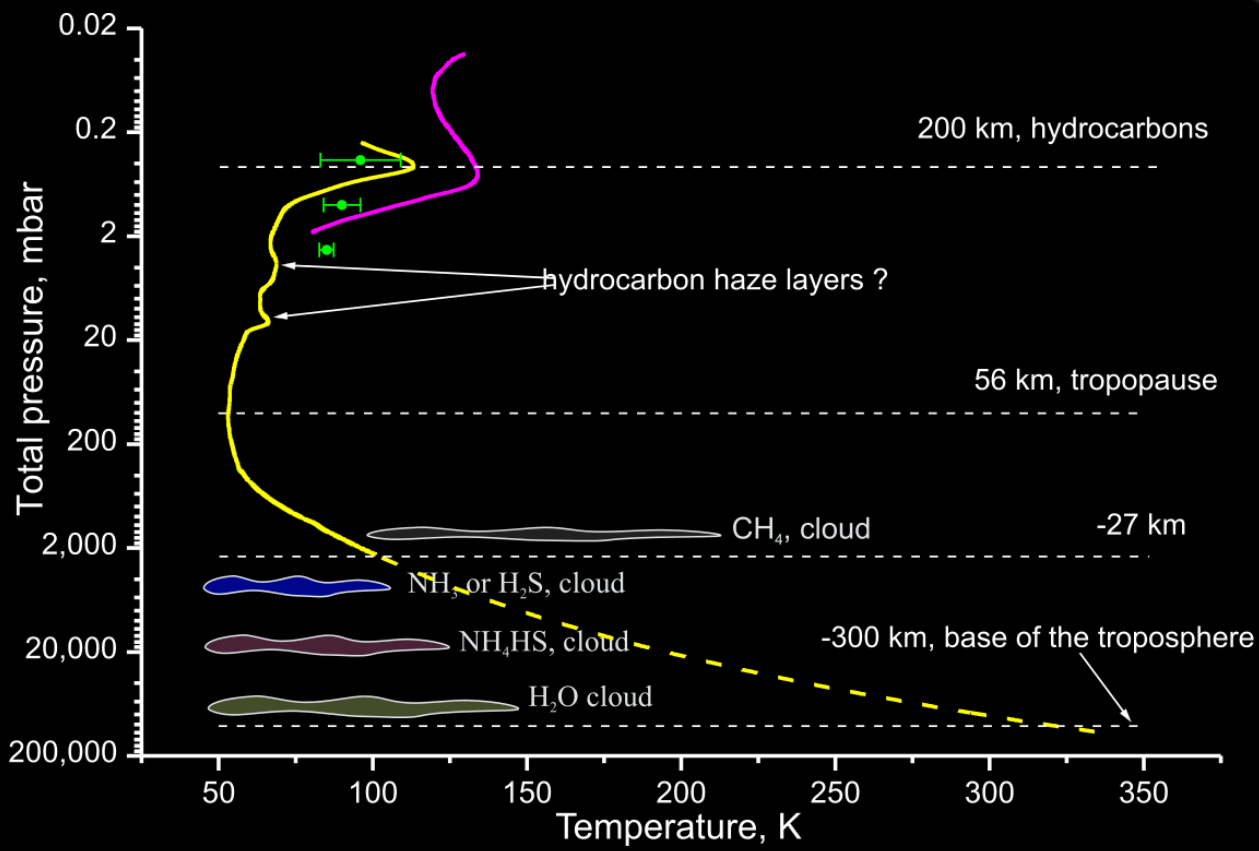
Цвет - засчёт  $\text{CH}_4$

Возможны слои ионной и сверхионной воды

Скорости ветра до  $\sim 240$  м/с – ретроградные на экваторе и проградные вблизи полюсов

