



# A Naprendszer

# A Naprendszer fogalma

Naprendszer: a Nap és a körülötte keringő anyag gravitációsan kötött rendszere

- minden test, ami tartósan, közvetlenül vagy közvetetten a Nap körül kering

A Naprendszer határa:

- belső: ameddig a napszél fúj (helioszféra)  
[heliopauza – ahol a napszél összeütközik a csillagközi közeggel és a nyomásuk kiegyenlítődik]  
távolság a Naptól:  $\sim 100\text{-}200$  CsE\* (Voyager 1, 2012: 121 CsE)
- külső: ameddig a Nap gravitációs hatása dominál a környezethez képest  
távolság a Naptól:  $\sim 1\text{-}2$  f.é.\*\*

\* 1 CsE (csillagászati egység) [AU]  $\approx 149,6 \cdot 10^9$  m – a közepes Nap-Föld távolság

\*\* 1 f.é. (fényév) [ly]  $\approx 63\,241$  CsE  $\approx 9,46 \cdot 10^{15}$  m – a fény által 1 év alatt vákuumban megtett távolság

# Égitestek a Naprendszerben 1.

- **Nap** (központi csillag)
- **bolygók**: közvetlenül a Nap körül keringő, közel gömb alakú égitest (átmérő  $\geq 800$  km), amely kitakarította a környezetét (a pályája környékén csak sokkal kisebbek keringenek)
  - kőzetbolygók: Merkúr, Vénusz, Föld, Mars
  - óriásbolygók:
    - gázóriások: Jupiter, Szaturnusz
    - vízbolygók: Uránusz, Neptunusz
- **törpebolygók**: közvetlenül a Nap körül keringő, közel gömb alakú égitest ( $\geq 800$  km), amely nem takarította ki a pályája környezetét (2006, IAU)
  - Ceres, Pluto, Haumea, Makemake, Eris  
+ további, eddig ismeretlenek vagy nem bizonyítottak (min. százas nagyságrend)
- **holdak**: közvetetten a Nap körül, közvetlenül egy másik test (bolygó, törpebolygó, kisbolygó) körül keringő égitest
  - a hold és anyabolygó közös tömegközéppontja az anyabolygó belsejébe esik

# Égitestek a Naprendszerben 2.

Kis naprendszerbeli testek (KNT):

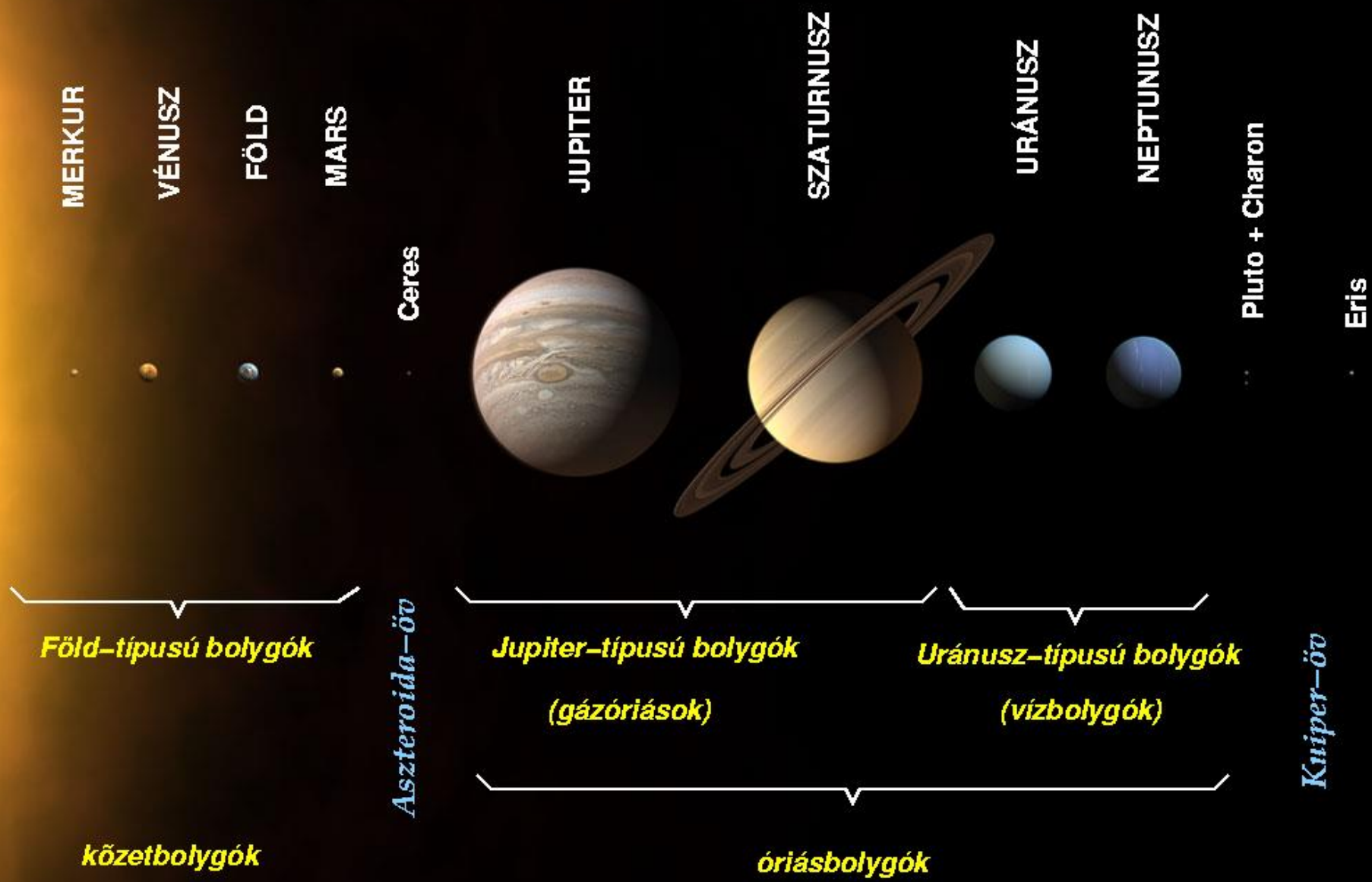
- **kisbolygók**: legalább 1 km átmérőjű, de a gömb alak felvételéhez kicsi planetáris test
  - aszteroida: kőzetből álló kisbolygó
  - üstökös: főként jégből álló KNT, amely elnyúlt pályája mentén közel kerül a Naphoz
  - (egyebek, pl. „kentaur”: üstökös-szerű, kevésbé elnyúlt pályájú, Jupiter és Neptunusz közti KNT)

leggyakoribb előfordulási helyek:

kisbolygó-öv (Mars és Jupiter pályái közt, 2-4 CsE), ill. Kuiper-öv (Neptunuszon túl, 30-55 CsE)

