



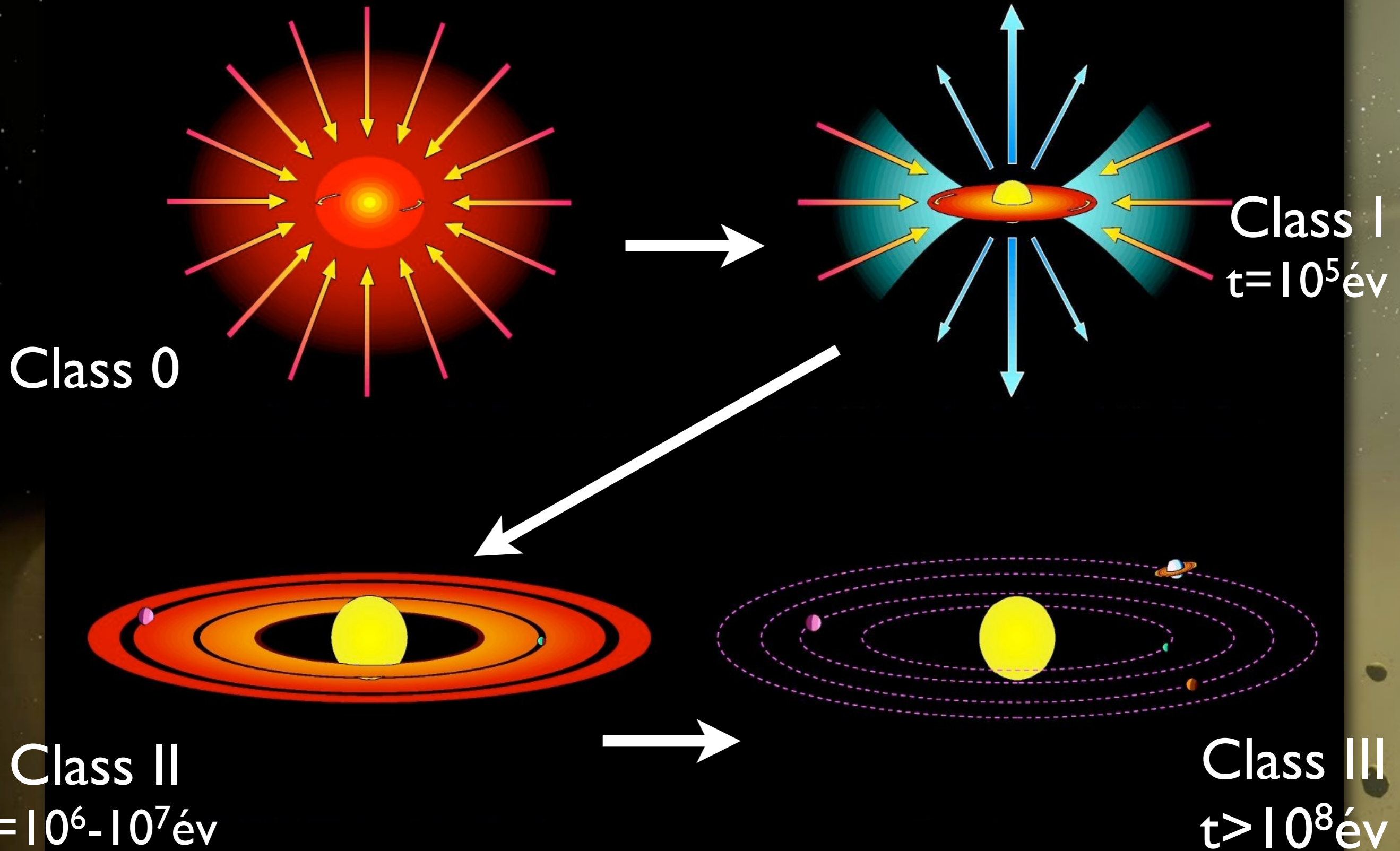
TNOs are Cool!
avagy
A külső Naprendszer a
Herschel űrtávcső után

Kiss Csaba

MTA CSFK, Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézet

FIKUT, 2014. szeptember 17-19.

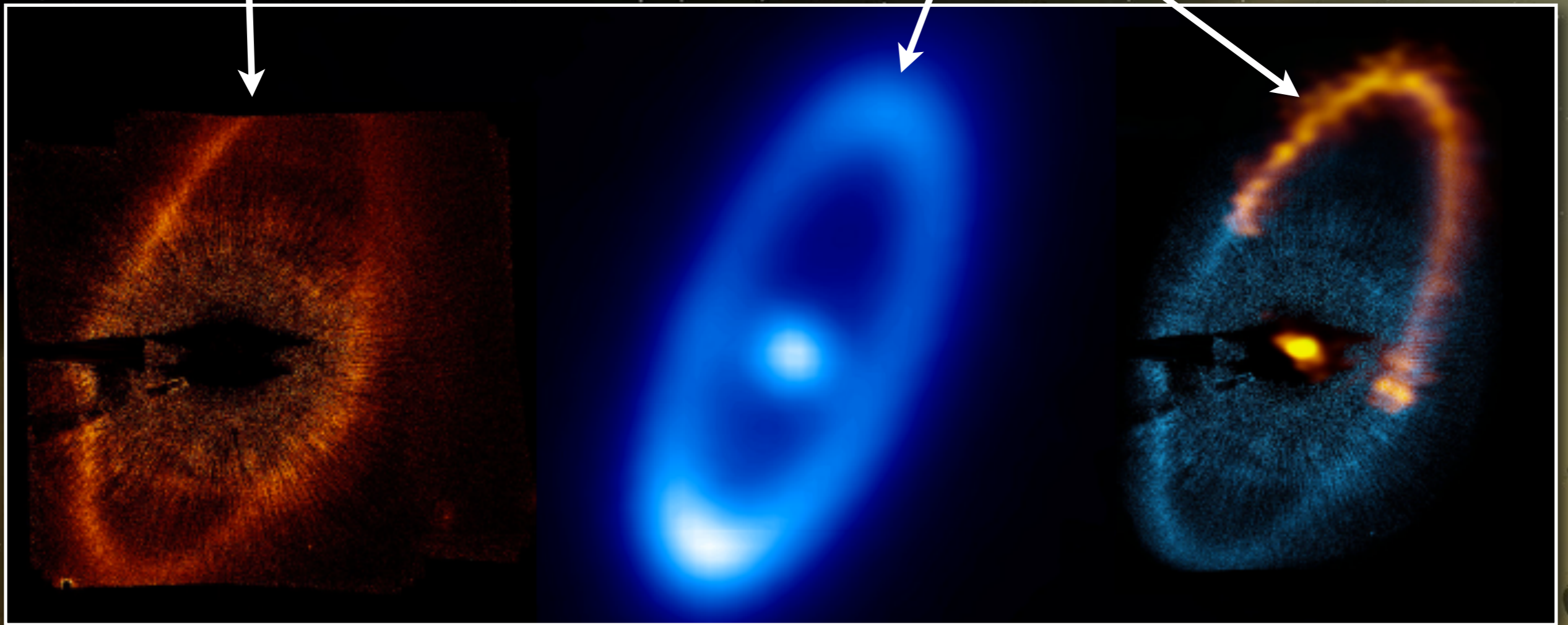
Csillagkörüli anyag fejlődése



Törmelékkorongok

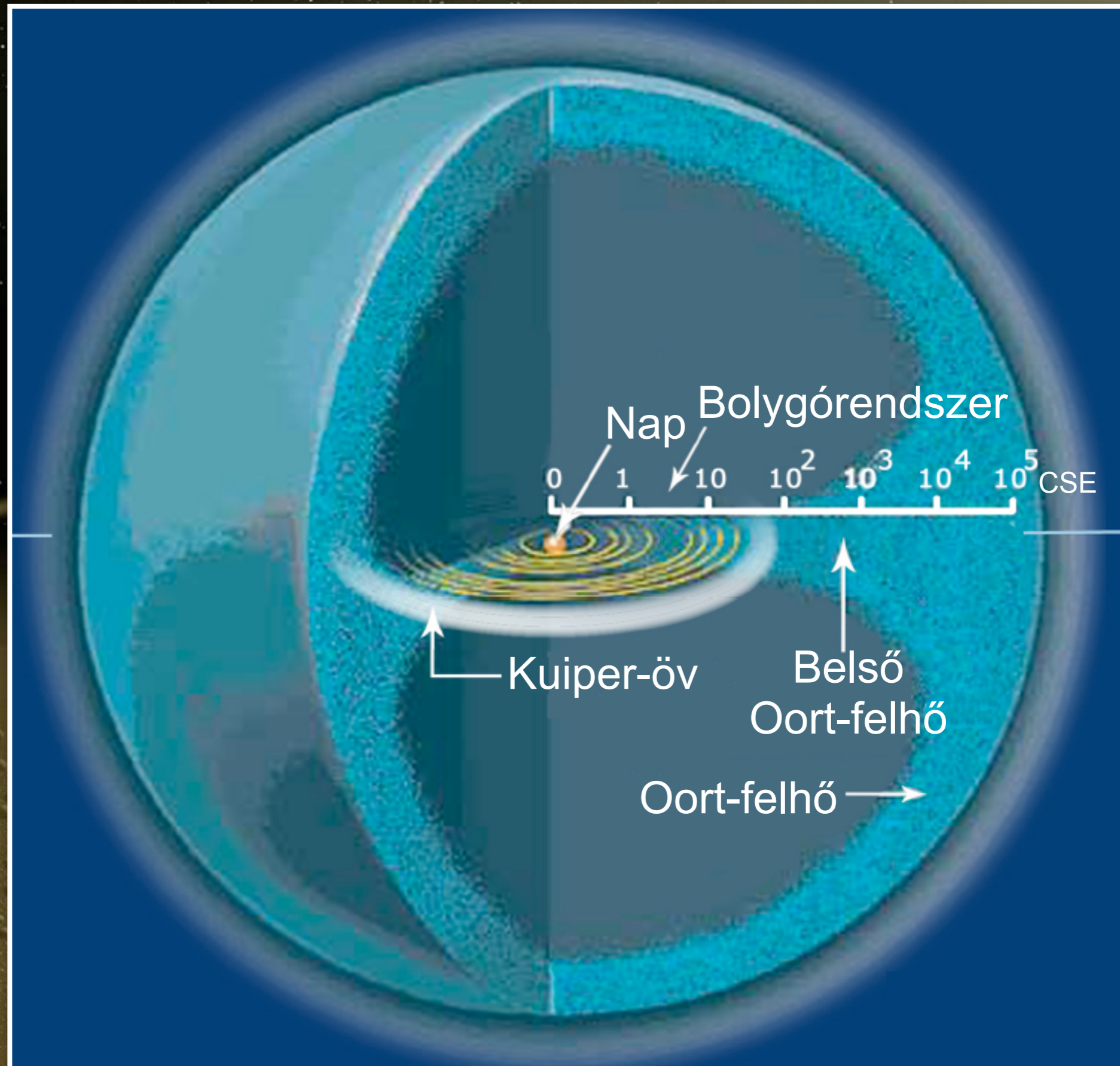
szórt fény

hőmérsékleti sugárzás

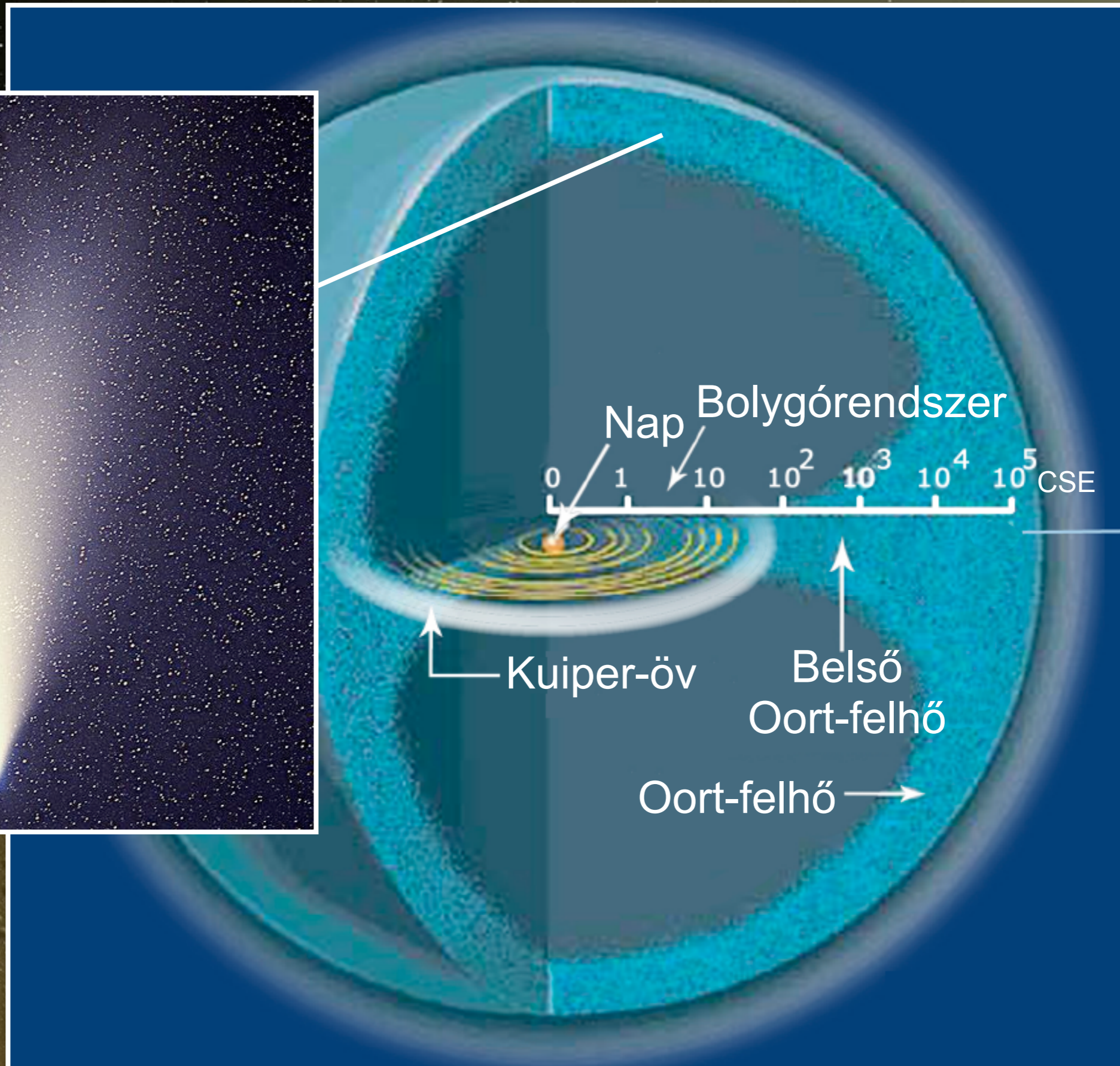


A Fomalhaut törmelékkorongja 0,7 (Hubble), 70 (Herschel) és 850um-en (ALMA)