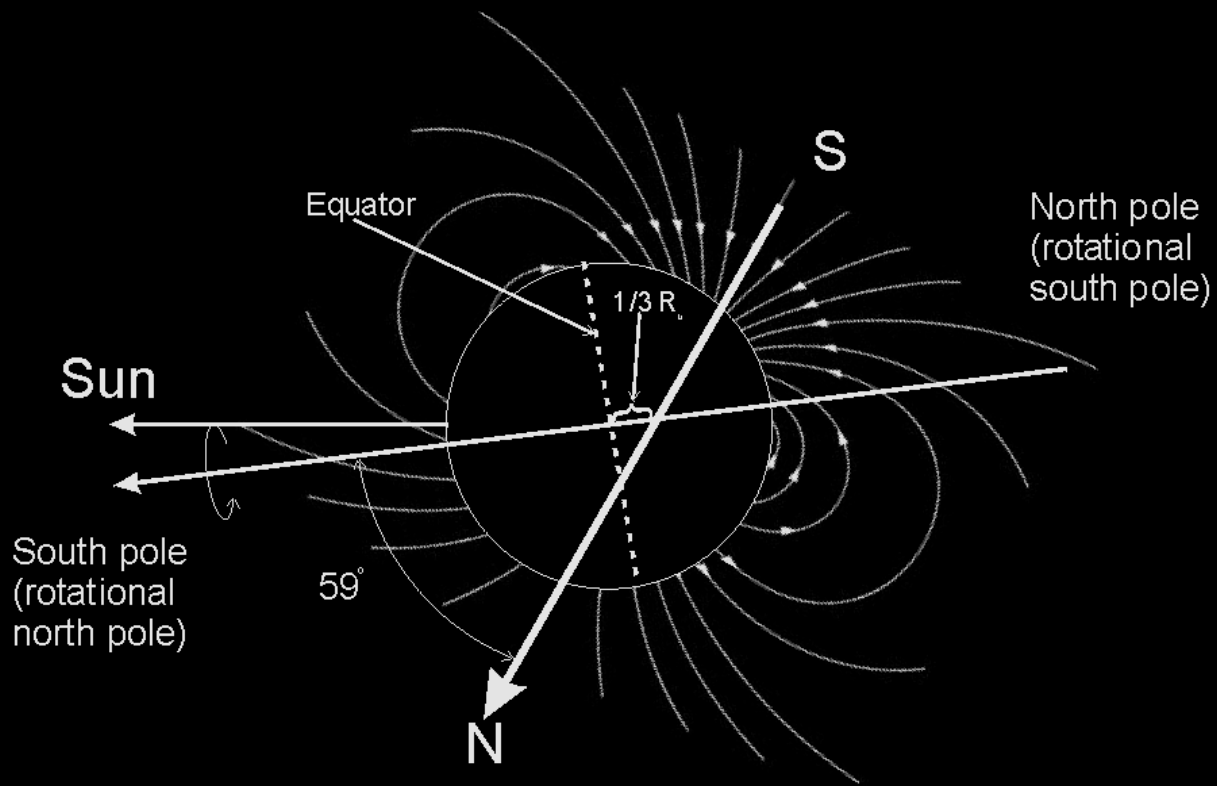


Spacecraft
Orbit
Inner
Atmosphere
Magnetic
Moons





Spacecraft
Orbit
Inner
Atmosphere
Magnetic
Moons

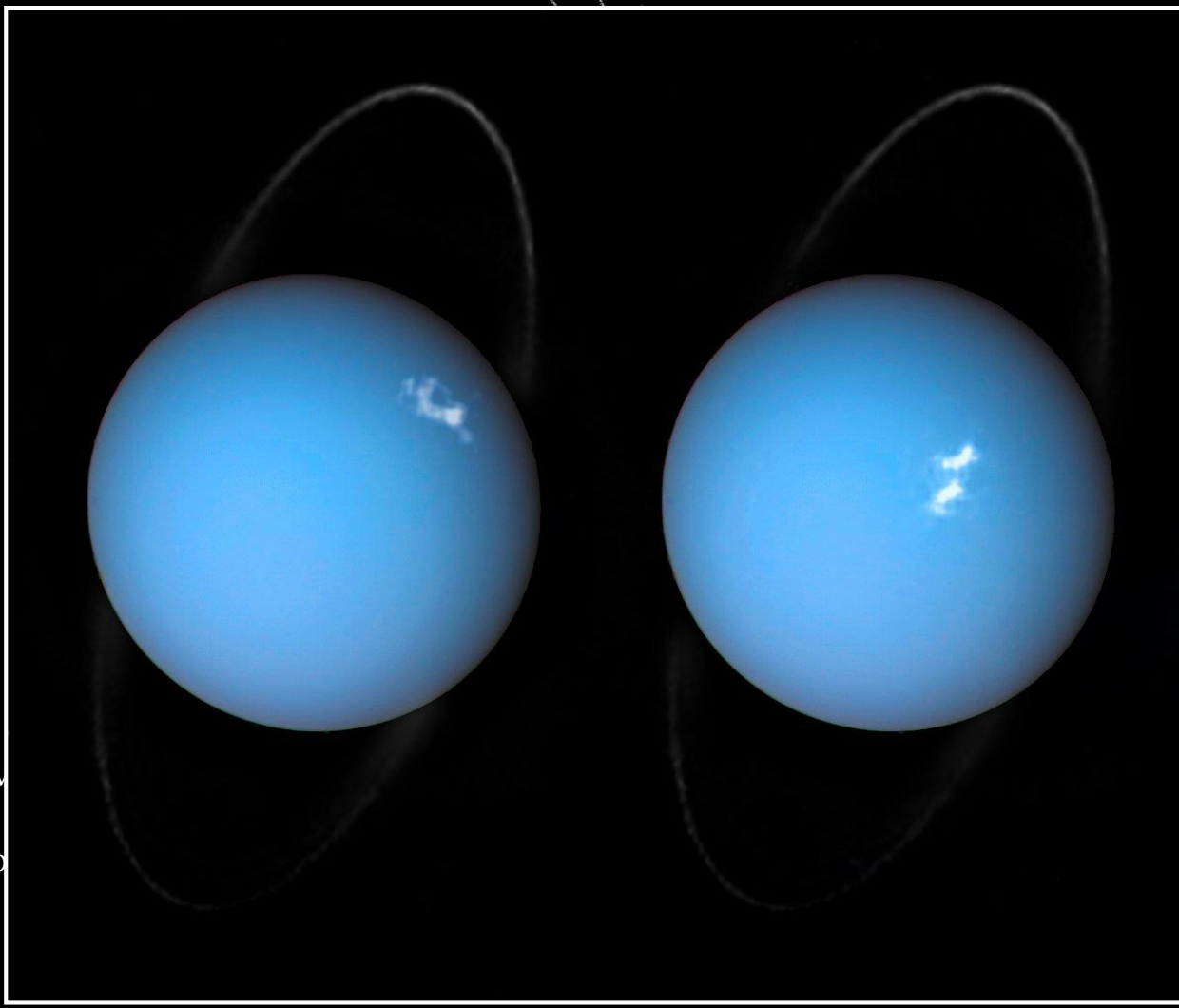


Асимметрия МП между полушариями

Источник МП – мантия (не ядро) (?)