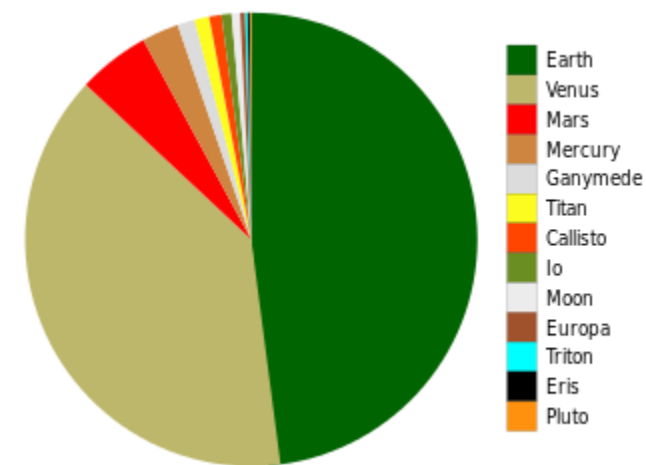
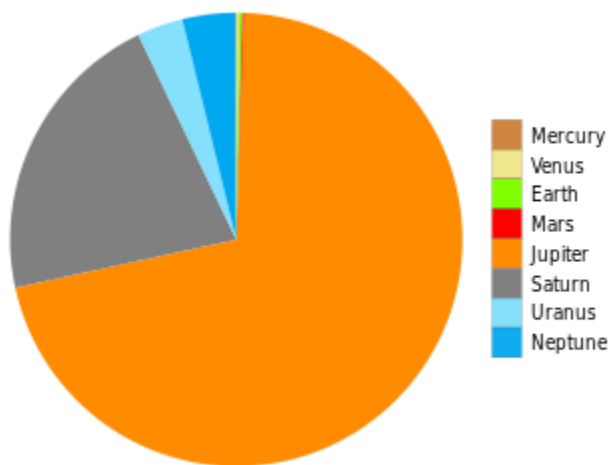
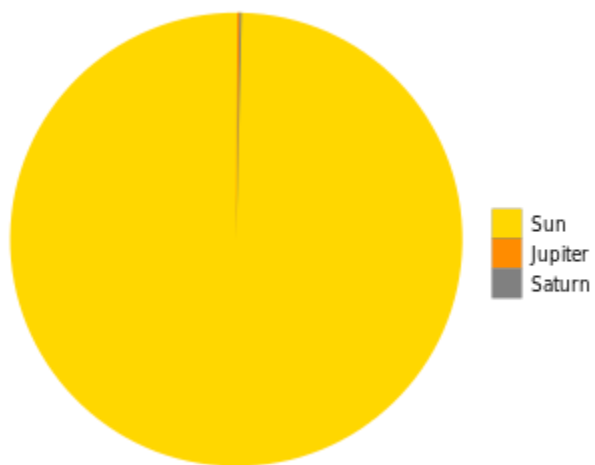
- **meteoridok**: KNT, ami 1 km-nél kisebb, de 0,1 mm-nél nagyobb
  - meteor: a Föld légkörében felizzó meteorid (látványa)
  - meteorit: a Föld felszínére lehullott meteorid
- **bolygóközi por**: meteoridnál kisebb testek

(A fenti kategóriák között nincsenek éles határok, folytonosak az átmenetek.)

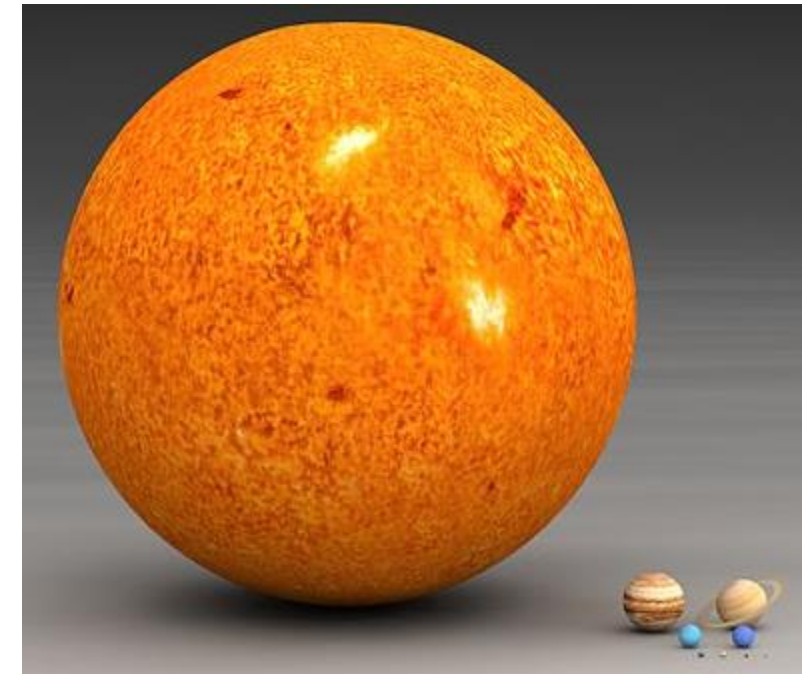
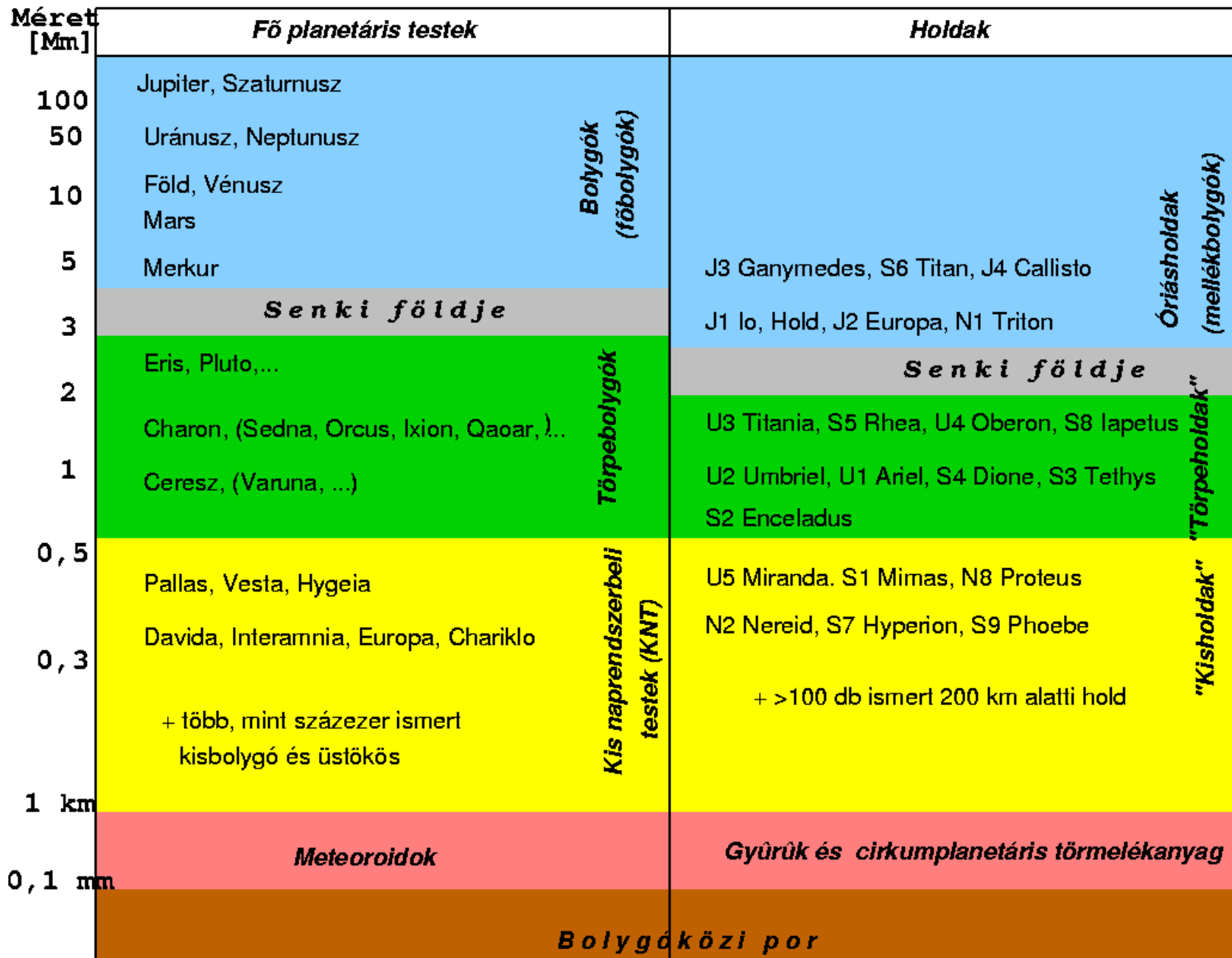