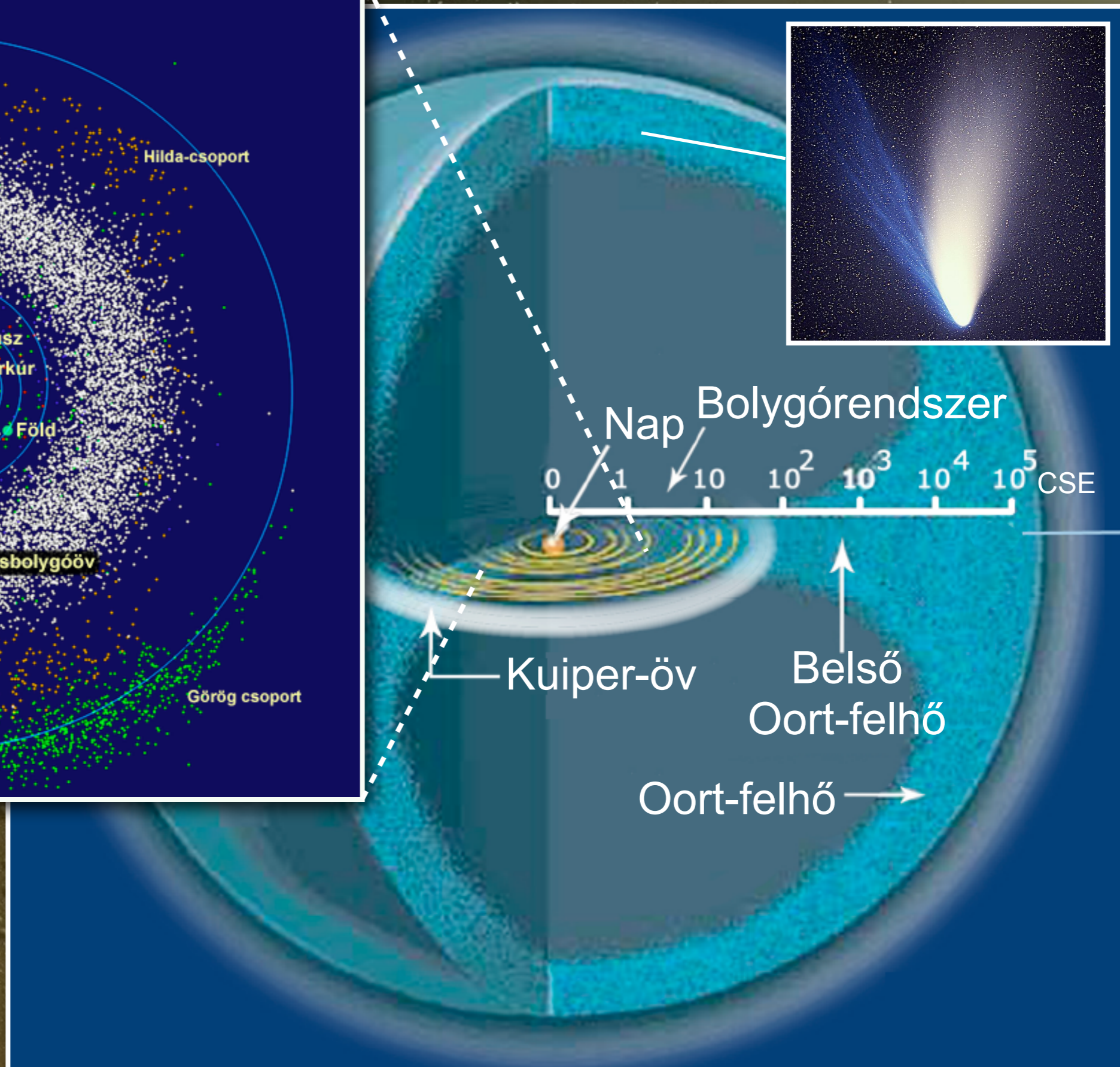
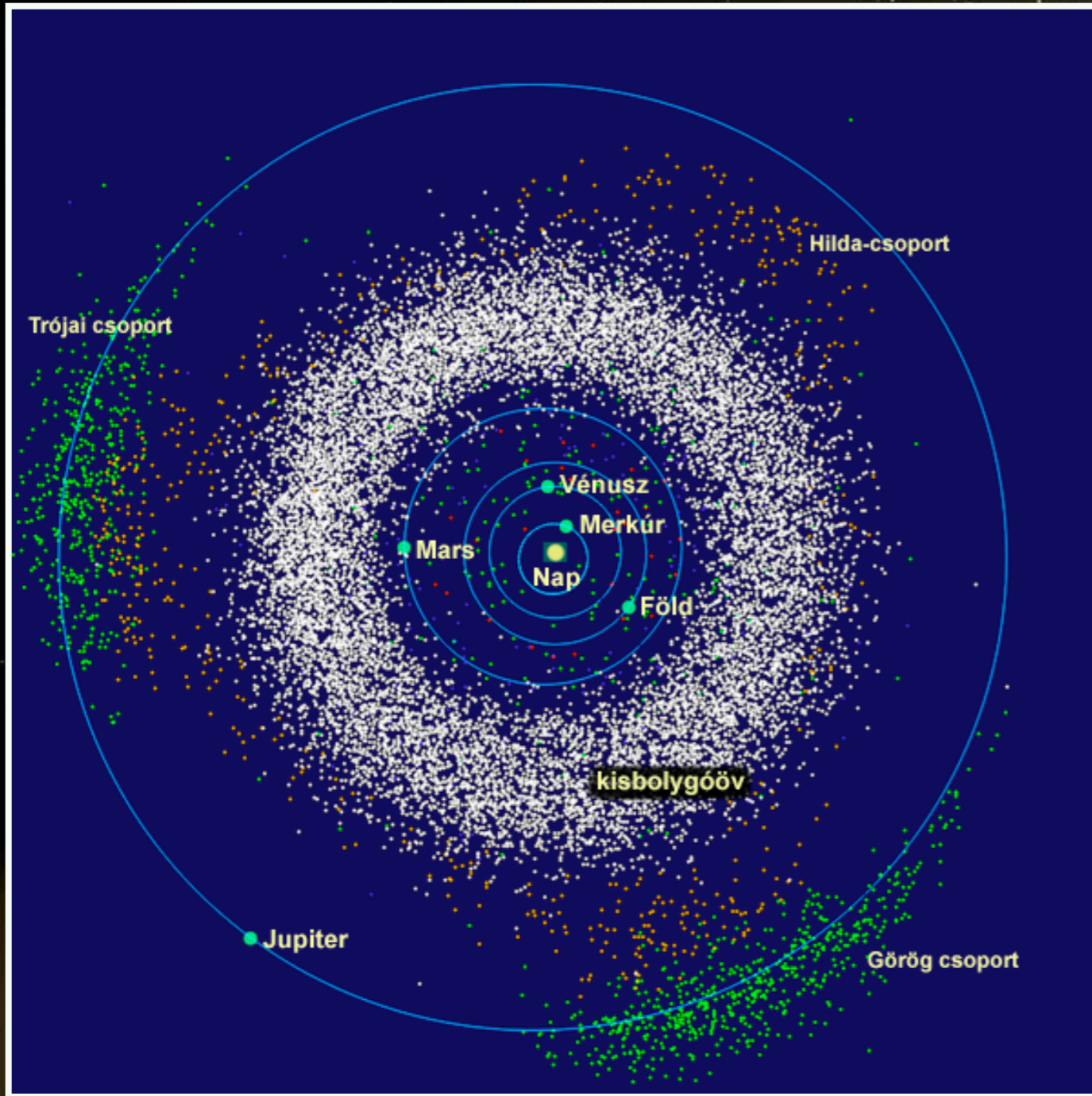
A Naprendszer törmelékkorongjának szerkezete



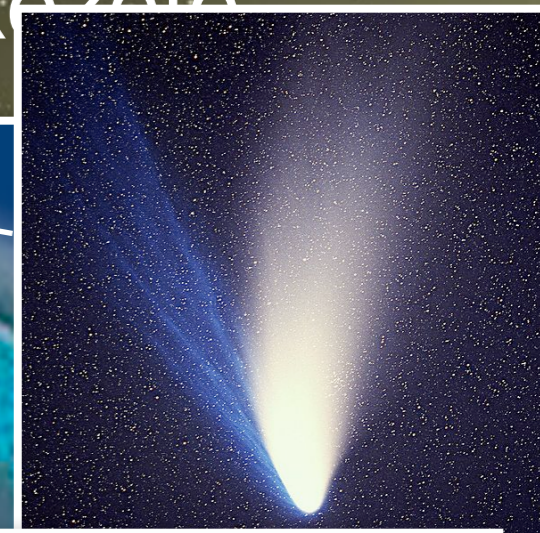
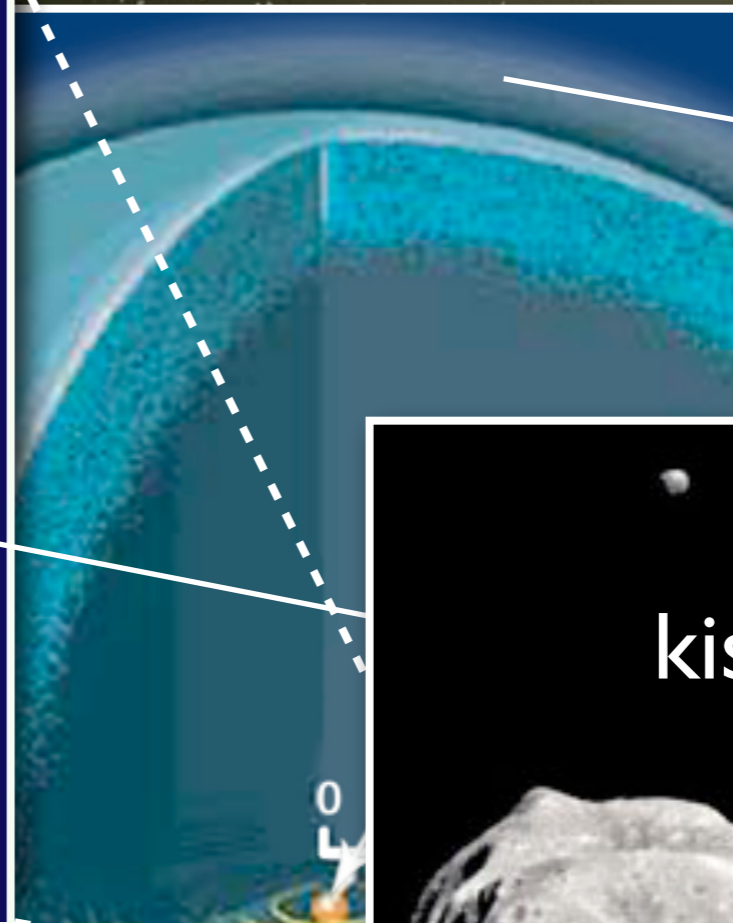
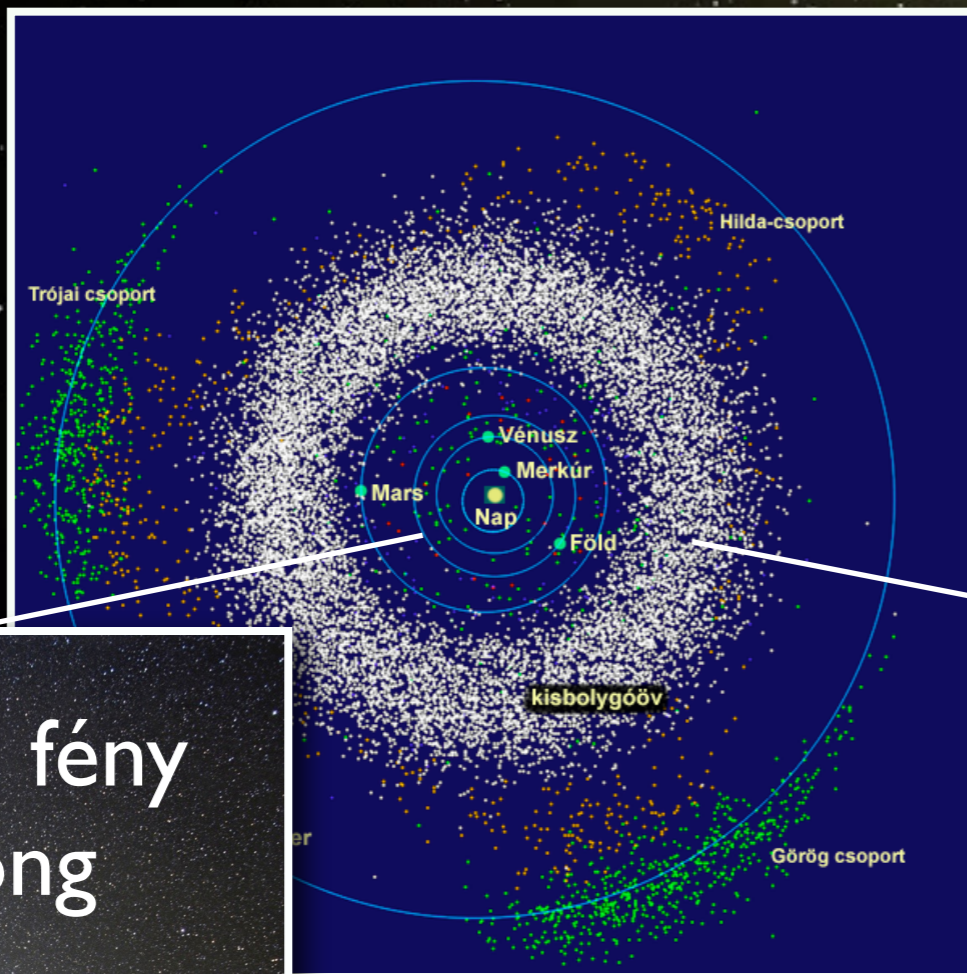
A Naprendszer törmelékkorongjának szerkezete



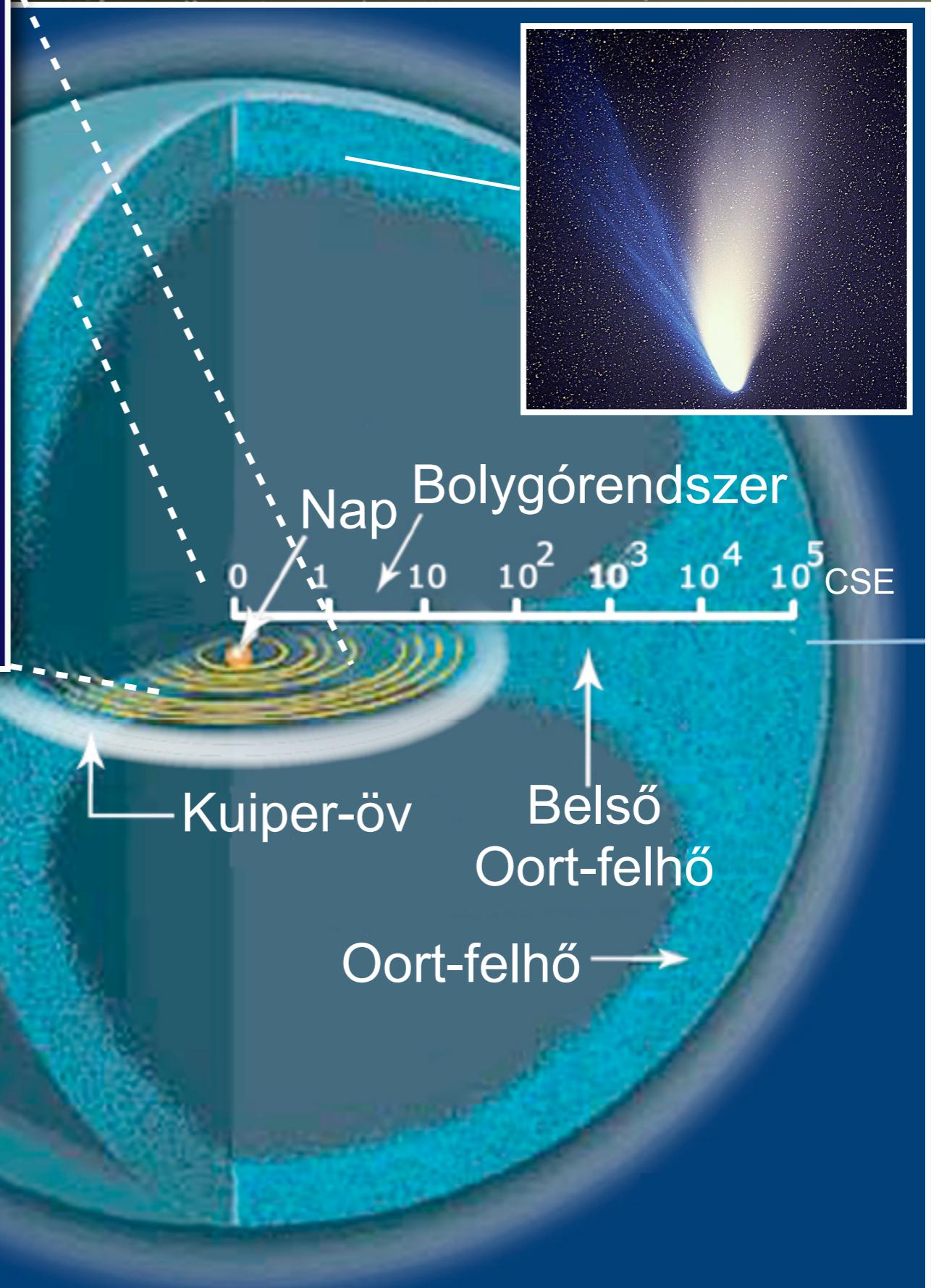
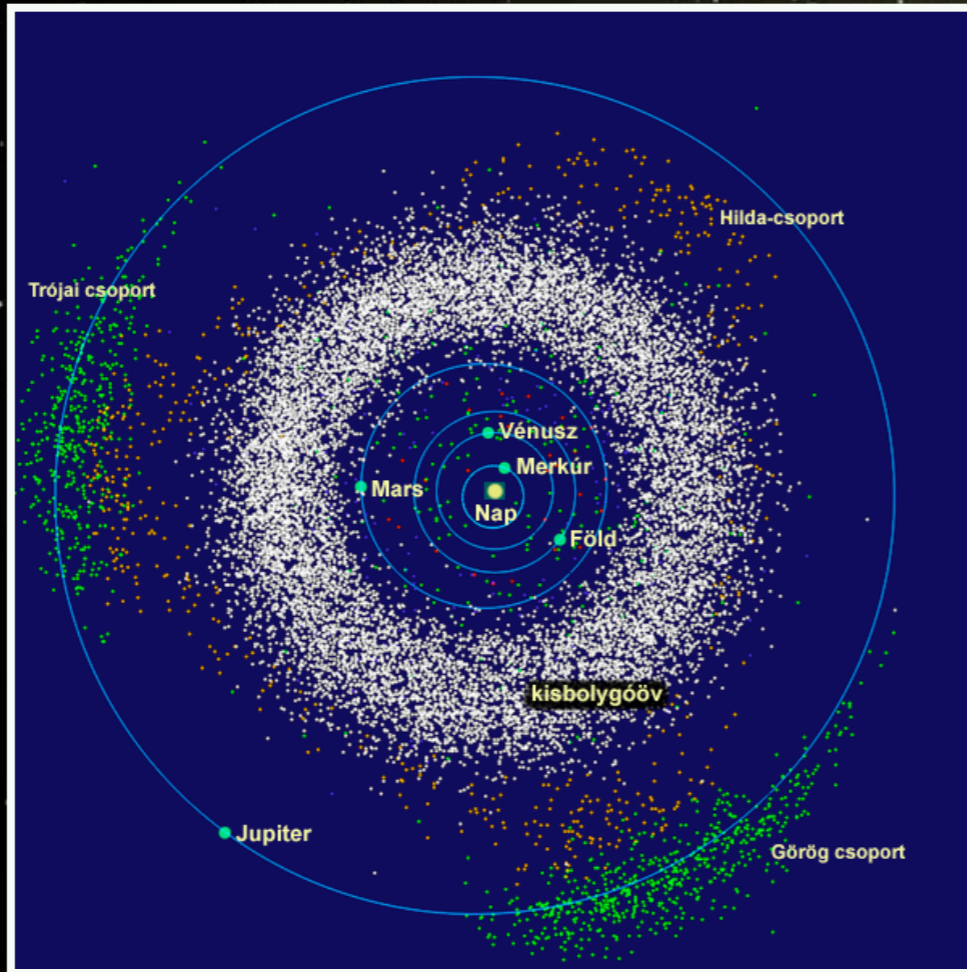
A Naprendszer törmelékkorongjának szerkezete