- Spacecraft
- Orbit
- Inner
- Atmosphere
- Magnetic
- Moons

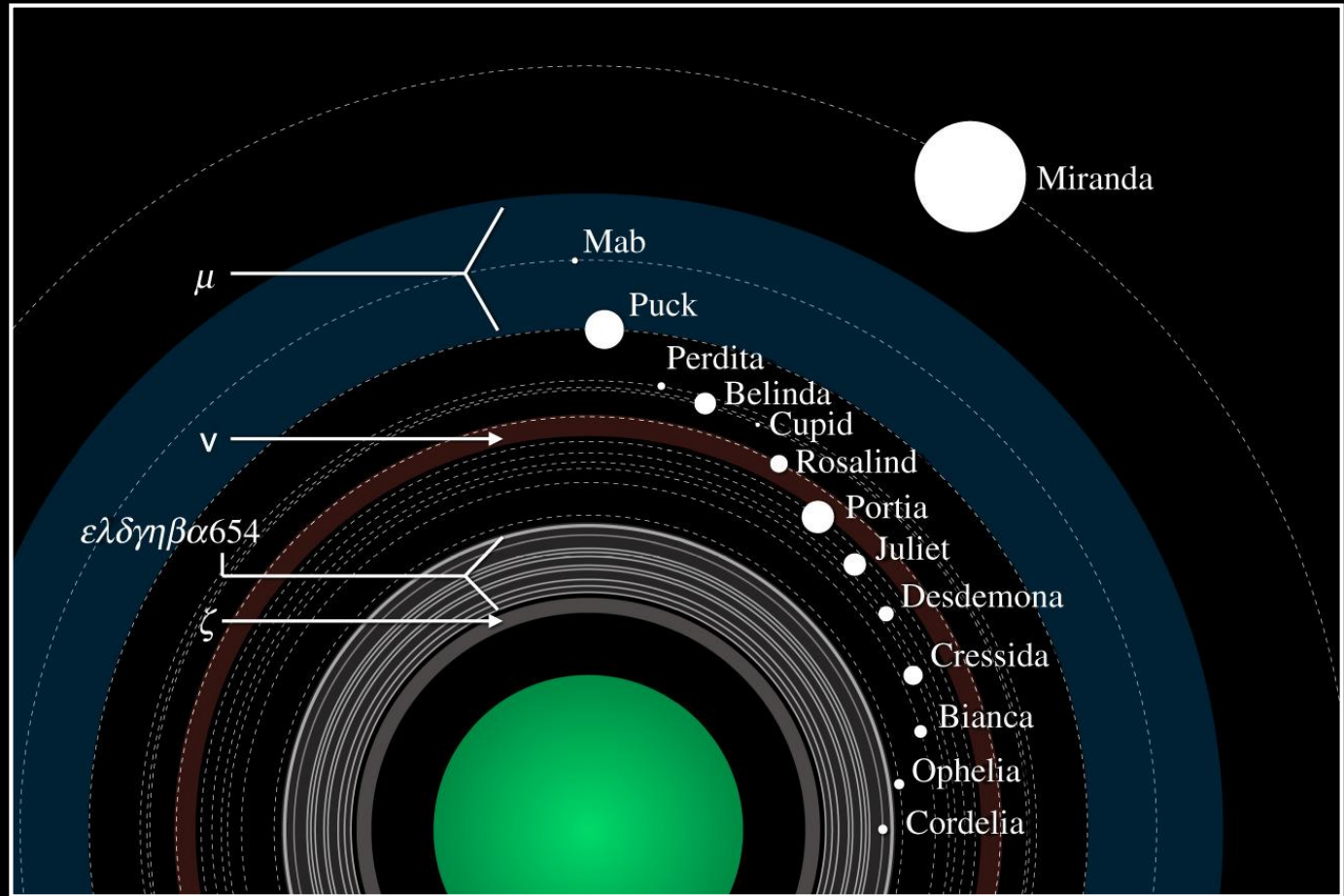


Асим

Исто



Spacecraft
Orbit
Inner
Atmosphere
Magnetic
Moons



Кольца – остатки разрушившегося спутника



Spacecraft

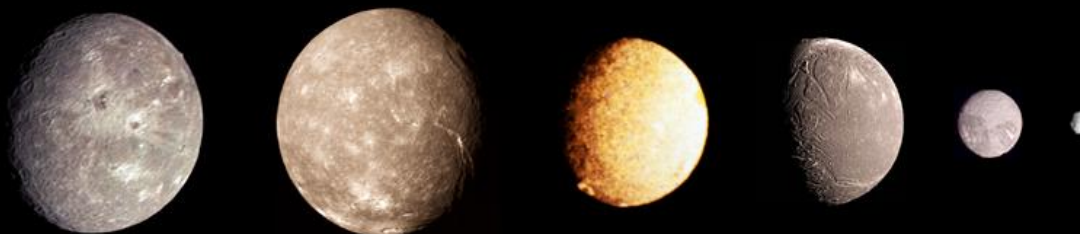
Orbit

Inner

Atmosphere

Magnetic

Moons



Крупнейшие (внешние) спутники Урана характеризуются низким альбедо

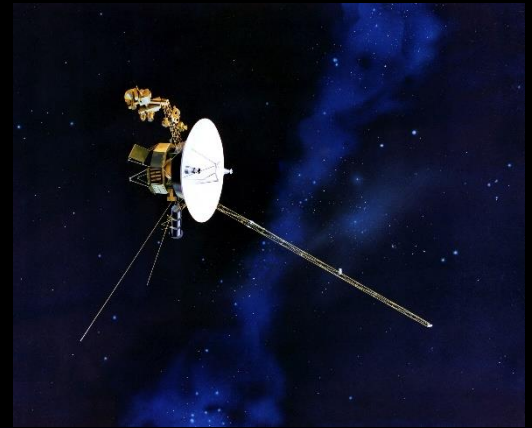
Сформировались из аккреционного диска вокруг Урана





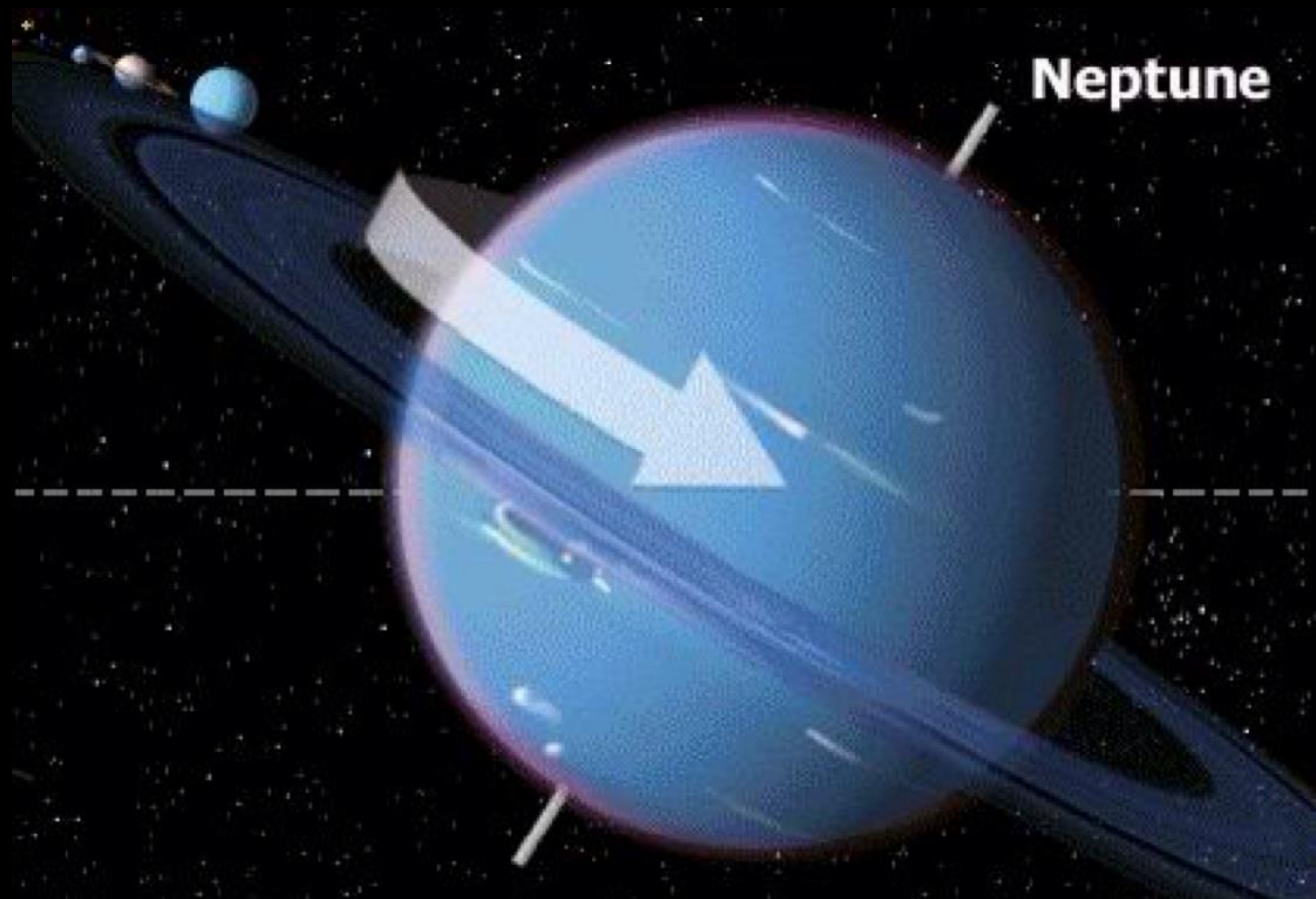
Spacecraft
Orbit
Inner
Atmosphere
Magnetic
Moons