# A Naprendszer tömegeloszlása

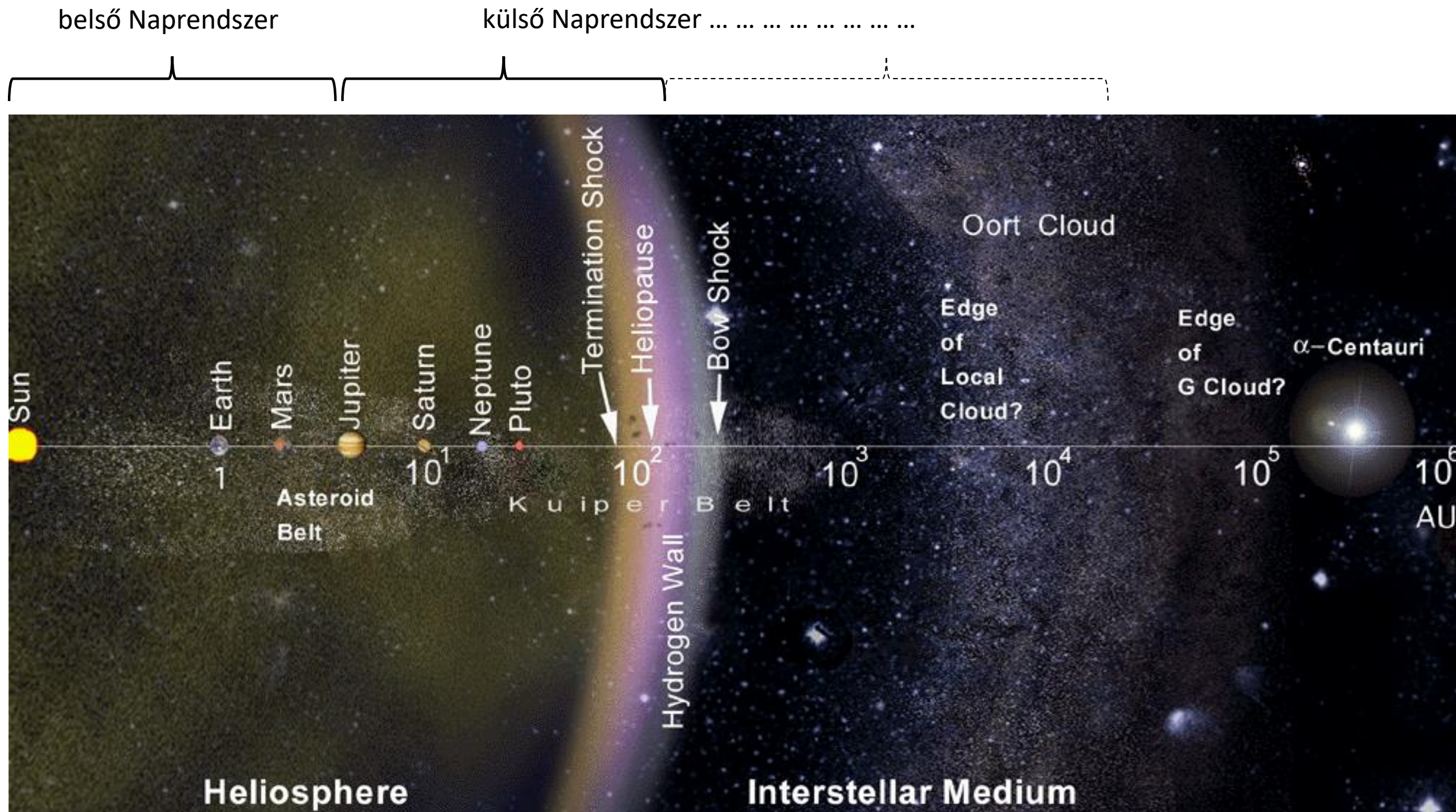
Égitest	Nap	Óriásbolygó	Kőzetbolygó	Törpebolygó	Hold	Egyéb
Ismert darabszám	1	4	4	5	185 (bolygó) + több száz	?
Becsült darabszám	1	4 + ? (2016)	4	$10^2 \sim 10^4$	?	?
Össztömeg kg	$1,99 \cdot 10^{30}$	$2,66 \cdot 10^{27}$	$1,19 \cdot 10^{25}$	???	???	???
Össztömeg $M_F$	333 000	445	1,99	még kevesebb...		
Össztömeg %	> 99,8	~0,2	$6 \cdot 10^{-6}$	még kevesebb...		