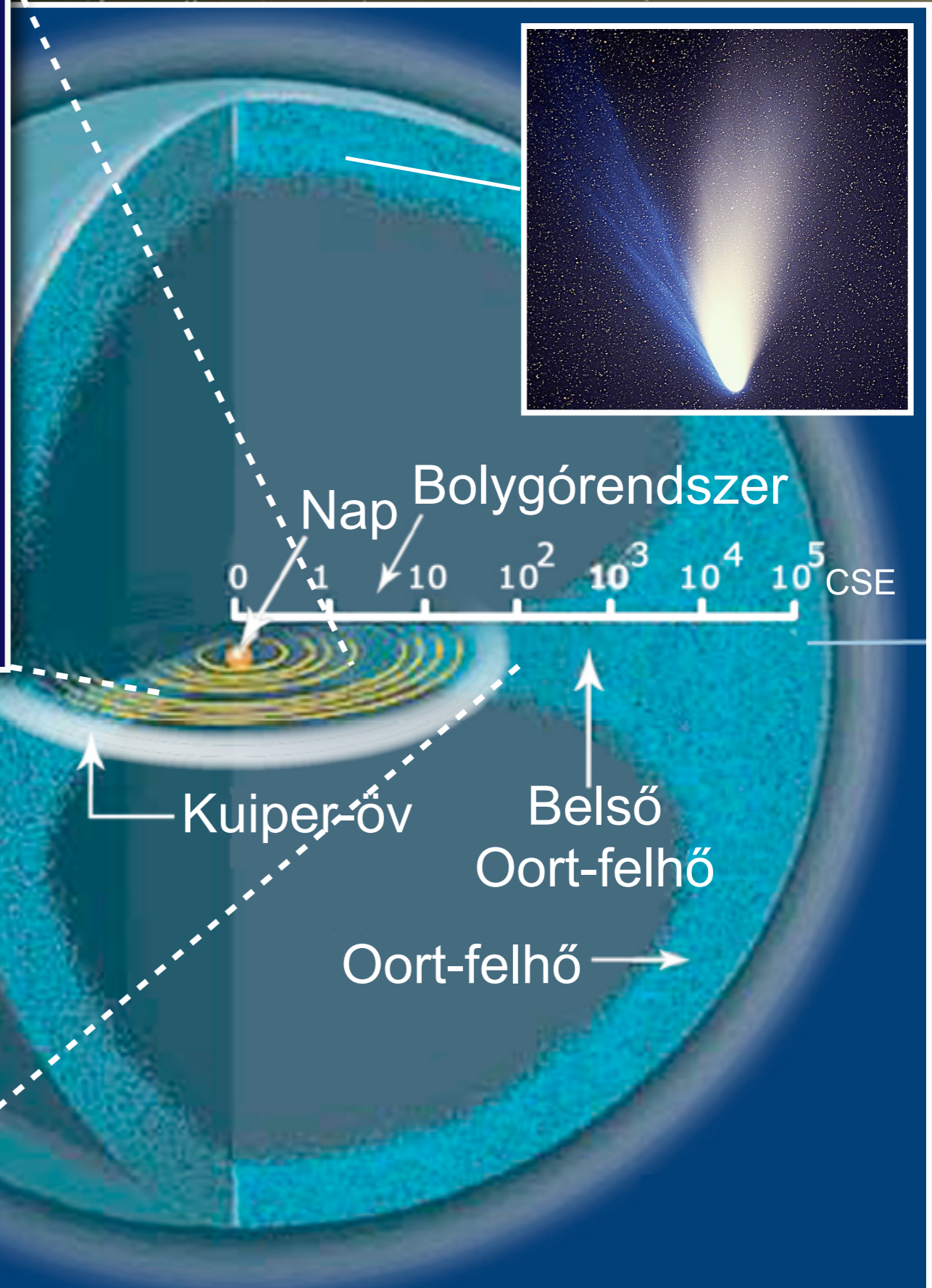
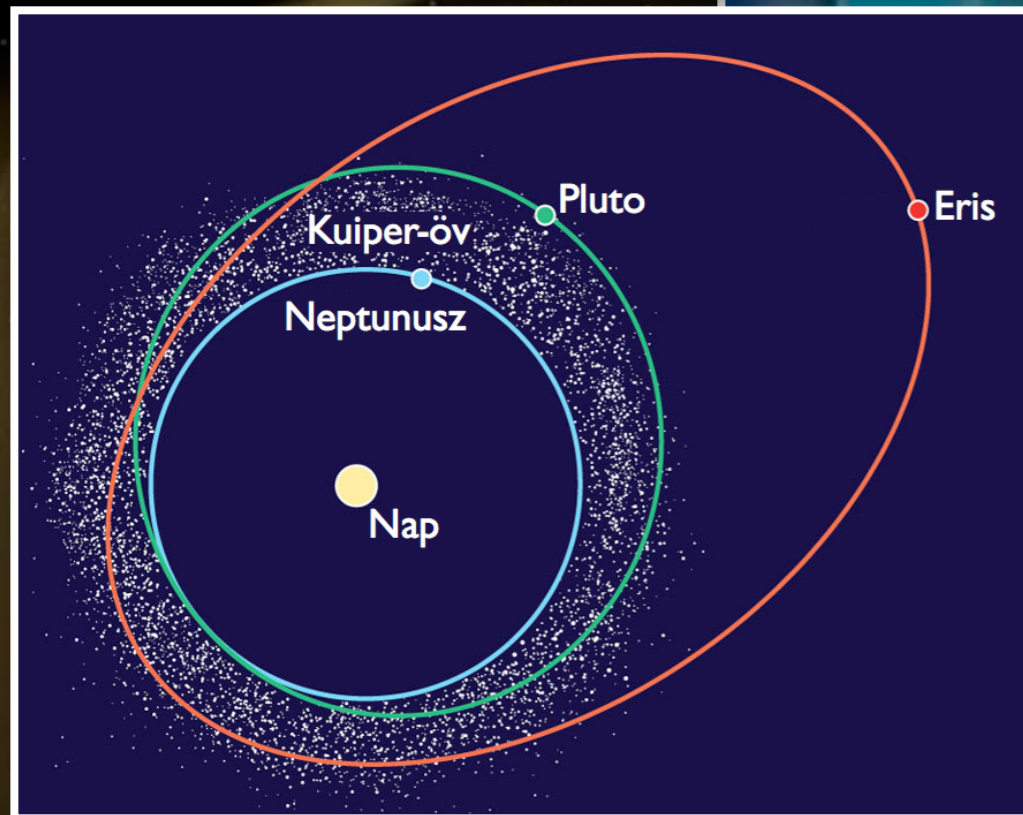
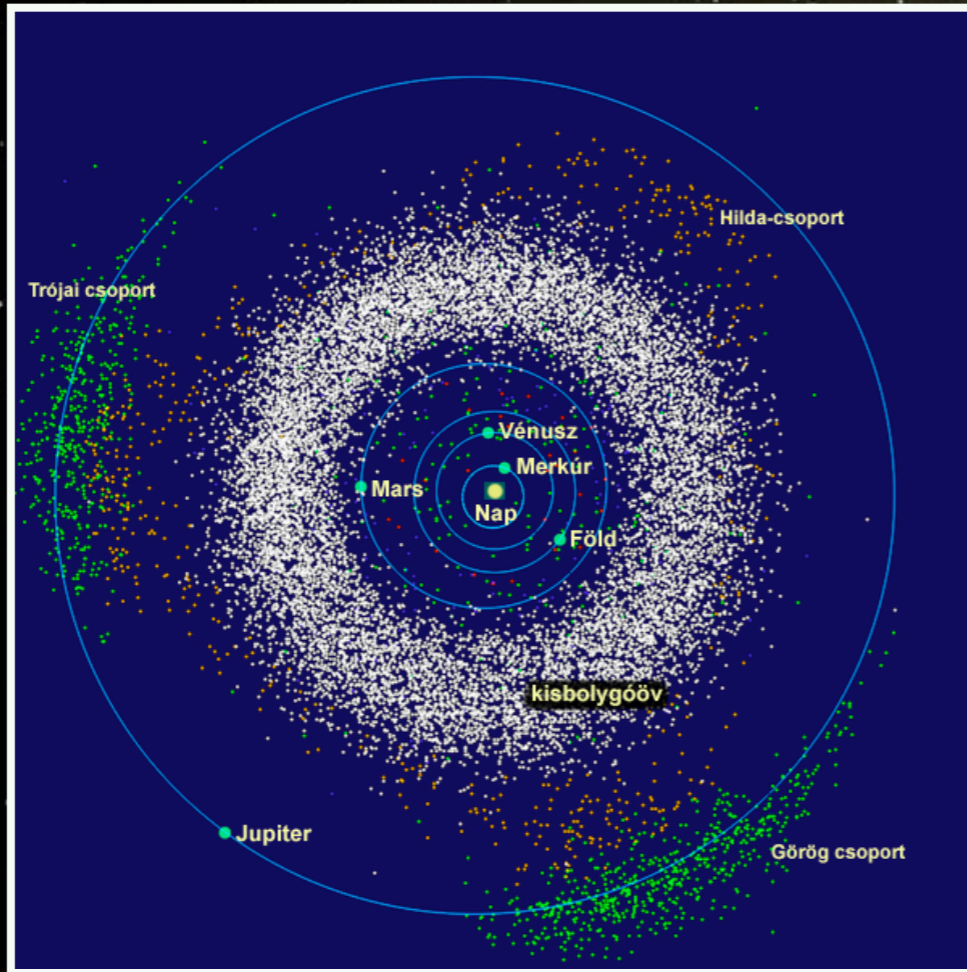
A Naprendszer törmelékkorongjának szerkezete