Voyager 2  
1989





Spacecraft
Orbit
Inner
Atmosphere
Magnetic
Moons

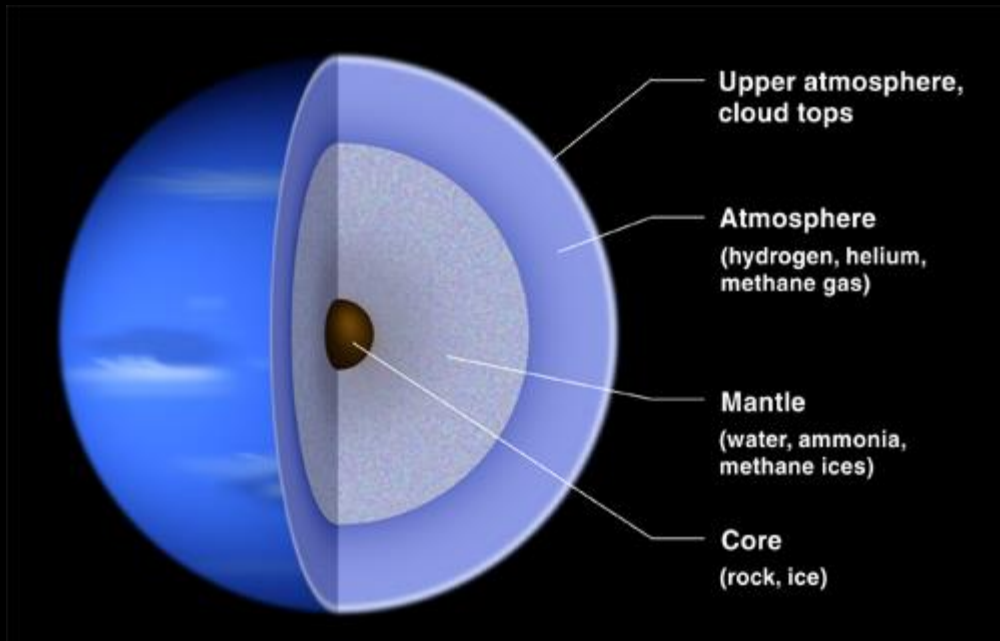


1  $\Psi$  день = 16 ч  
1  $\Psi$  год = 165 лет  
Наклон оси  $28^\circ$

Сезонные изменения не изучены – недостаточно времени для наблюдения

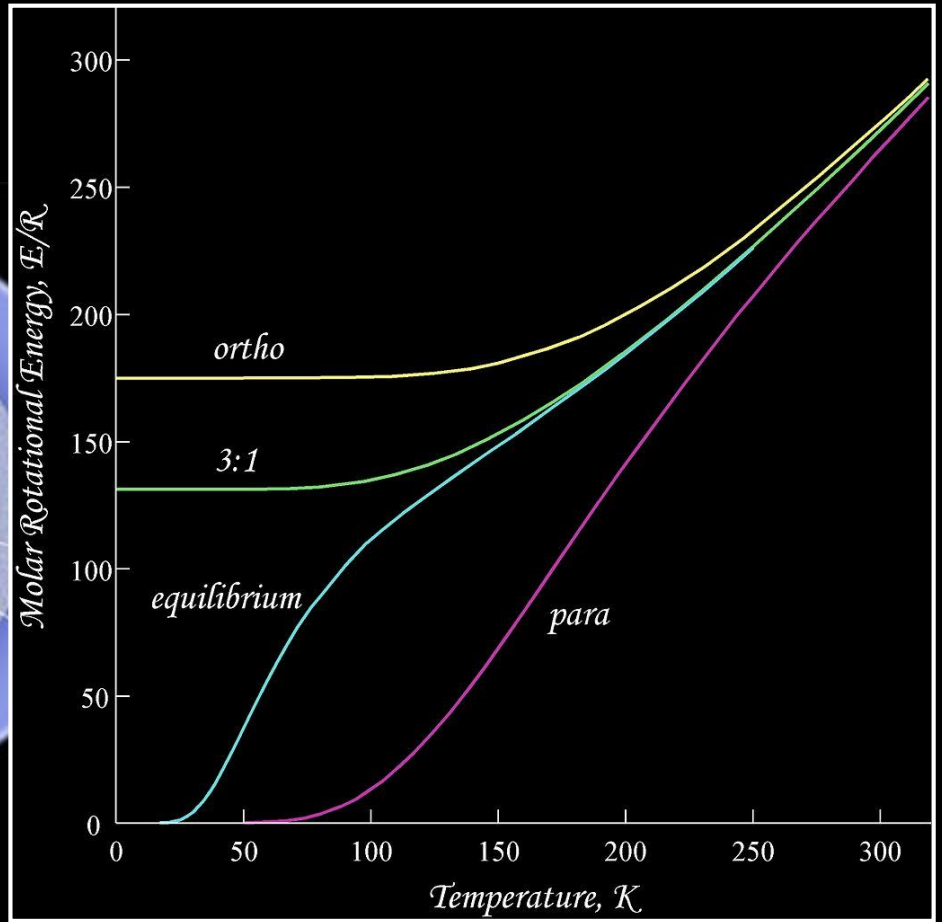
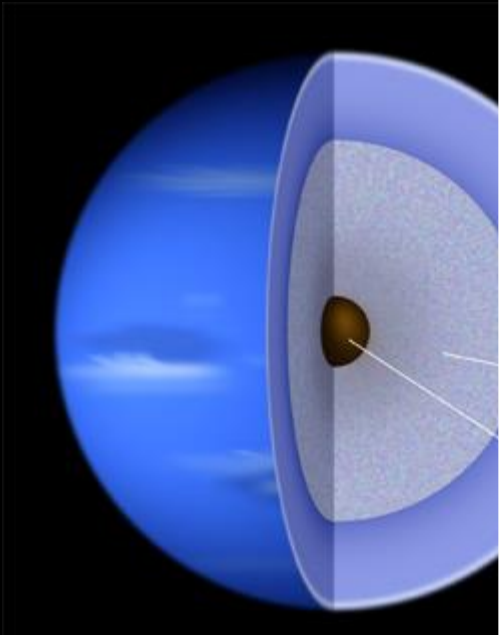