# A Naprendszer égitestjeinek méretbeli eloszlása



# A Naprendszer méretei (logaritmikus skála)

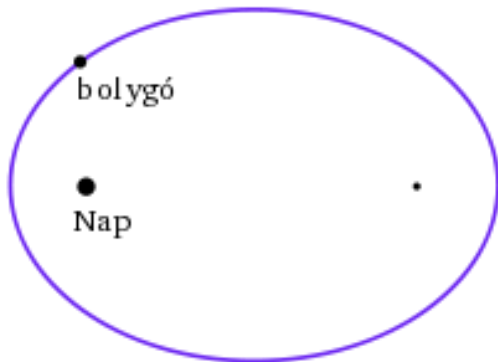




# Az égitestek mozgása a Naprendszerben

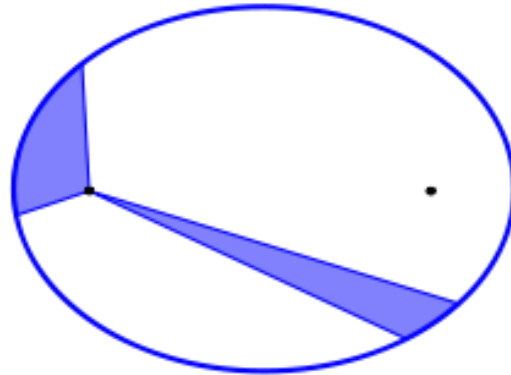
## Kepler 1. törvénye:

Az égitestek ellipszis-pályán keringenek, amelynek egyik fókuszpontjában a Nap áll



## Kepler 2. törvénye:

A bolygót a Nappal összekötő szakasz (vezérsugár) egyenlő idők alatt egyenlő területeket sűrol



## Kepler 3. törvénye:

A bolygópályák fél nagytengelyeinek köbei úgy aránylanak egymáshoz, mint a keringési idők négyzetei

$$\frac{a^3}{T^2} = \text{állandó}$$

Pontosabban: kúpszelet, lehet:

- ellipszis ( $e < 1$ ) – pl. bolygók
- parabola ( $e = 1$ ) – üstökös (kb.)
- hiperbola ( $e > 1$ ) – N.r-en kívüli

Perihélium: napközei pont  
(perigeum: földközei, stb.)

Aphélium: naptávoli pont  
(apogeum: földtávoli, stb.)

Direkt v. prográd mozgás: pozitív irányú (É-i ekliptikai pólus felől)

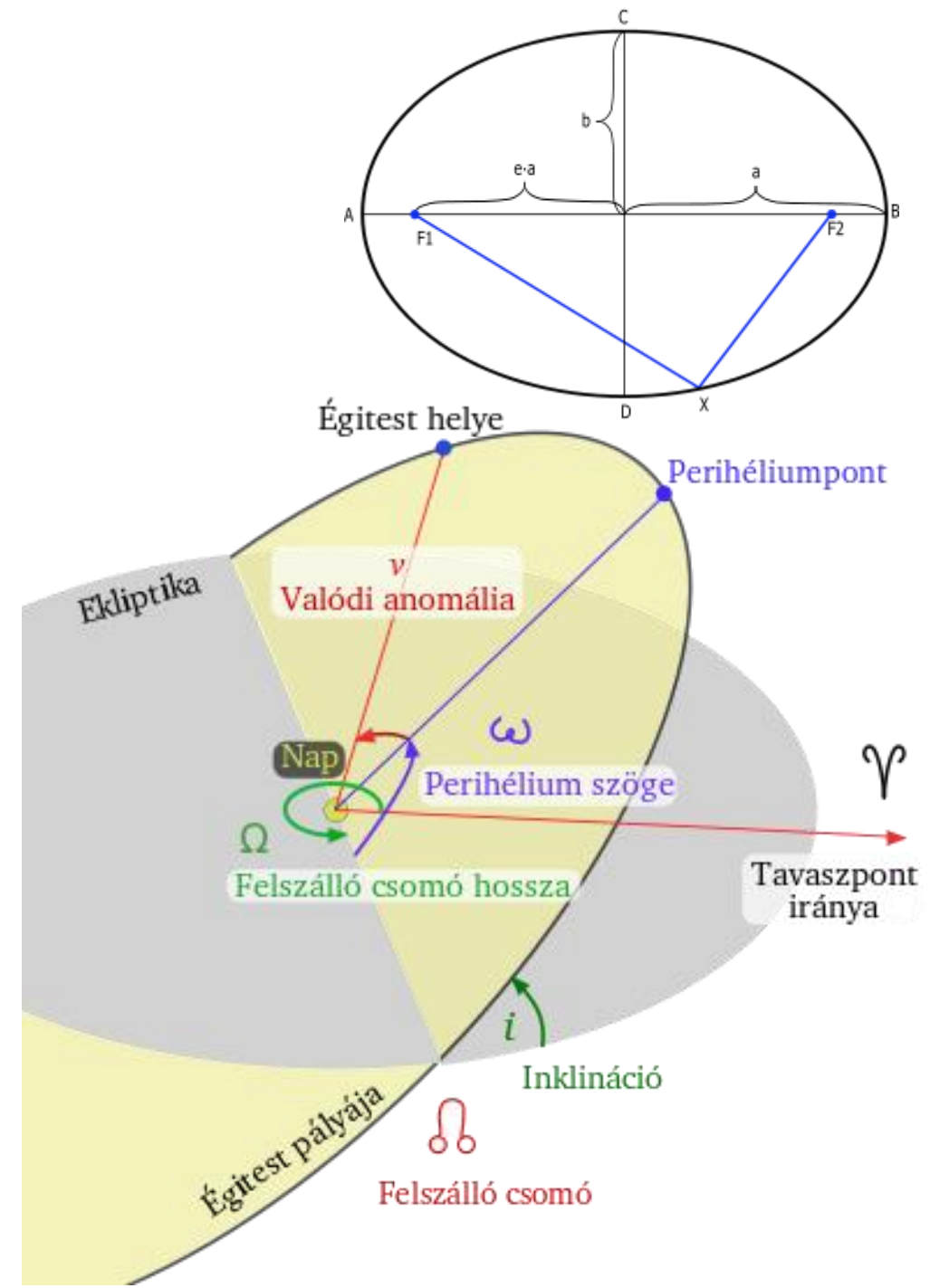
Retrográd mozgás: negatív irányú

# A Kepler-pályák pályaelemei

Mechanikában tömegpont mozgása kiszámítható, ha ismertek a kezdeti helykoordinátái (3 adat) és sebességkomponensei (3 adat).