A Naprendszer törmelékkorongjának szerkezete



A Naprendszer törmelékkorongjának szerkezete

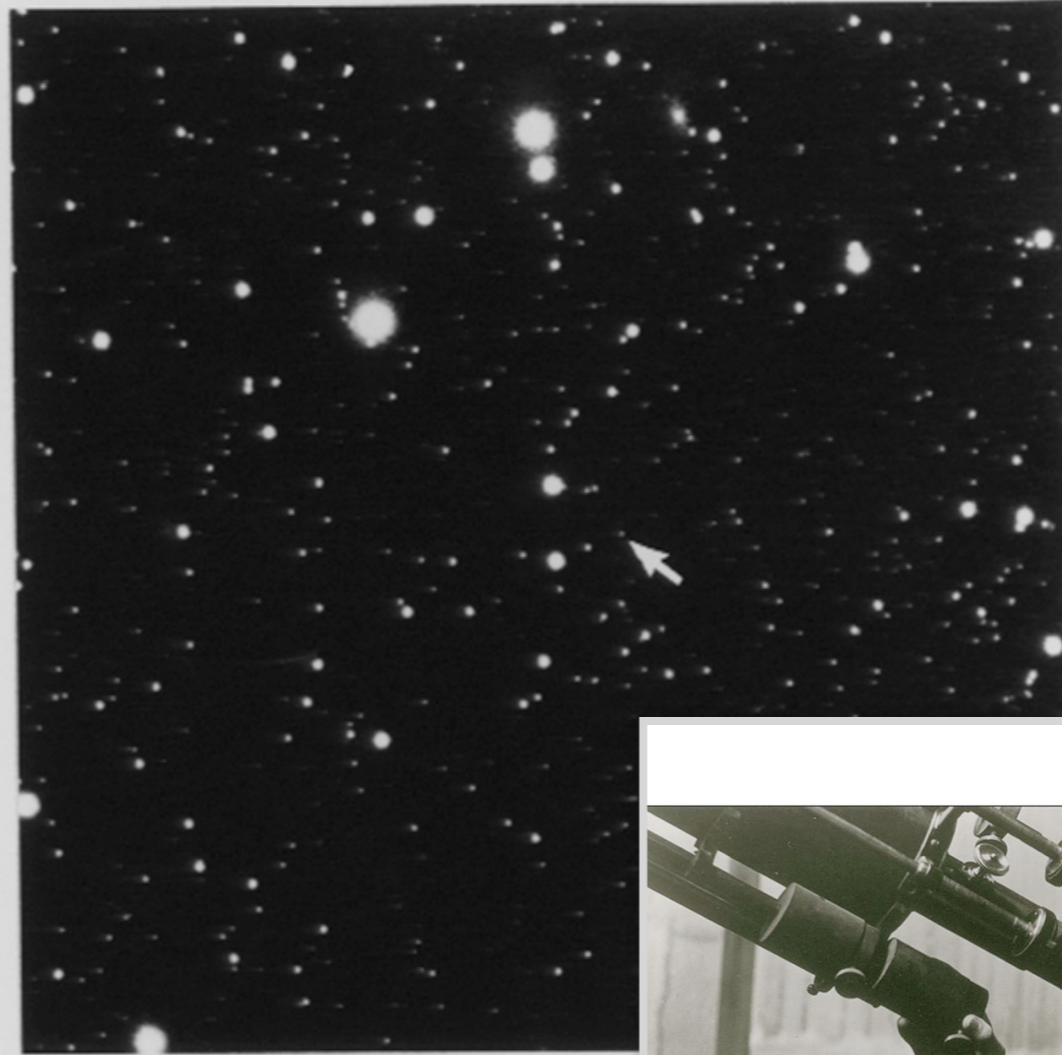


Az első Kuiper-öv égitest: Pluto

DISCOVERY OF THE PLANET PLUTO



January 23, 1930

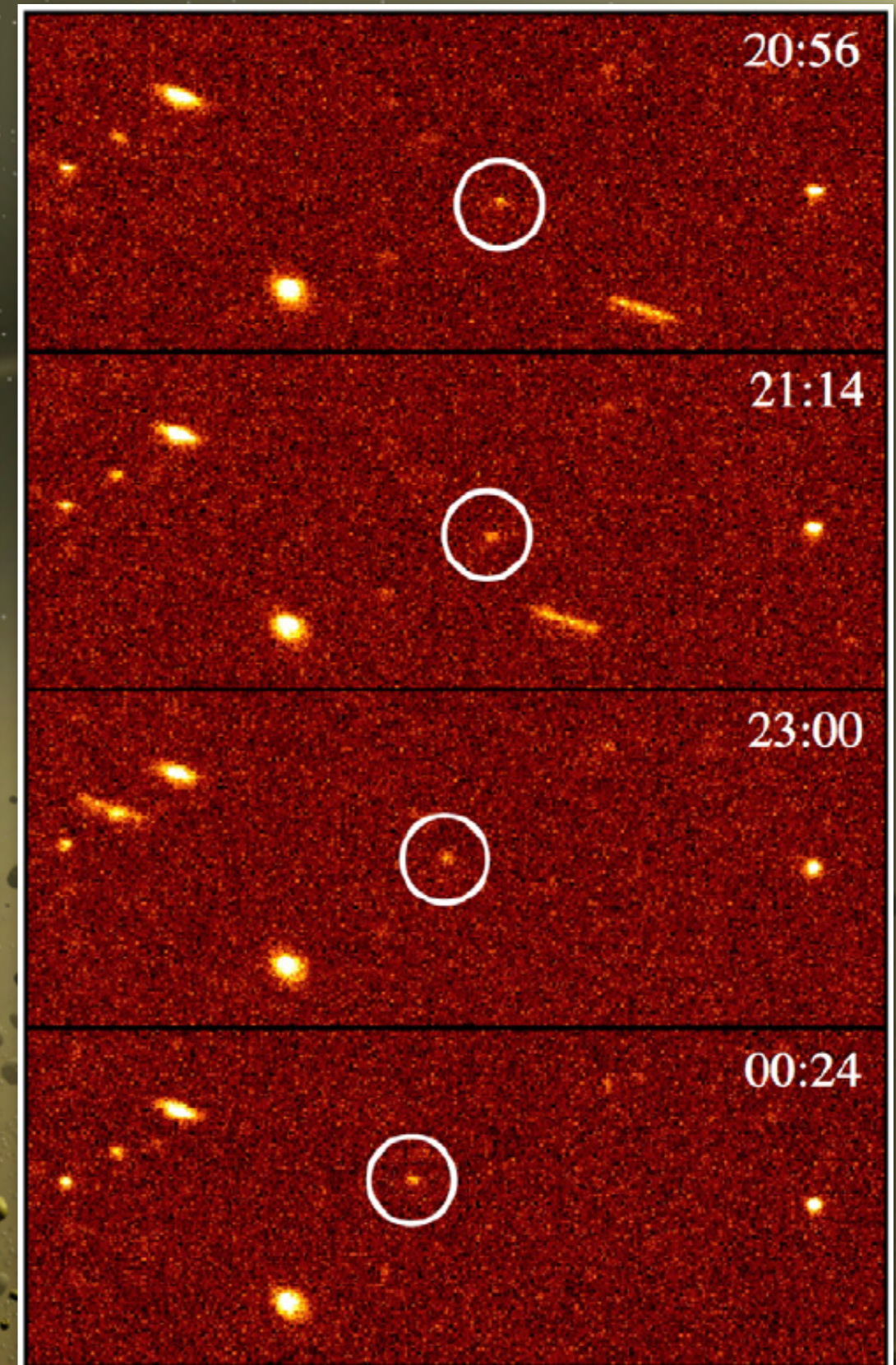
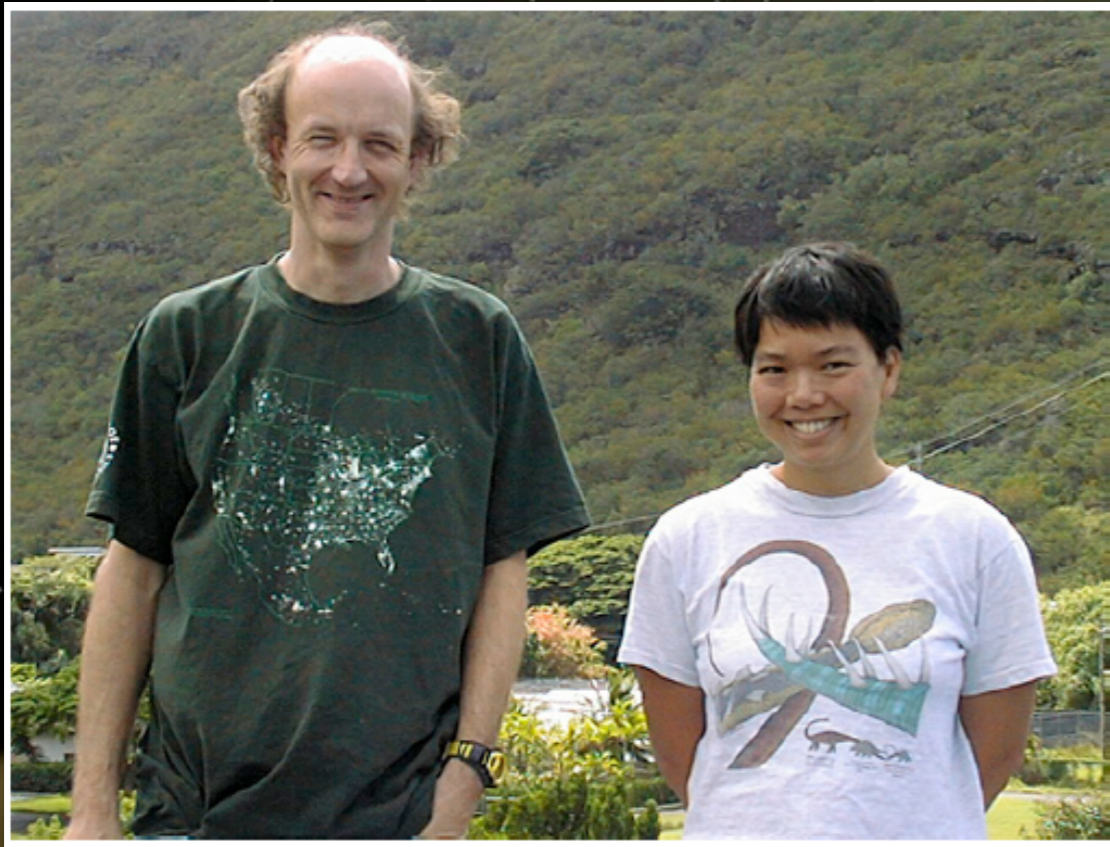


January 29,

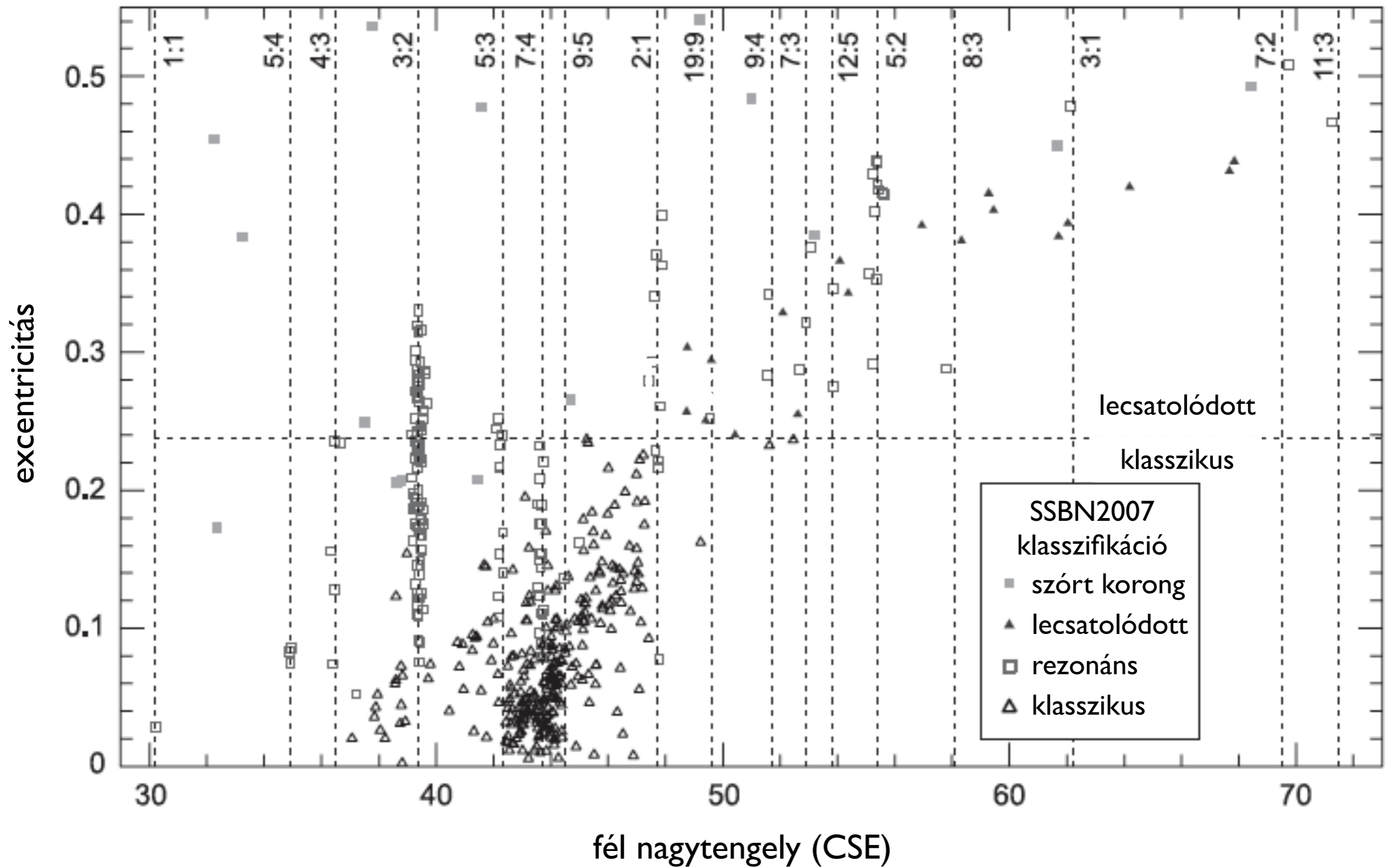


*I discovered Pluto on 18 Feb. 1930
Clyde W. Tombaugh*

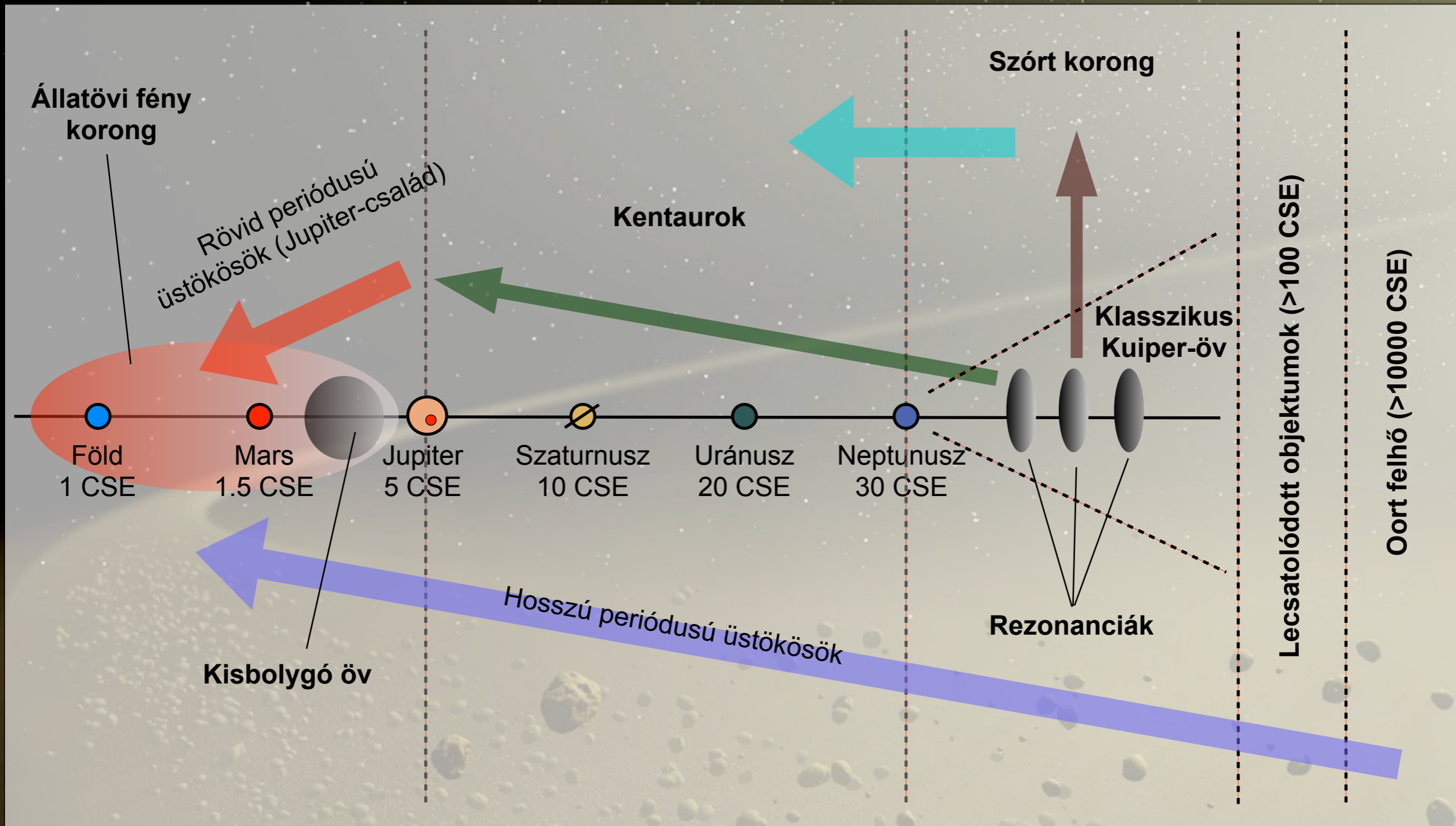
Az első "modern" felfedezés: 1992 QB₁



A Kuiper-öv dinamikai szerkezete



A Naprendszer törmelékkegongjának szerkezete



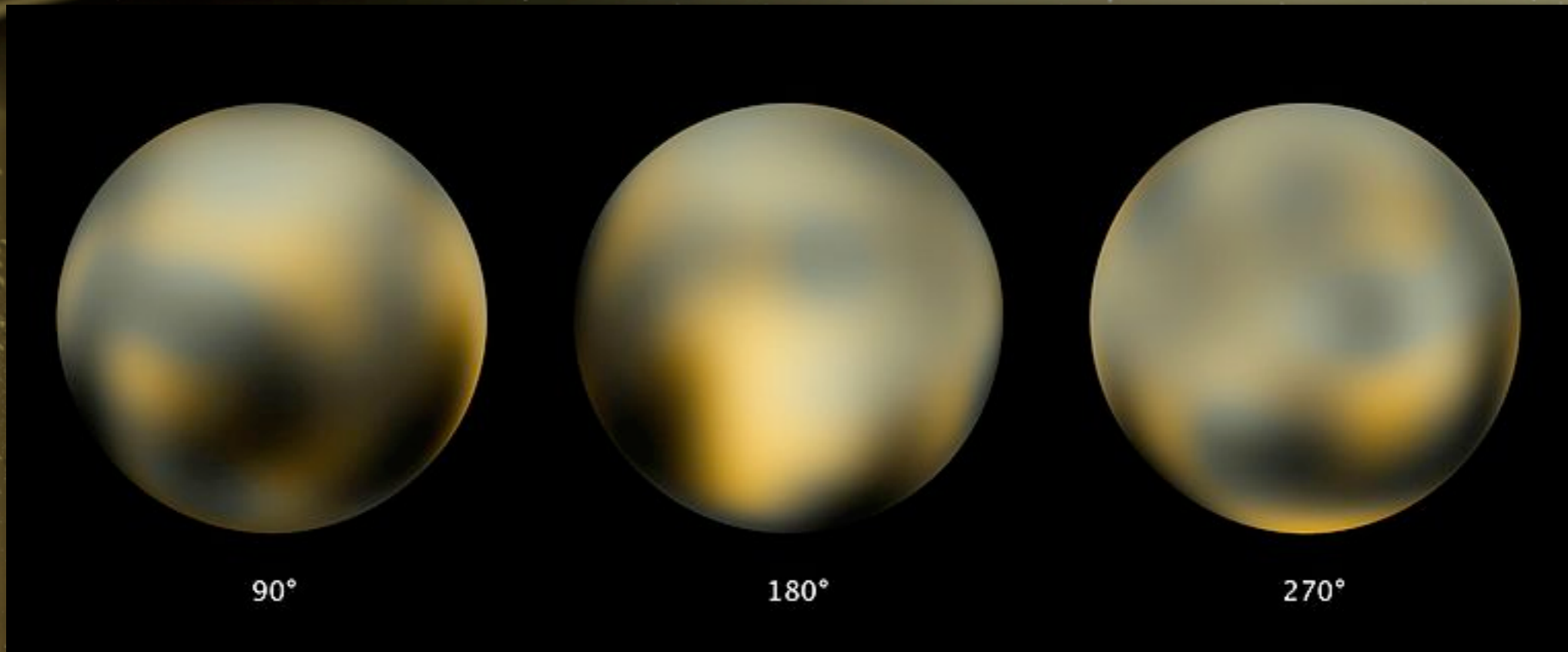
Távoli égitestek...