Spacecraft
Orbit
Inner
Atmosphere
Magnetic
Moons





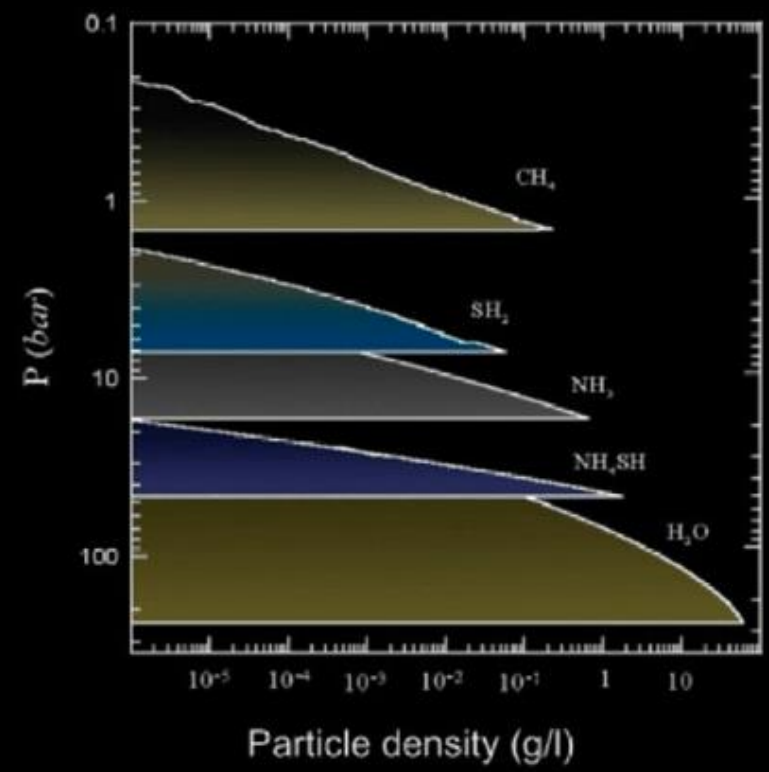
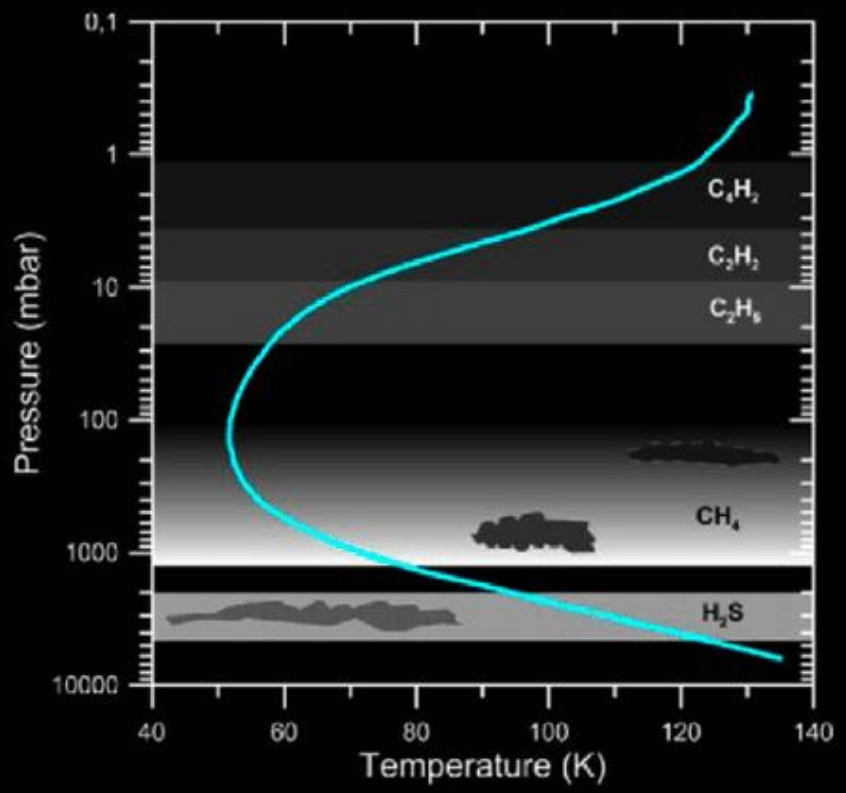
- Spacecraft
- Orbit
- Inner
- Atmosphere
- Magnetic
- Moons



Внутреннее тепло – аномальное отношение орто-водорода  $|\uparrow\uparrow\rangle$  к пара-водороду  $|\uparrow\downarrow\rangle$  ?  
остаточное тепло со времени формирования планеты?