Csillagászatban ezt a következő 6 adattal váltjuk ki:

- $a$ : a fél nagytengely hossza (ellipszis nagysága)
- $e$ : excentricitás (ellipszis lapultsága)
- $i$ : inklináció (ellipszis-sík hajlása az ekliptikához)
- felszálló csomó hossza (ferde ellipszis-sík iránya)
- perihélium szöge (merre áll az ellipszis)
- perihélium-átmenet időpontja (haladás kezdőpontja)



# A bolygók pályaelemei

Égitest	Merkúr	Vénusz	Föld	Mars	Ceres	Jupiter	Szatur.	Halley-ü.	Urán.	Nept.	Pluto	Eris
$a$ [CsE]	0,39	0,72	1	1,52	2,77	5,20	9,54	17,8	19,22	30,06	39,48	67,67
$T$ [év]	0,24	0,62	1	1,88	4,60	11,86	29,46	75,3	84,01	164,8	248,1	557
$e$	0,206	0,007	0,017	0,093	0,080	0,048	0,054	0,967	0,047	0,009	0,249	0,442
$i$ [°]	7,01	3,39	0	1,85	10,59	1,31	2,49	162,3	0,77	1,77	17,14	44,19

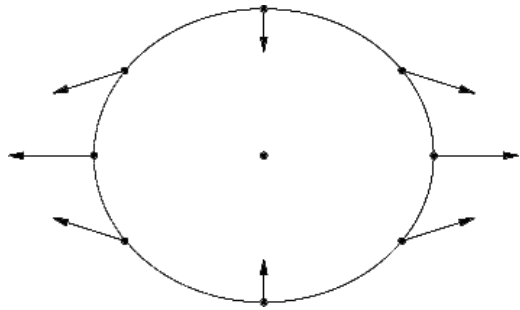
Tanulságok:

- a bolygók excentricitása kicsi  $\rightarrow$  közel körpályák
- a bolygók inklinációja kicsi  $\rightarrow$  nagyjából egy síkban
- kifelé egyre lassabban haladnak

}  $\rightarrow$  **örvényszerű lapos korong**

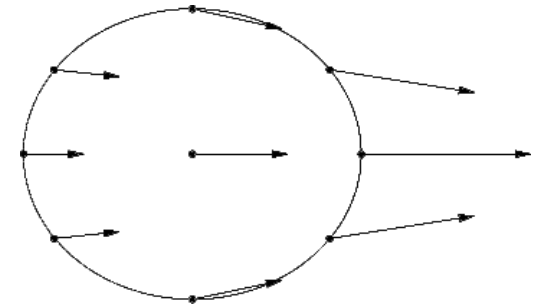
Pályanagyságra: Titius-Bode szabály:  $a = 0,4 + 0,3 \cdot 2^n$ , ahol  $n = -\infty, 0, 1, 2, 4, 5, 6$  rendre az első 7 bolygóra.

(18. sz-i empirikus szabály, ami kb. érvényesült, majd a felfedezett Uránuszra is, de a Neptunuszra már nem. Viszont a Ceresre jól teljesül  $n = 3$ . A mai dinamikai modellek kb. (de nem pontosan) magyarázzák.)



Tömegközépponti rendszerben

## Egy kis dinamika: árapály-erők



Inerciarendszerben

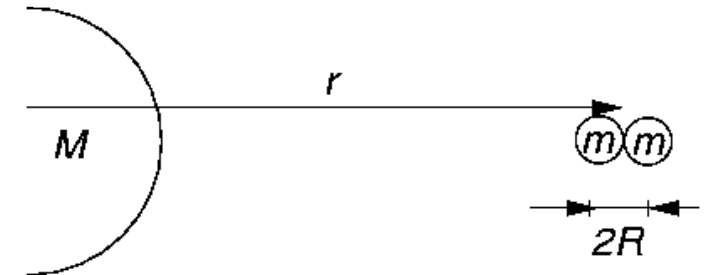
**Árapálykeltő erő:** két pont között a gravitációs erő különbsége

Számítása:

$$F_t = GMm \left[ \frac{1}{(r-R)^2} - \frac{1}{(r+R)^2} \right]$$

$$\frac{F_t}{GMm} = \frac{(r+R)^2 - (r-R)^2}{(r-R)^2(r+R)^2} = \frac{4Rr}{(r^2 - R^2)^2} = \frac{4Rr}{r^4 \underbrace{[1 - 2(R/r)^2 + (R/r)^4]}_{\text{elh., ha } R \ll r}} \approx \frac{4R}{r^3}$$

vagyis  $F \sim R/r^3$



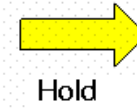
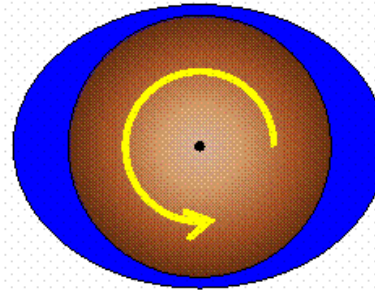
→ azaz a Földön a Nap hatása kb. fele a Holdénak  $\frac{M_\odot}{M_\text{H}} \left( \frac{d_\text{H}}{1 \text{ AU}} \right)^3 \approx 0.45$

# Az árapály-erők hatásai 1.

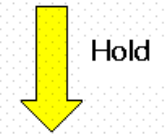
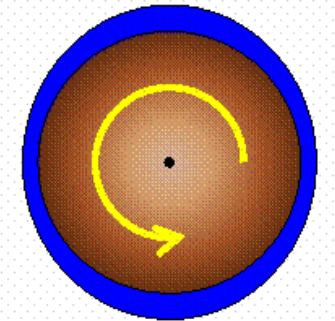
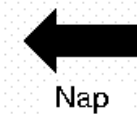
## • árapály

- amplitúdója: ~1 m az óceánon, ~20 cm a szárazföldön
- Nap és Hold együttesen határozza meg:

Szökőárapály:



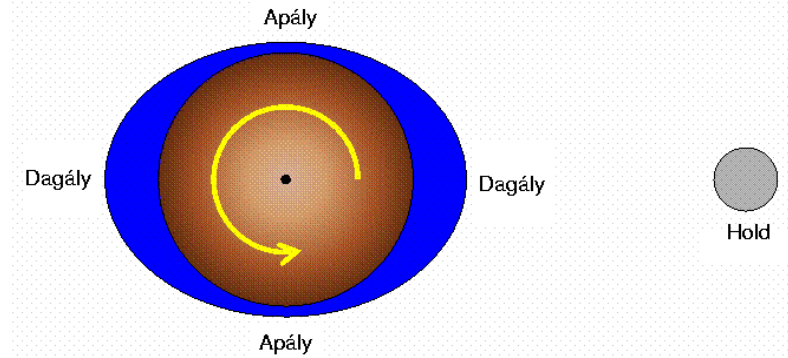
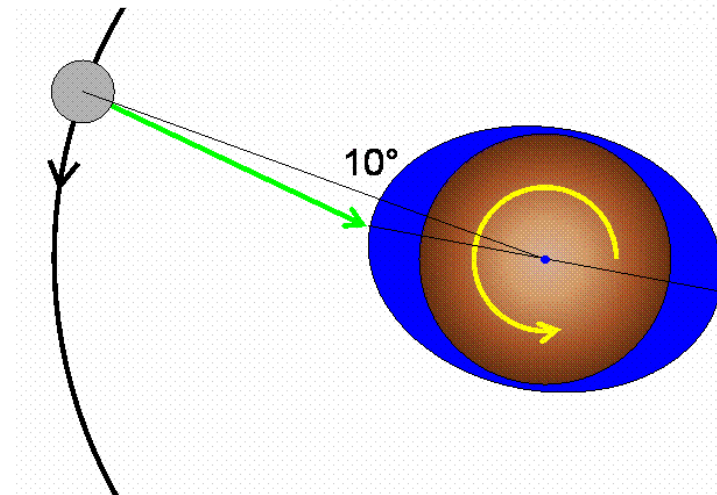
Vakárapály:



- földrajzi viszonyok miatt nagy helyi eltérések:  
pl. Nova Scotia: 15 m, Vietnamban napi 1 dagály, stb.

## • árapály-fékezés

- a Föld forgása lassul (0,0023 s/évszázad)
  - a Hold távolodik (3,8 cm/év)
- [Fordított a helyzet – a hold közeledik –, ha
- a hold a szinkronpályán belül van (Phobos)
  - vagy a hold retrográd keringésű (Triton)]



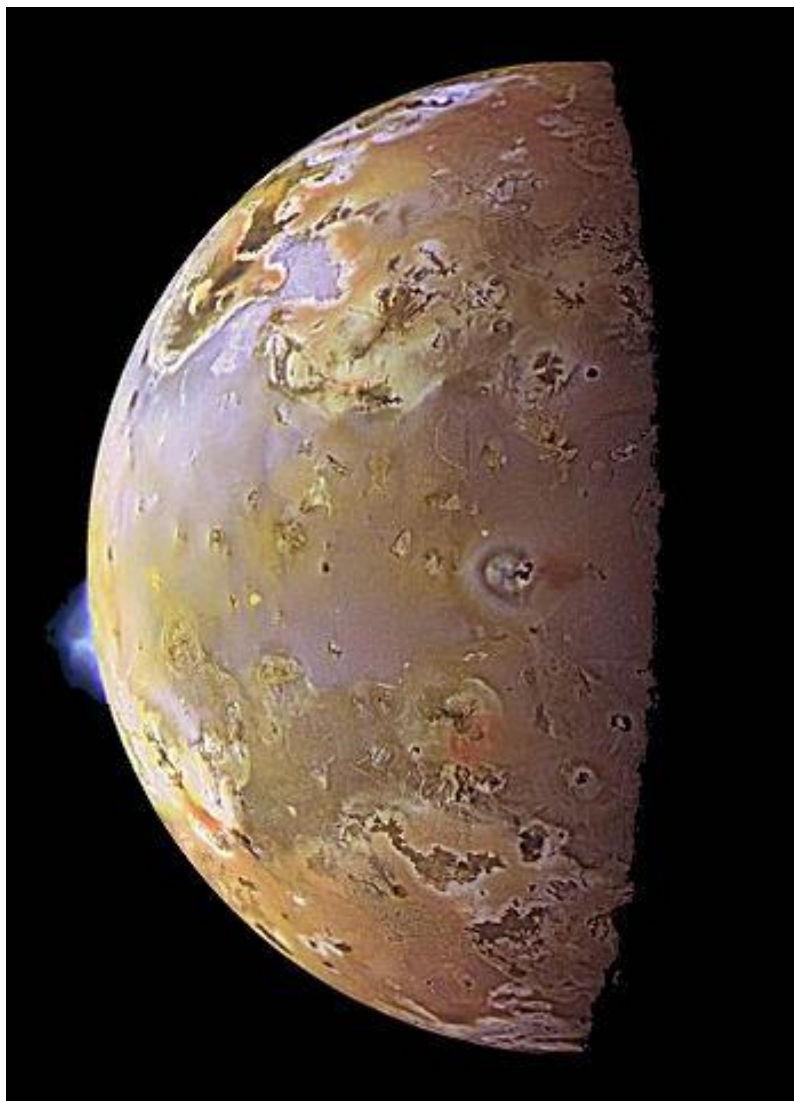
## Az árapály-erők hatásai 2.

- **rezonanciák** a forgás és a keringés között
  - 2:3 rezonancia: pl. Merkúr
  - 1:1 rezonancia: kötött (szinkron) tengelyforgás. Pl. óriásholdak (Hold), Pluto-Charon rendszer
- **árapály-fűtés**: belső súrlódás miatt
  - feltétel:  $e \neq 0$  , vagy nem kötött forgás
  - hosszú távon csak más égitestek perturbáló hatására marad fenn  
Pl. Io: keringési rezonanciák (Io-Europa 1:2, Io-Ganymedes 1:4) → vulkanizmus
- **árapály szeizmikus hatása**: az okozott feszültség rengésekhez vezet (pl. holdrengések)
- **Roche-határ**: ha  $F_t > F_g$  , az égitest szétszakad (Roche, 1847)