$$D^2 \cdot p_V = 4a^2 \cdot 10^{0.4(m_{\odot} - H_V)}$$

- Pontszerűnek látszanak... de mekkorák valójában? (kb. 5x-ös bizonytalanság a méretben)
- Nagy és sötét vagy kicsi és világos? -- A látható tartománybeli mérések nem mondanak sokat az égitestek fizikai tulajdonságairól
- Pedig a méret/albedo nagyon fontos!
 - A méreteloszlás a törmelékkorongok fejlődésének egyik legfontosabb jellemzője
 - Égitest sűrűsége, belső szerkezete -- keletkezési körülmények
 - Gravitáció, felszíni folyamatok értelmezése
 - Felszíni összetétel, illó anyagok

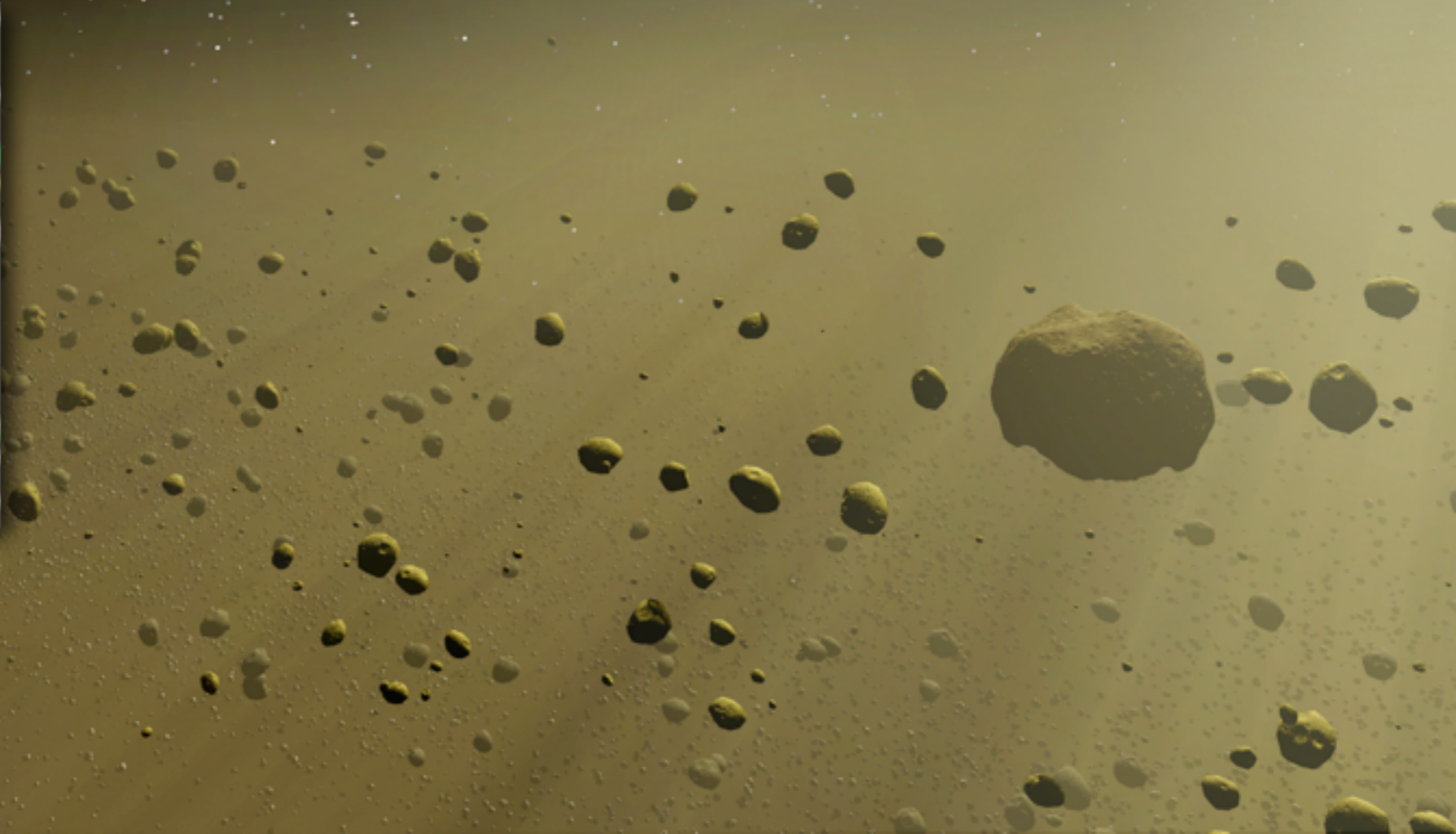
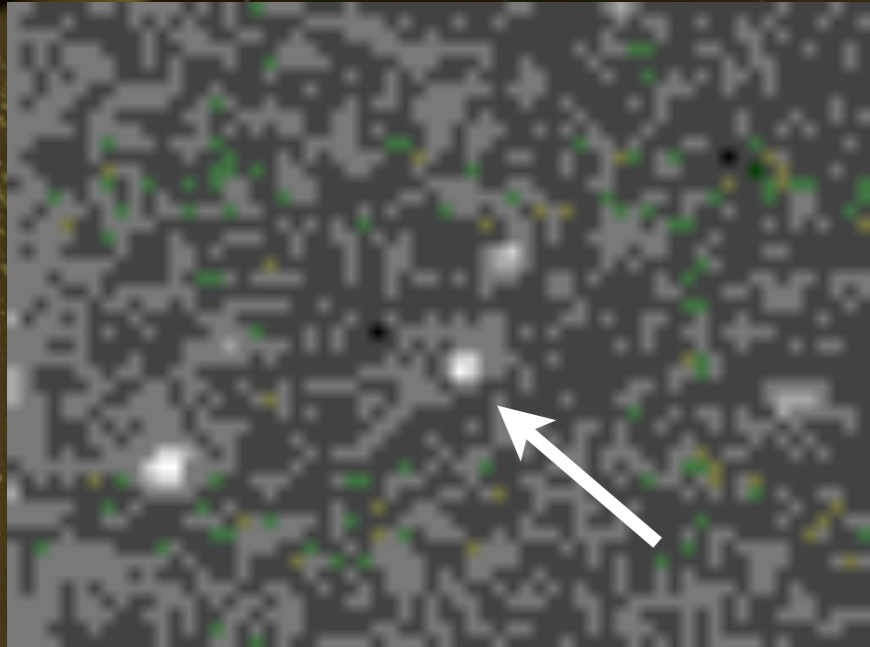
Távoli égitestek...

- Honnan tudhatjuk, hogy mekkorák?
 - **Direkt mérések** -- csak a legnagyobbakra működik (Pluto)
 - Csillagfedések
 - Radiometriai módszer (hőmérsékleti sugárzás)



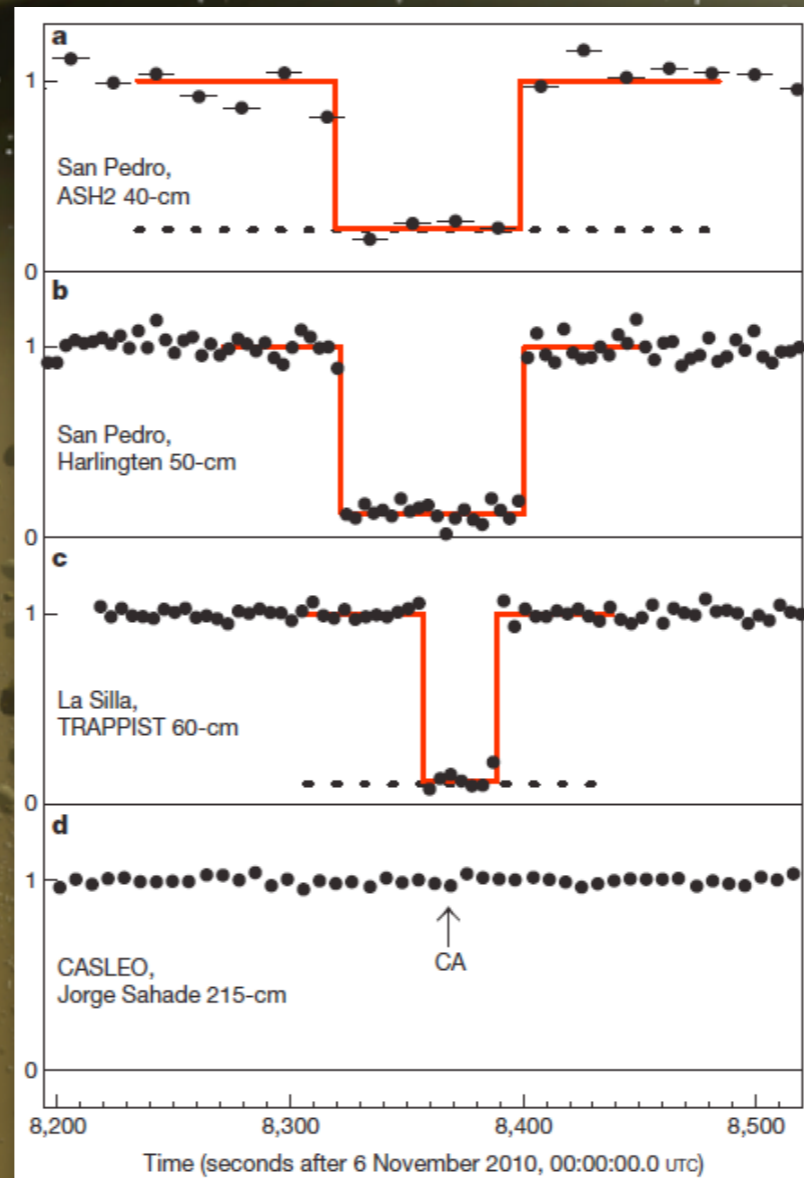
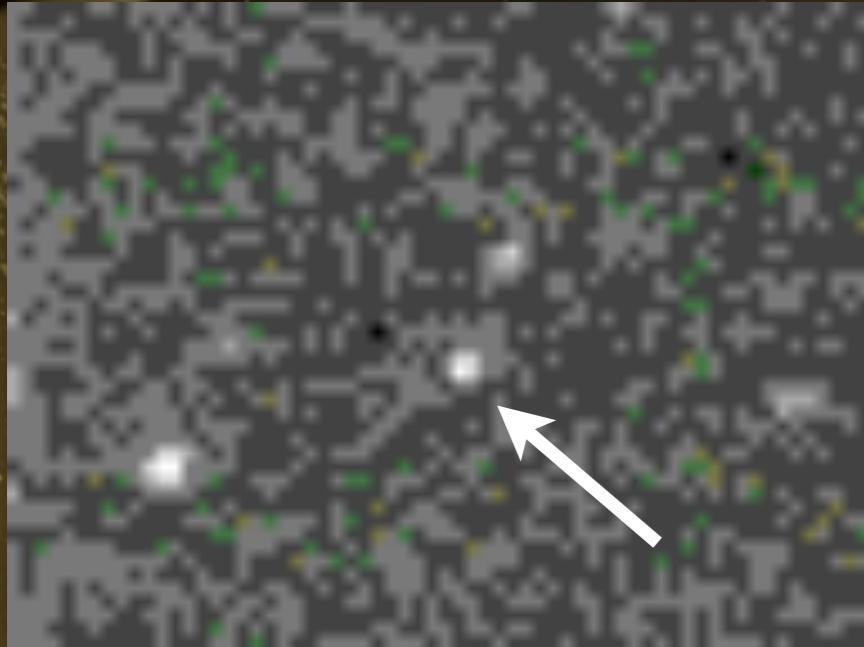
Távoli égitestek...

- Honnan tudhatjuk, hogy mekkorák?
 - Direkt mérések -- csak a legnagyobbakra működik (Pluto)
 - Csillagfedések
 - Radiometriai módszer (hőmérsékleti sugárzás)