- Spacecraft
- Orbit
- Inner
- Atmosphere
- Magnetic
- Moons



Синий цвет – из-за неизвестного компонента



# Скорости ветра – до 600 м/с

- Spacecraft
- Orbit
- Inner
- Atmosphere
- Magnetic
- Moons

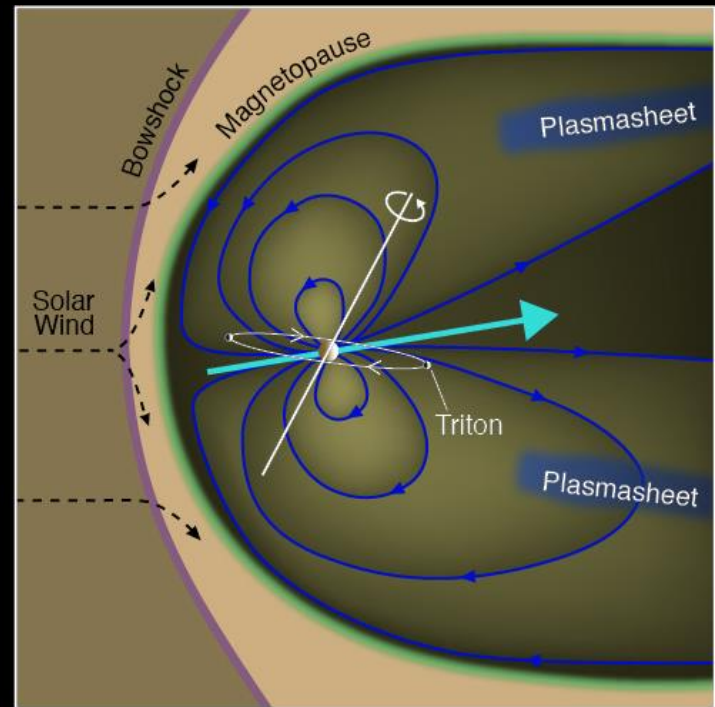
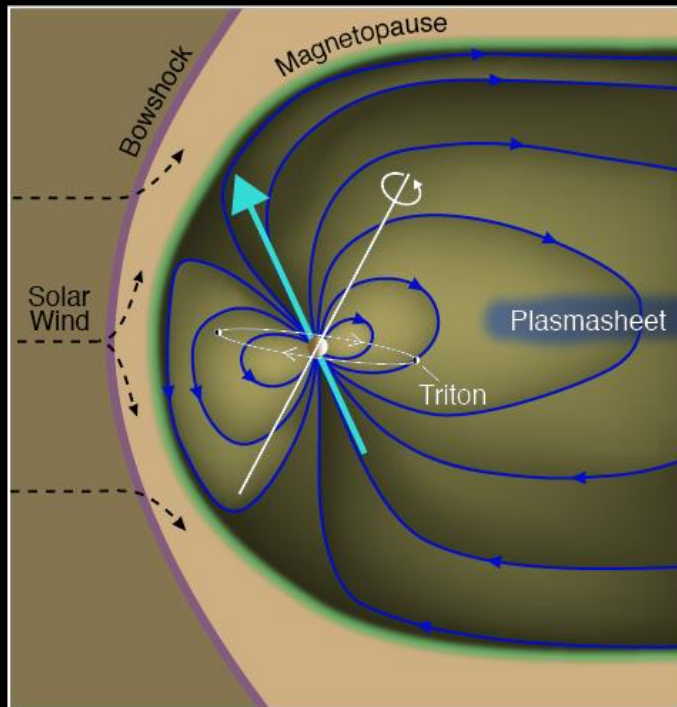


«большое тёмное пятно» – вихрь 13000 x 6000 км в более низких слоях (в тропосфере)



Spacecraft
Orbit
Inner
Atmosphere
Magnetic
Moons

### Наклон магнитной оси - 47° к оси вращения



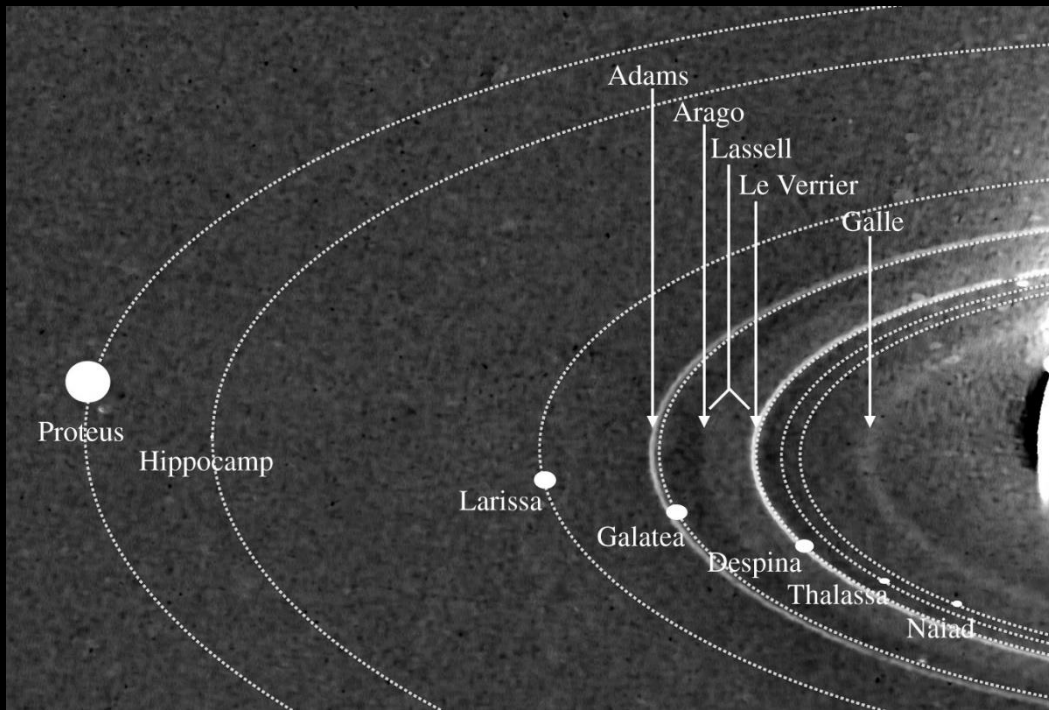


Spacecraft
Orbit
Inner
Atmosphere
Magnetic
Moons

Кольца: лёд + силикаты + углеродные соединения

Молодой возраст – остатки разрушившихся спутников?