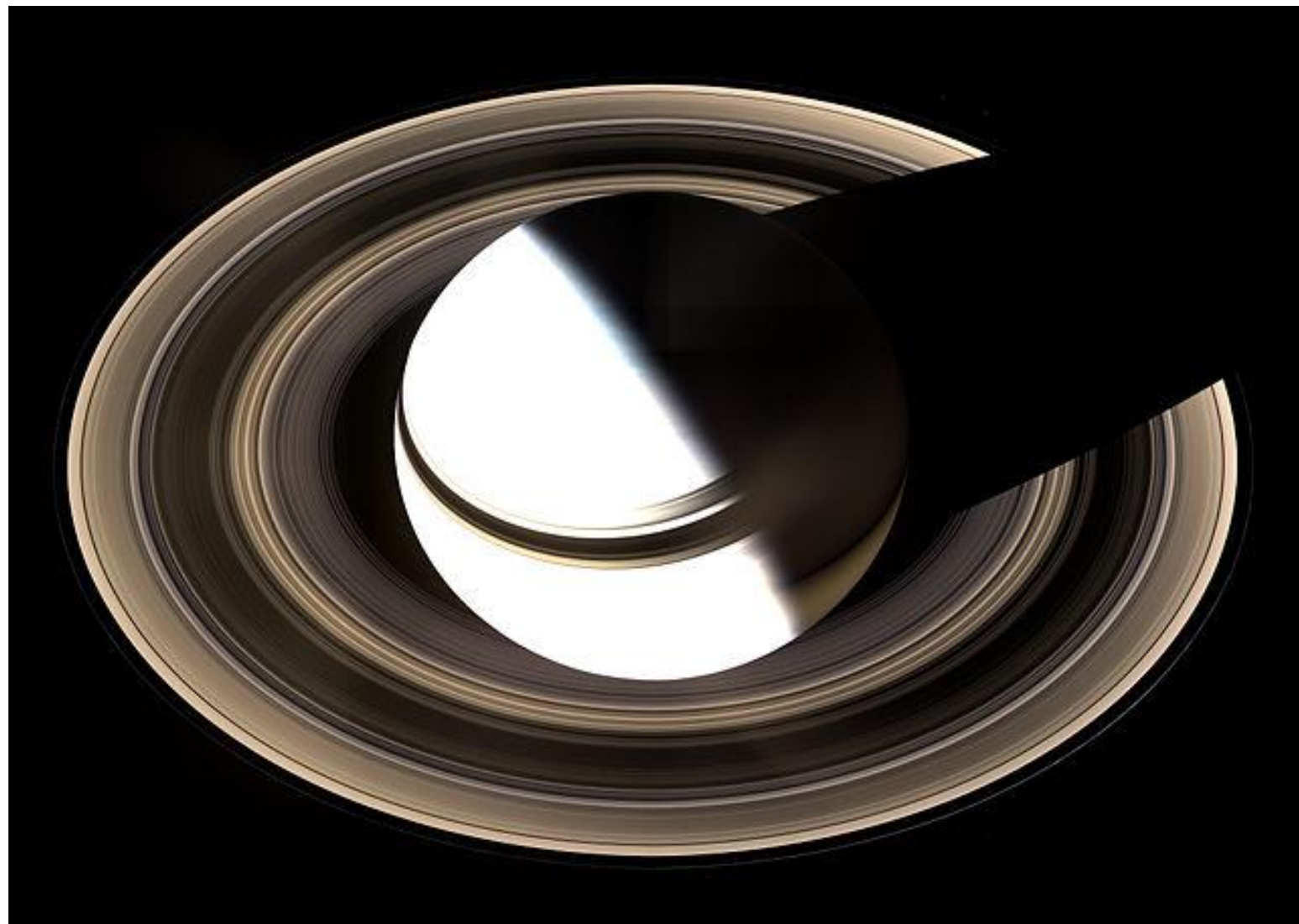
$$GMm\frac{4R}{r^3} > G\frac{m^2}{4R^2} \quad \Rightarrow \quad r_R = \left(\frac{12}{\pi}\right)^{1/3} \left(\frac{\mathcal{M}}{\rho}\right)^{1/3} \approx 2.5 \left(\frac{\mathcal{M}}{\rho}\right)^{1/3}$$

(konstans értéke kisebb:  
függ a szakítószilárdságtól is)