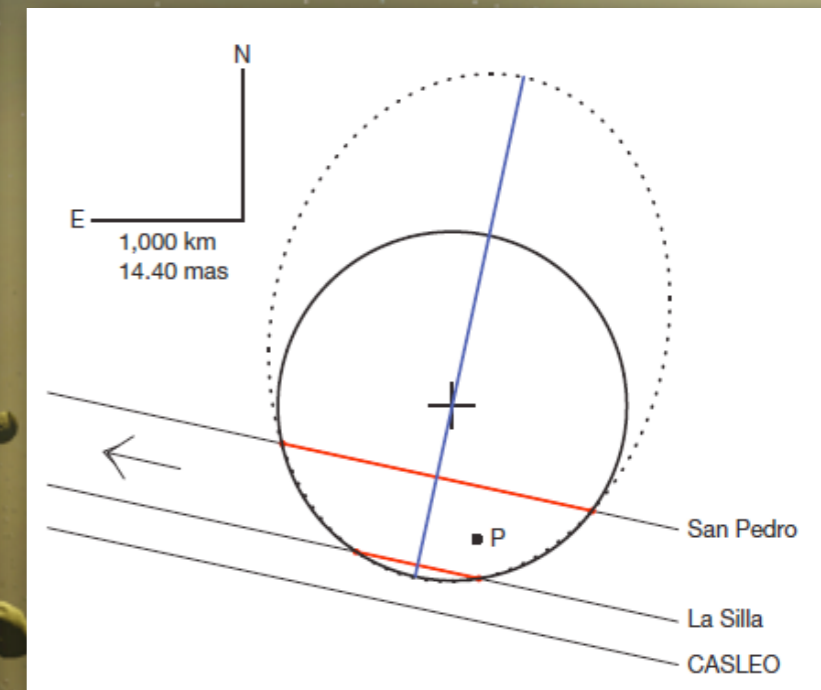
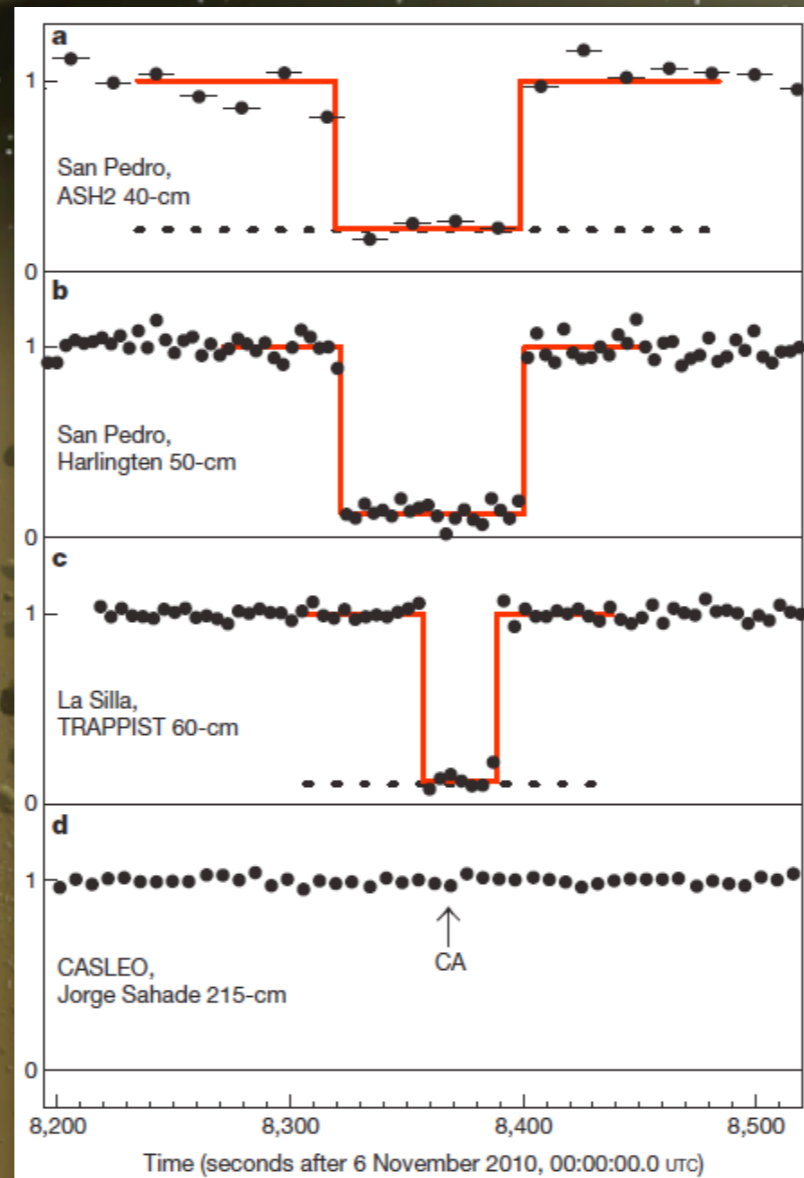
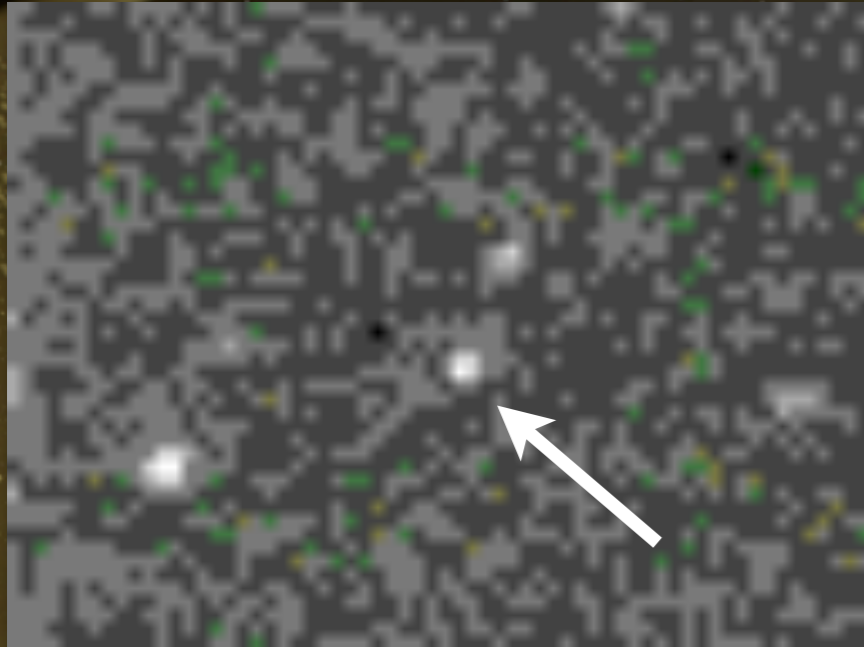
Távoli égitestek...

- Honnan tudhatjuk, hogy mekkorák?
 - Direkt mérések -- csak a legnagyobbakra működik (Pluto)
 - Csillagfedések
 - Radiometriai módszer (hőmérsékleti sugárzás)



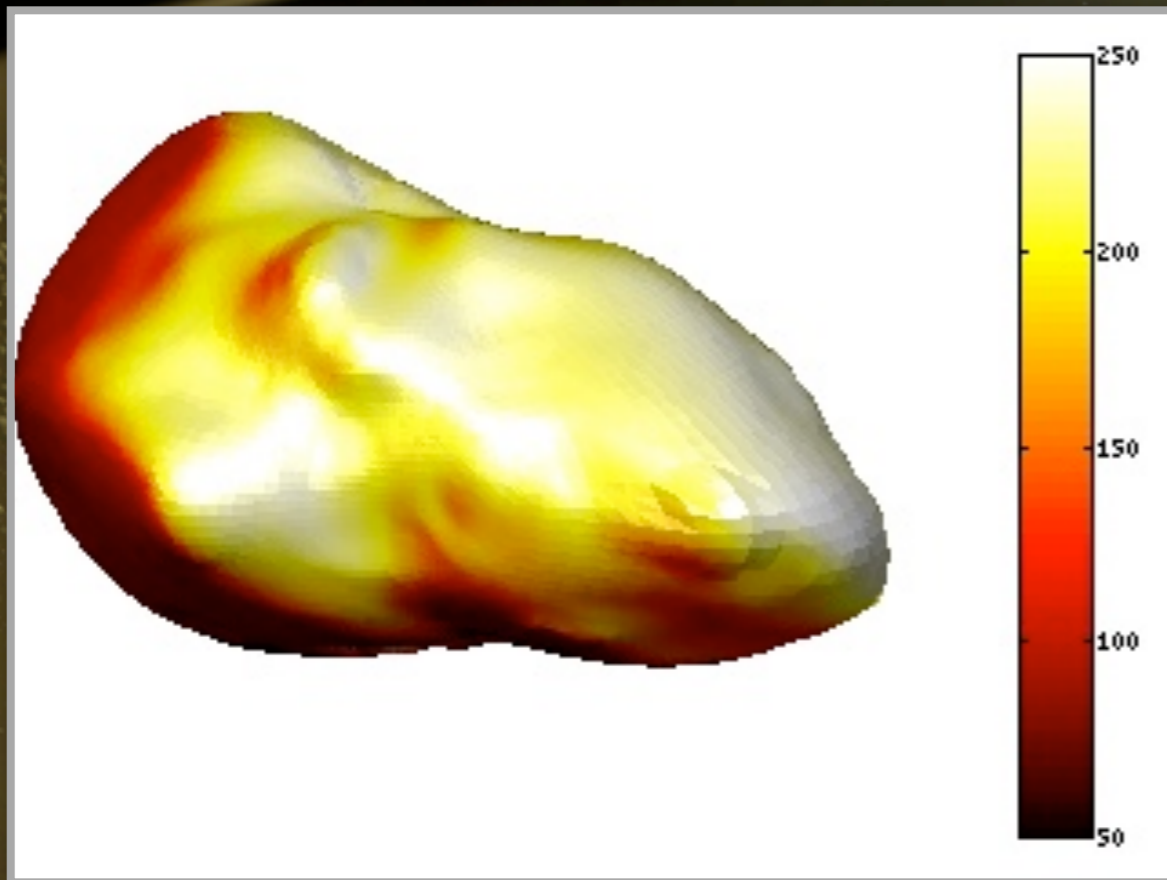
Távoli égitestek...

- Honnan tudhatjuk, hogy mekkorák?
 - Direkt mérések -- csak a legnagyobbakra működik (Pluto)
 - Csillagfedések
 - Radiometriai módszer (hőmérsékleti sugárzás)



Távoli égitestek...

- Honnan tudhatjuk, hogy mekkorák?
 - Direkt mérések -- csak a legnagyobbakra működik (Pluto)
 - Csillagfedések
 - Radiometriai módszer (hőmérsékleti sugárzás)



$$F_{\text{infra}} \sim D^2 (1-A)$$
$$F_{\text{látható}} \sim D^2 A$$

Építsünk távcsövet!



- Felszíni hőmérsékletük 30-50K, leginkább a távoli infravörösben (50-200 μm) fognak sugározni -- a légkör miatt ez a földfelszínről nem észlelhető
- Tipikus fényességük néhány mJy ($1 \text{ Jy} = 10^{-26} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$) -- nagy távcső és érzékeny detektor kell hozzá
- **1,2 GEUR és a valaha volt legnagyobb távcsőtükör az űrben pont jó lesz erre...**

A “TNOs are Cool!” program

- Herschel űrtávcső:

- A valaha volt legnagyobb, 3.5m-es távcsőtükör az űrben
- Detektorok: PACS (70, 100, 160 μ m) & SPIRE (250, 350, 500 μ m)

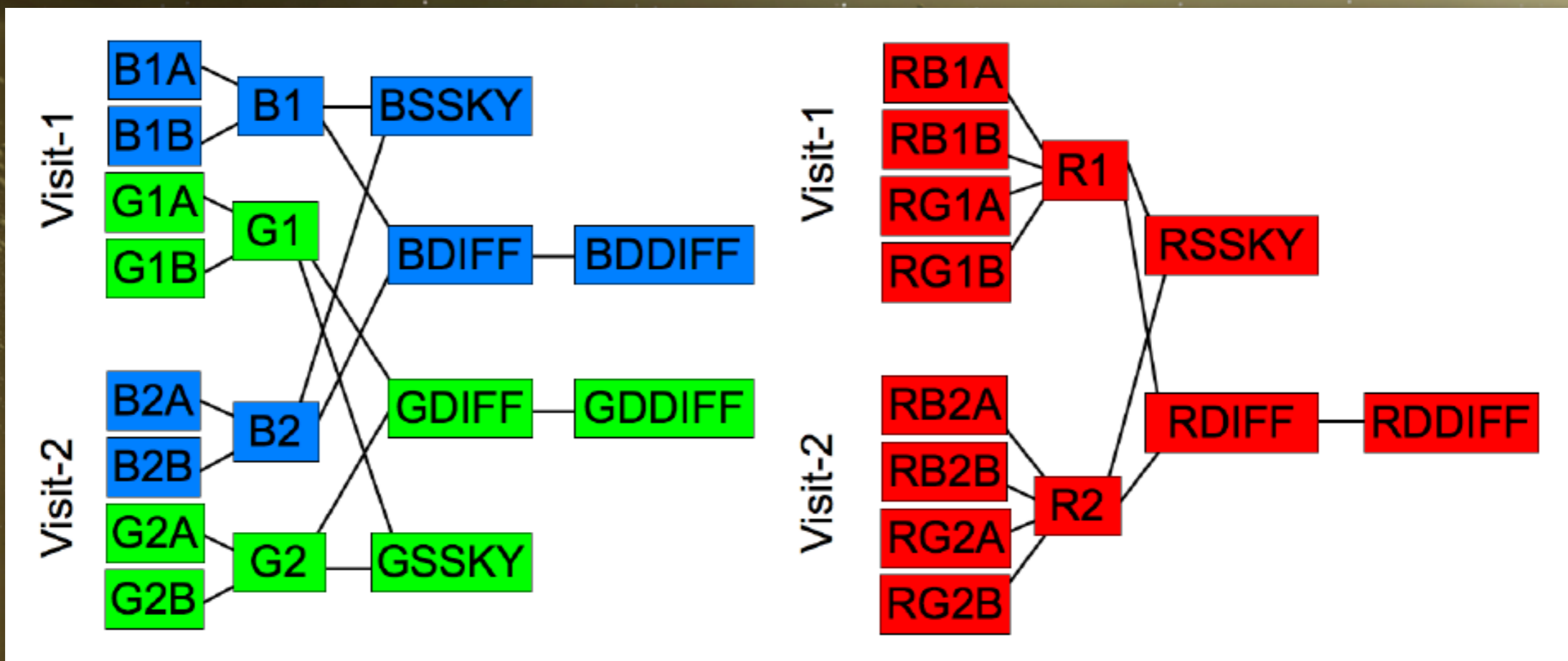
- “TNOs are Cool!” program:

- Időtartam: 2009-től 2013-ig (a Herschel misszió végéig)
- Cél: minél több neptunuszon túli égitest megfigyelése és karakterizálása távoli infravörös mérések alapján (méret, albedo, a felszín termális tulajdonságai)
- Minta: 140 égitest, a teljes ismert neptunuszon túli populáció kb. 10%-a + 8 fénygörbe célpont
- Több mint 400 óra mérési idő, az egyik legnagyobb kulcsprogram a Herschel űrtávcsövön
- Több európai és amerikai intézet együttműködése, az adatkiértékelés vezetése az MTA CSFK CSI-ben
- >90%-ban sikeres detektálás (a sikertelen detektálás is nagyon hasznos információ!)
- Jelen pillanatban a célpontok kb. 90%-a szerepel referált publikációban

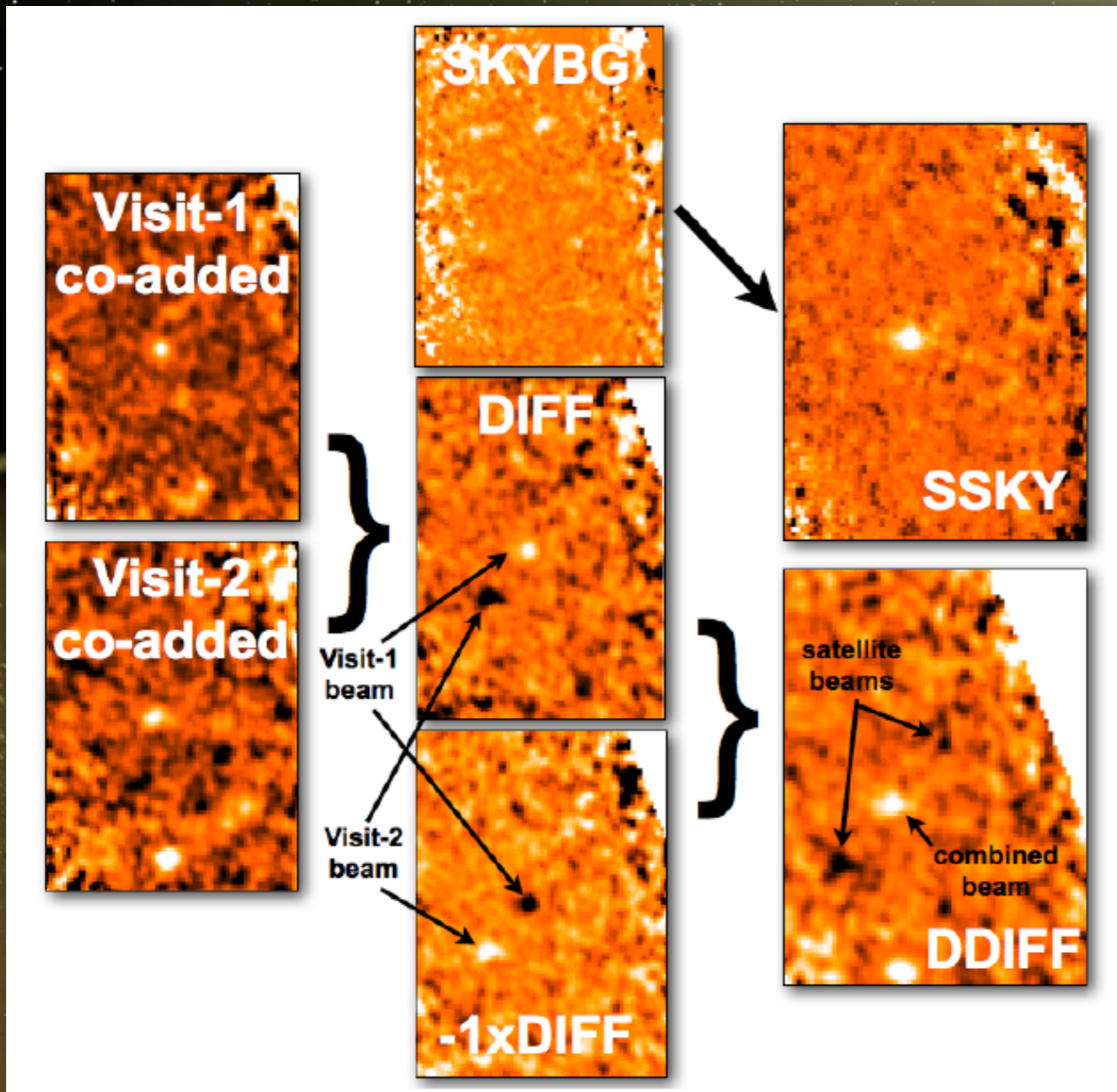


“TNOs are Cool!” adatkiértékelés

- 140 égitest, több, mint 1000 mérés (AOR)
- Alapkiértékelés: Herschel pipeline halvány, mozgó célpontokra optimalizálva — felhasználható más naprendszerbeli égitestekre is (NEO-k, üstökösök)
- Megfelelő mérési stratégiával és a mérések megfelelő kombinálásával nagyon halvány ($\sim 1\text{mJy}$) égitestek is detektálhatók
- Legnagyobb ellenség a konfúziós zaj...
- “A valaha volt legpontosabb” Herschel/PACS mérés: Hale-Bopp üstökös ($\pm 0.18\text{mJy}$ @70 μm , Szabó et al., 2012)