Характерные «дуги» кольца Адамса

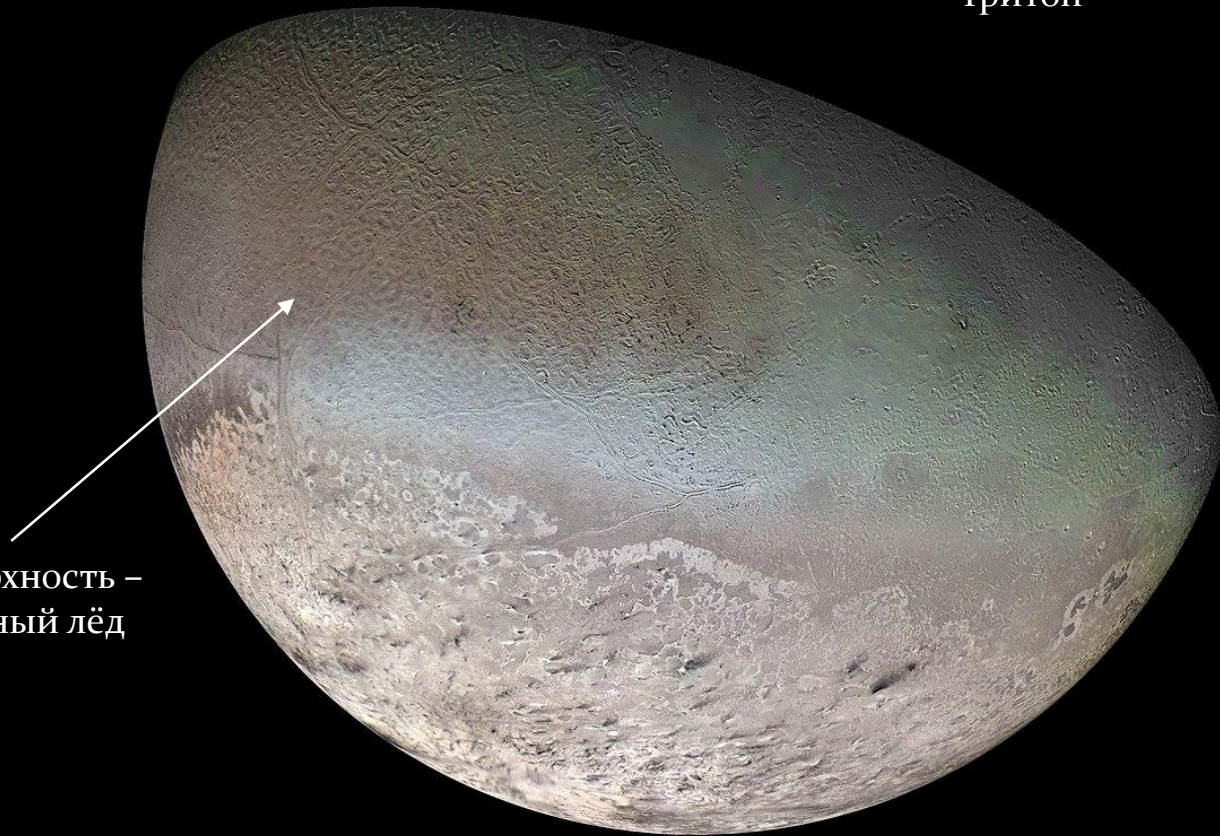






Spacecraft
Orbit
Inner
Atmosphere
Magnetic
Moons

Тритон



Древняя поверхность –  
водяной+азотный лёд

Криовулканизм – гейзеры N<sub>2</sub>, высота гейзеров до 8 км  
Озёра криолавы

Круговая ретроградная орбит вокруг Нептуна, наклонение 30°  
(объект пояса Койпера?)



Научные задачи:

**N1:** малые составляющие атмосферы, «неизвестный синий компонент»

**N2:** причина аномально высокого теплового излучения

**N3:** динамика атмосферы – общая циркуляция и вихри

**N4:** облачная структура

**N5:** внутреннее строение

**N5:** природа магнитного поля и его характеристики; взаимодействие с Тритоном

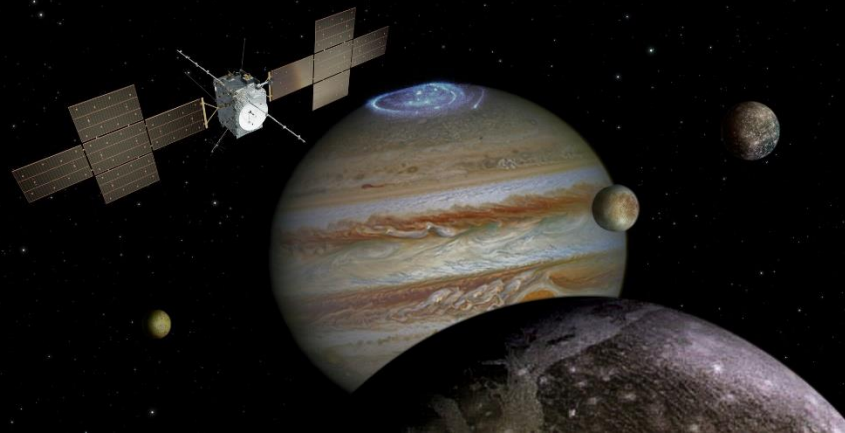
**N6:** природа колец и их взаимодействие со спутниками