$r_R$ -en belülrre kerülő holdak szétesnek  
→ gyűrűk eredete



Vulkánkitörés az Io-n

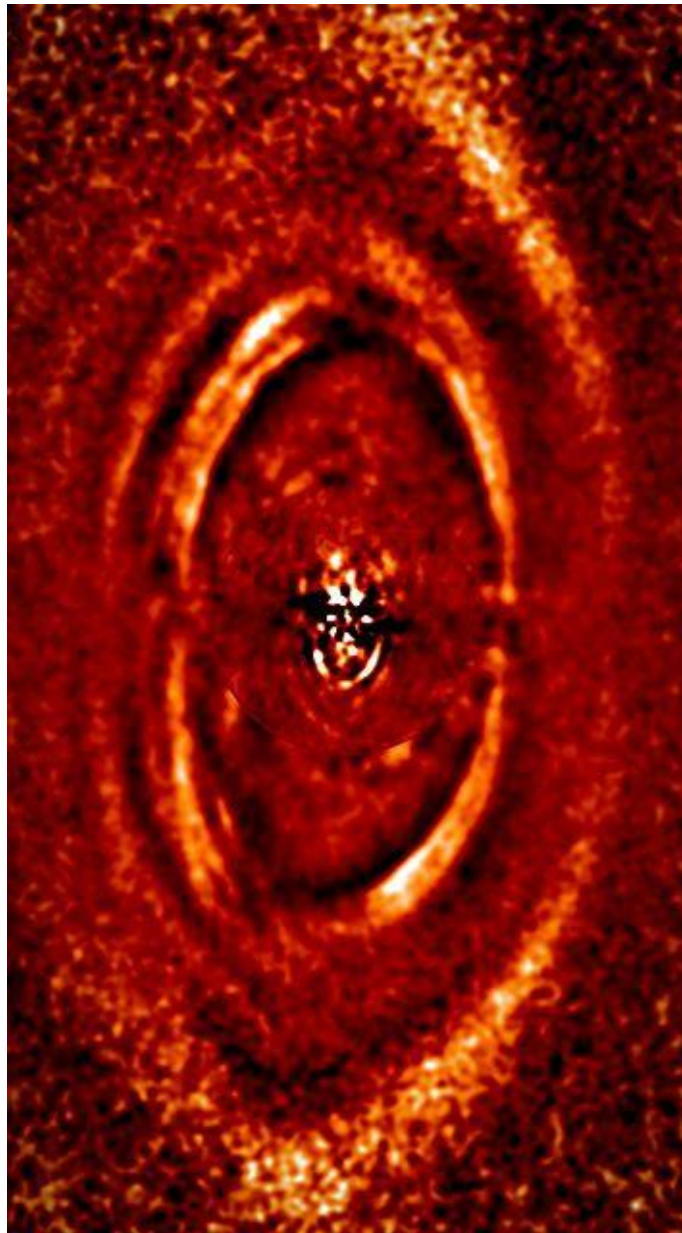


A Szaturnusz gyűrűi

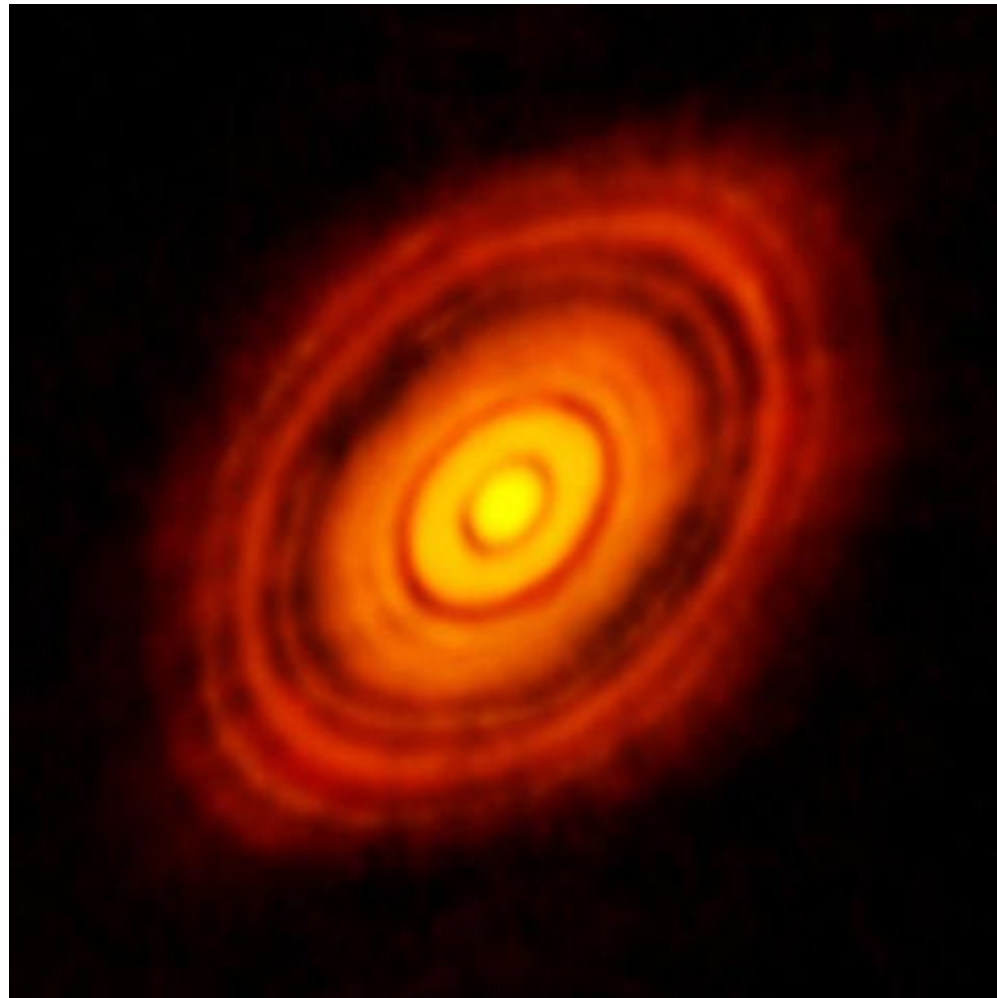
# A Naprendszer eredete

- Láttuk: a testek mozgása egy örvényszerű lapos korongot körvonalaz  
→ **nebuláris hipotézis**: a Naprendszer egy lassan forgó anyagfelhőből állt össze  
(Kant, Laplace, 18. sz.)
- 20. sz. elején alternatív elméletek:
  - katasztrófa-elmélet: egy másik csillag ütközött (vagy majdnem) a Nappal → kiszakadó anyag
  - befogási elmélet: a Nap a csillagközi anyag befogásával hozta létre a bolygókat
- Érvék a nebuláris elmélet mellett:
  - a Naprendszer kémiai összetétele ezt támasztja alá (lásd: kondenzációs sorozat)
  - 80-as évek óta: fiatal csillagok körül hideg por- és gázkorongok megfigyelése
  - 90-es évek óta: egyre több exobolygó → teljesen általános jelenség  
(a többi alternatíva alapján ritkán várunk bolygórendszereket)
- A Naprendszer **kora**: 4,57 milliárd év
  - ennyi a legidősebb meteorit-zárványok kora → ekkor kezdett megszilárdulni az anyag
  - a legősibb holdkőzetek 4,5 milliárd évesek
  - a legősibb földi kőzetek 4,3 milliárd évesek (Ausztrália)





HD 141569A (370 f.é.)



HL Tauri (450 f.é.)

## Proplidok



Az Orion-ködben (1500 f.é.)

# A Naprendszer létrejötte

- molekulafelhő: ~60 f.é. átmérő, ~3000  $M_{\odot}$  → összeomlik kisebb (pár f.é.) felhőkre →
- intenzív csillagkeletkezési terület (mint az Orion-felhő): szupernóvák, lökéshullámok, stb. →
- belül besűrűsödik és felforrósodik (protocsillag) → beindul a fúzió: egyensúly (Nap)
- kívül a felhő felpörög, lelapul: **protoplanetáris korong** v. proplid → két elmélet:
  - forró v. kollapszusos: gravitációs összehúzódás → nagy testeket hoz létre gyorsan
  - hideg v. összeállásos: ütköző kis testecskék összetapadnak → kisebb testek lassan → ma ez utóbbi elfogadott (a másikkal vegyítve az óriásbolygók esetén)
    - belső n.r.: nehezebb elemek, magas olvadáspont → kőzetbolygók csírái
    - külső n.r.: könnyebb és gyakoribb elemek + megmaradnak a jegek → óriásbolygók magjai
- a kezdeti erős napszél lassan kifújja a korong anyagát (max. 10 millió év)
- a „planetáris embriók” ütközésekkel összeállnak (max. 100 M.év)
- a bolygók még migrálnak egy ideig: Uránusz, Neptunusz jóval beljebb jött létre → távolodott; Jupiter: befelé mozgott

# Vegyí differenciálódás a Naprendszerben

- Differenciálódás: anyagok elkülönülése olvadáspont/forráspont és sűrűség szerint
- Bolygókra: pl. Föld → vasmag + szilikát köpeny és kéreg (ahol alul bazalt, felül gránit)
- Naprendszer egészére:

Kondenzációs hőmérséklet [K]	Főbb ásványcsoportok	Melyik égitestnél állt meg itt a kondenzáció?
1500	Ca, Al, Ti oxidjai	ősi zárványok meteoritokban (CAI)
1400	vas, nikkelt	Merkur
1300	szilikátok	Vénusz, Föld
700	vas oxidálódik, szulfidálódik	Mars
600	szén, szénvegyületek	aszteroida-öv
200	vízjég	Jupiter, Szaturnusz
100	ammónia- és metánjég	Uránusz, Neptunusz, Kuiper-öv

A fiatal, forró Nap hője az alacsonyabb forráspontú anyagokat a belsőbb régiókból elpárologtatta, valamint a napszél kifelé söpörte a könnyebb anyagokat.

„hóhatár”

→ a földi víz kívülről jött (üstökösök)