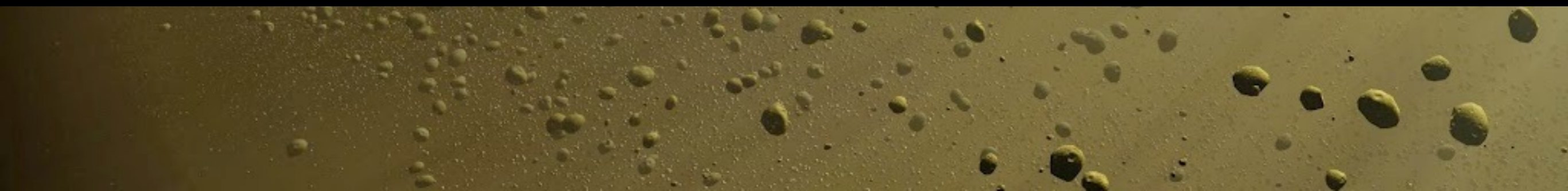
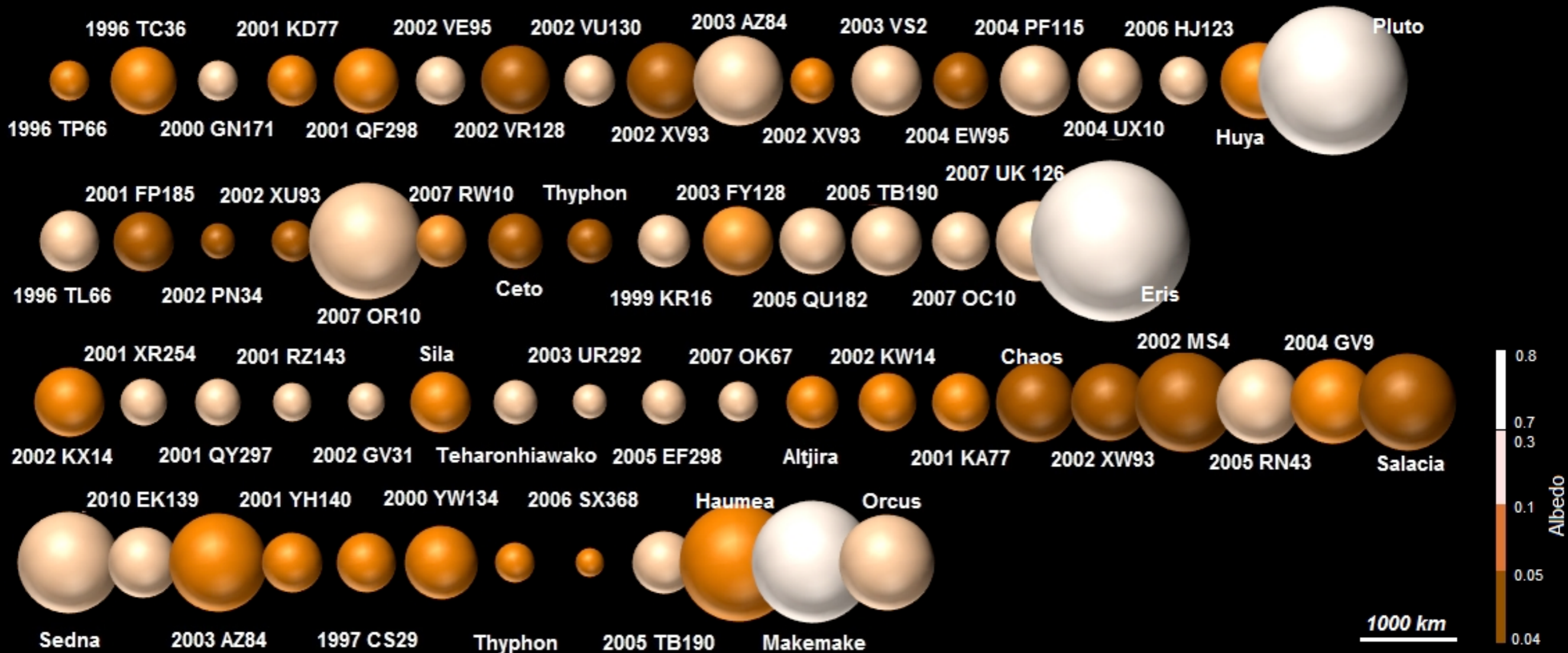


“TNOs are Cool!” adatkiértékelés

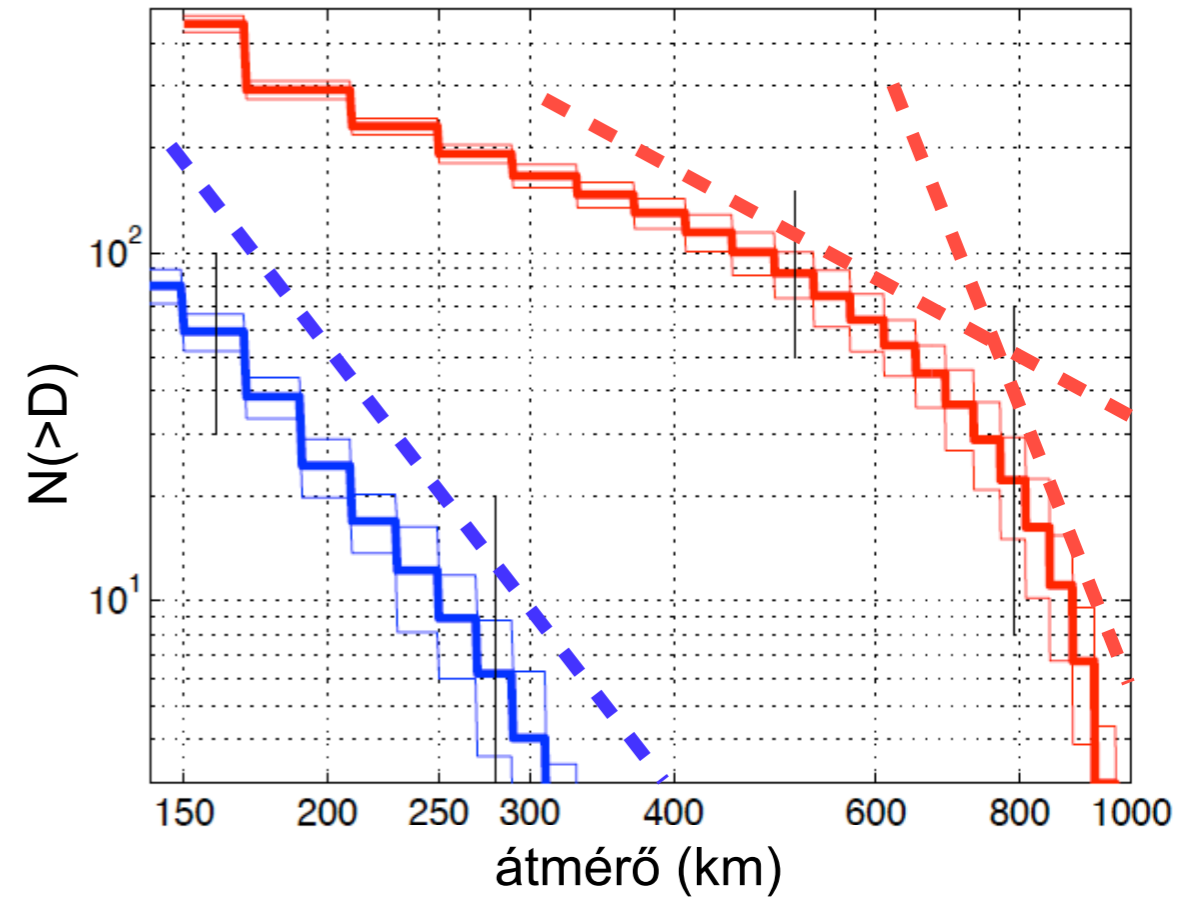
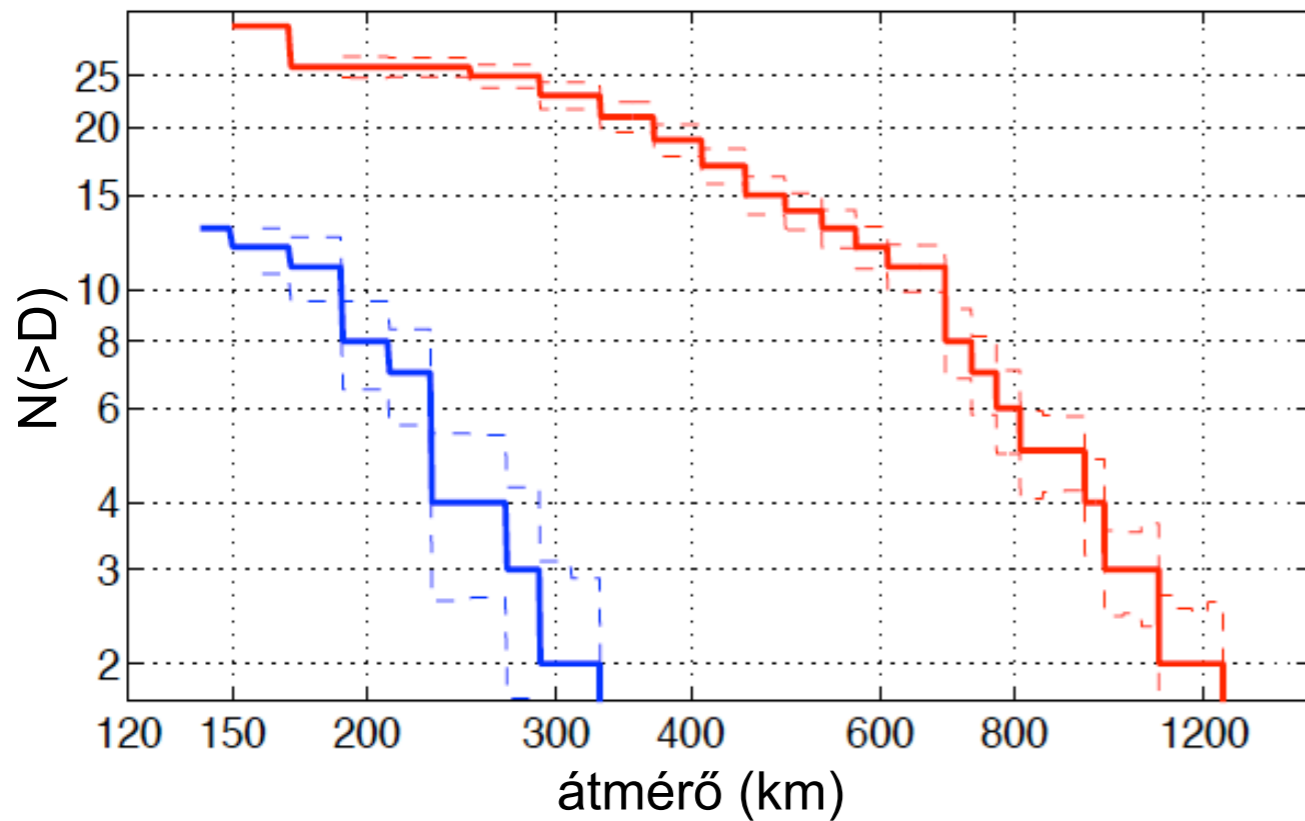


(Kiss et al., 2014)