**T1:** океан

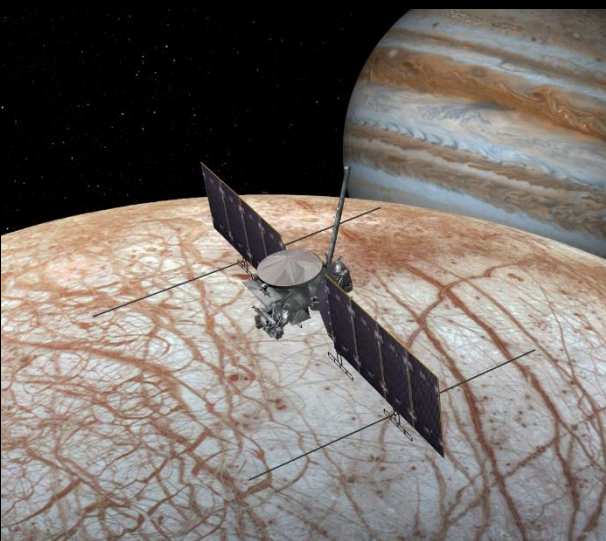
**T2:** криовулканизм

**T3:** происхождение Тритона

Будущие миссии



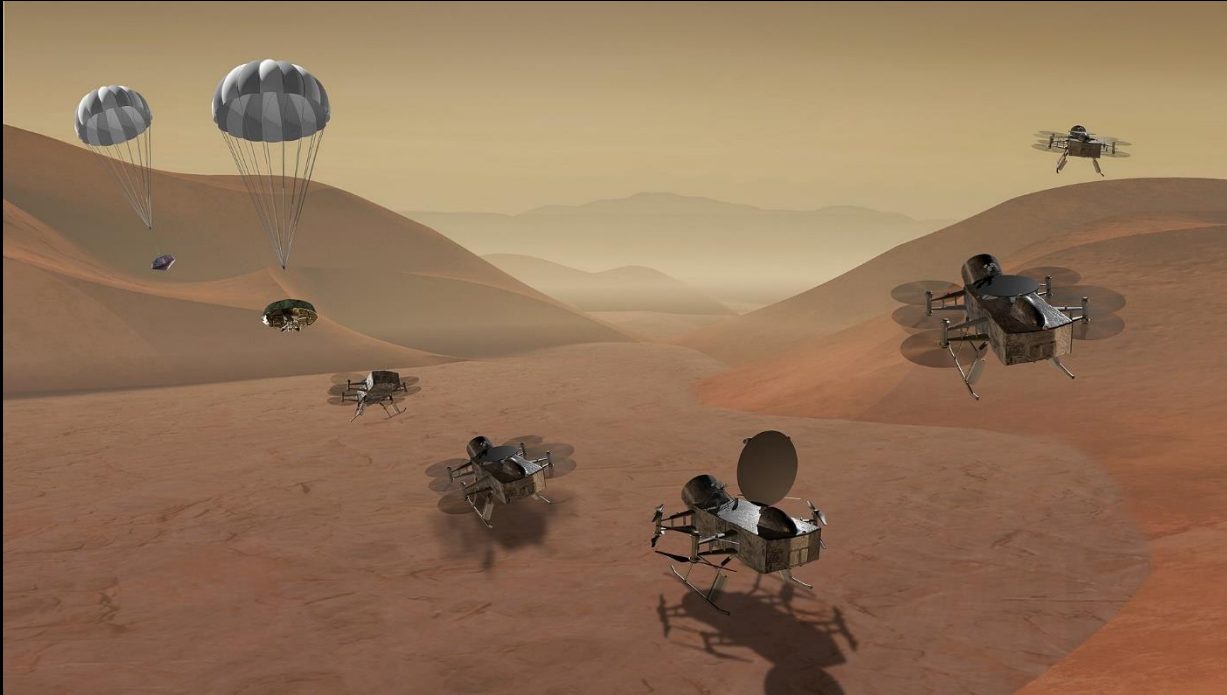
JUICE  
2024  
orbiter



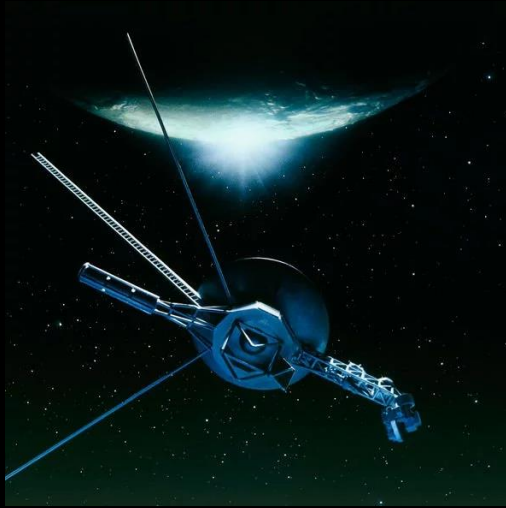
Europa Clipper  
2024  
orbiter



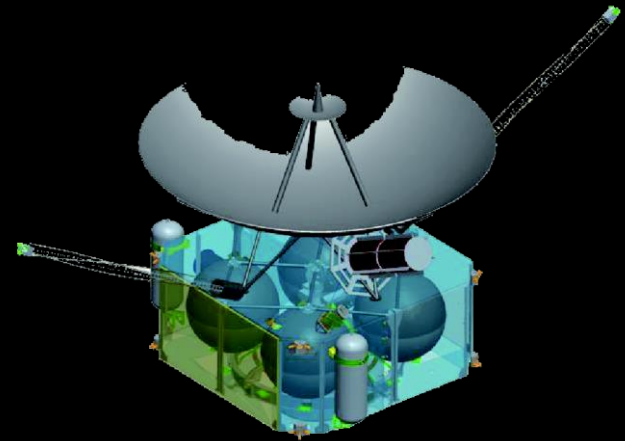
IVS  
2029?  
orbiter



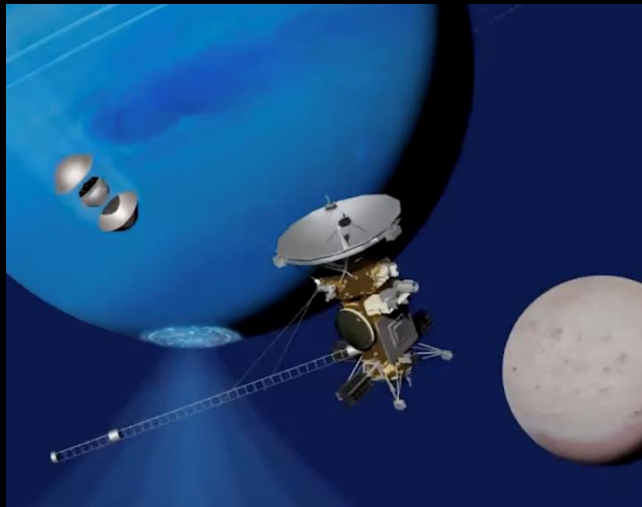
Dragonfly  
2027  
rotorcraft



Trident  
2025?  
flyby



Interstellar Express  
2024-26  
flyby



Neptune Odyssey  
2033  
orbiter+probe