Neptunuszon túli állatkert: méretek és albedók a “TNOs are Cool!” programból

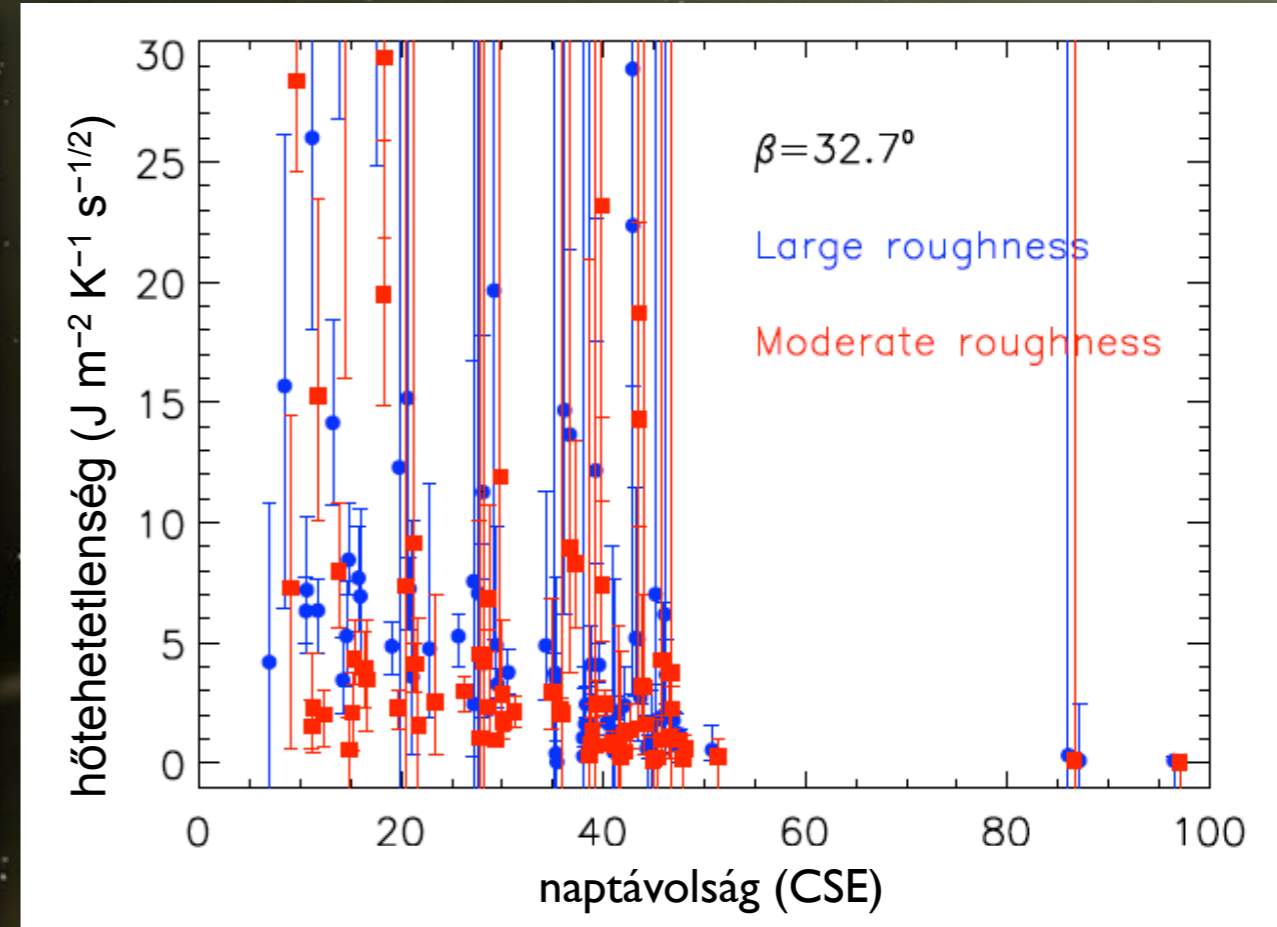
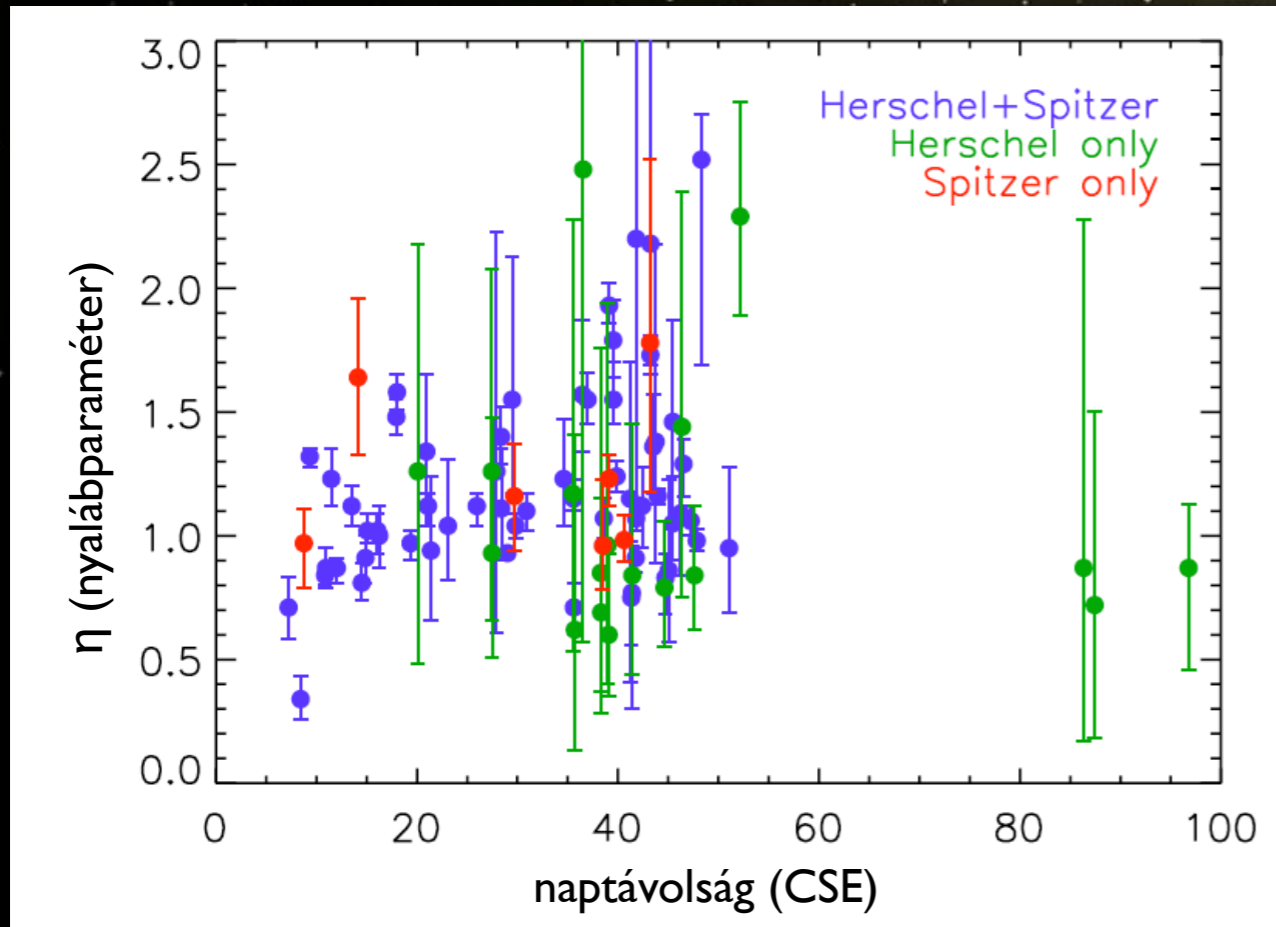


Méreteloszlás a klasszikus populációban



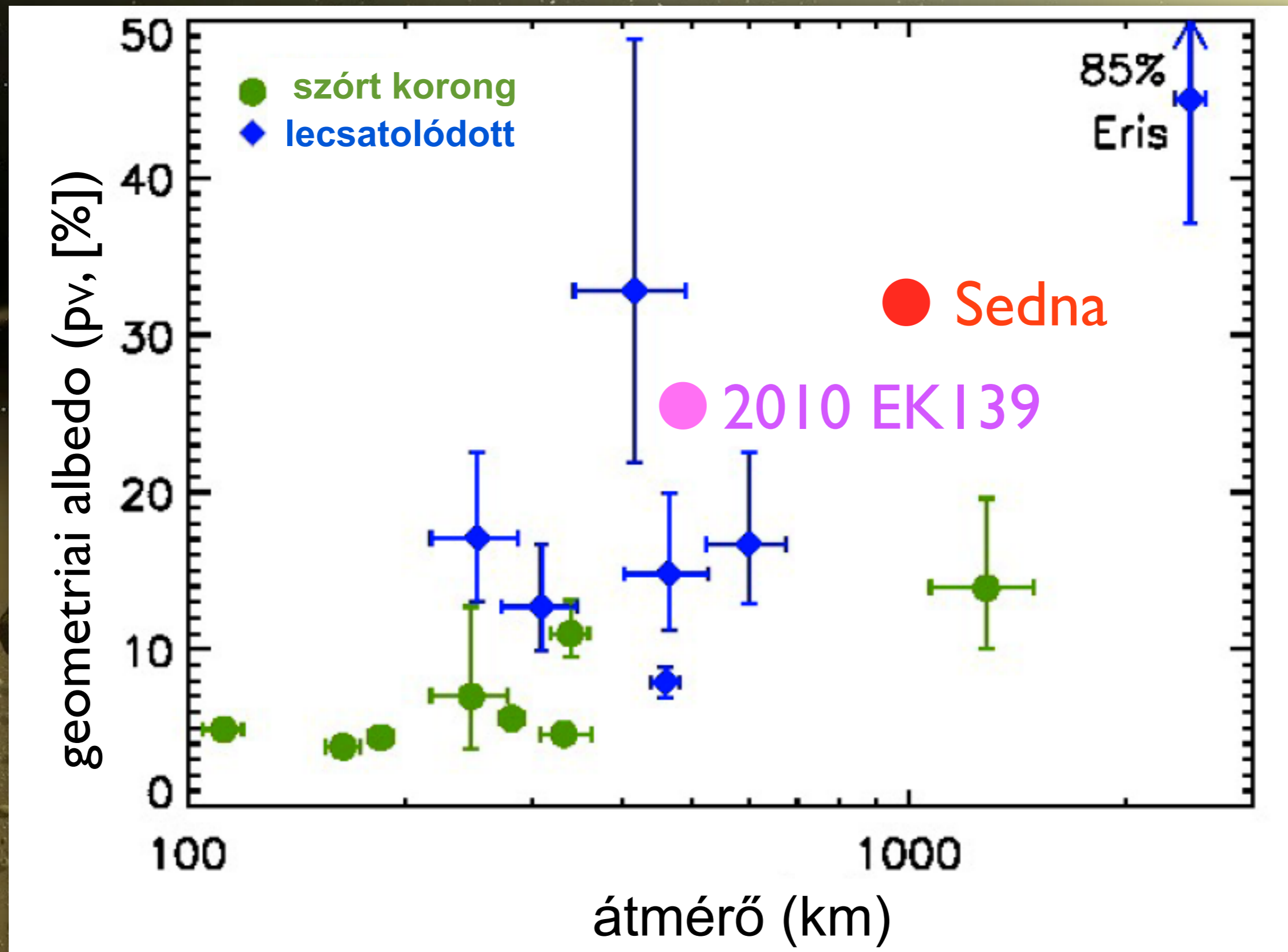
- Méreteloszlás meredeksége: Jól jellemzi a törmelékkorong állapotát és fejlődését (kezdetben $q=3...4$ a modellek szerint)
- Forró klasszikus objektumok (nagy inklináció): kb. 600km-es átmérőnél van egy erőteljes letörés: hiányoznak a kis égitestek
- Hideg klasszikus objektumok (kis inklináció): igen nagy meredekség ($q=5,1$), közel lehet a kezdeti meredekséghez

A felszín termális tulajdonságai

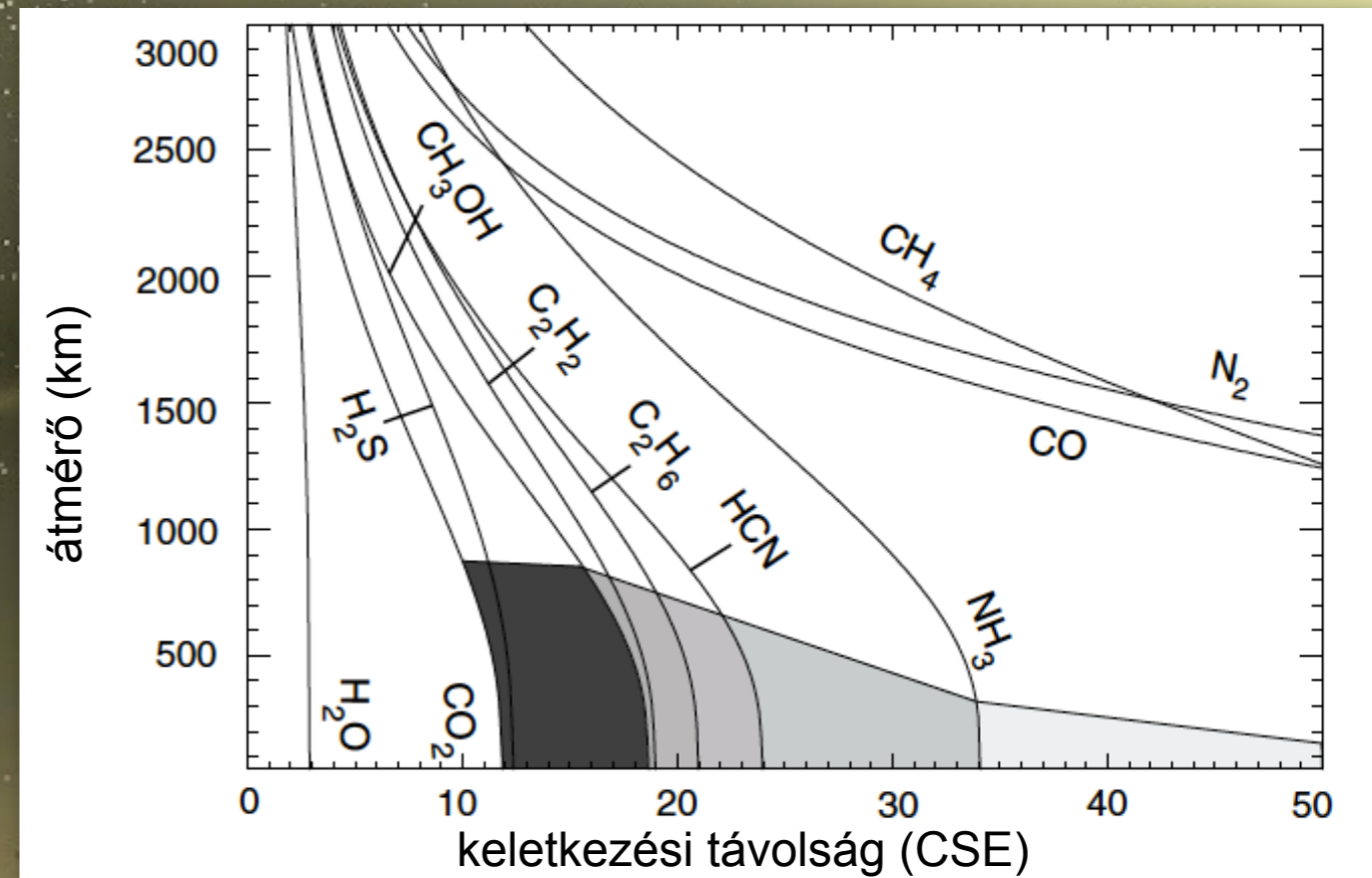
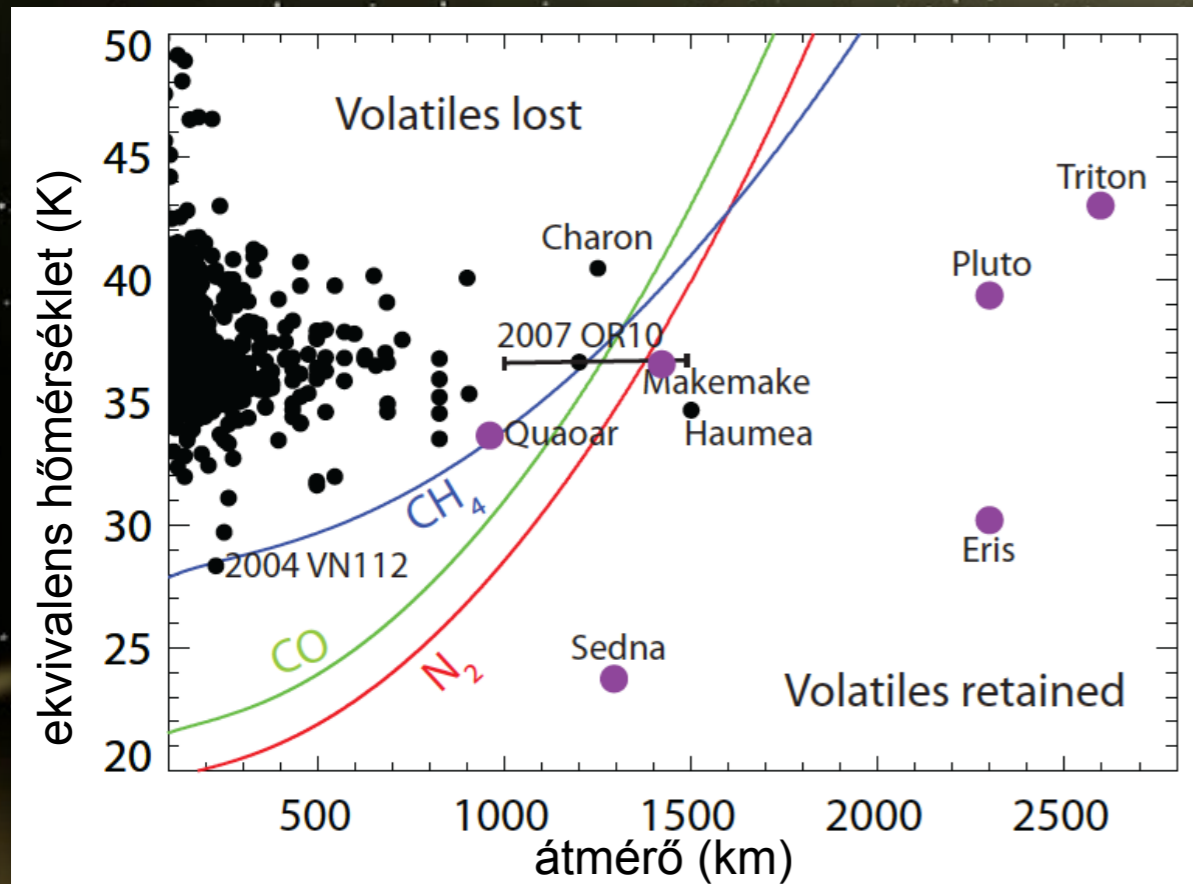


- A kráterezettség jelentősen befolyásolja a termális tulajdonságokat
- A kapott hőtehetetlenségek erős csökkenést mutatnak a nagyobb heliocentrikus távolságok felé -- ezek a hőtehetetlenség értékek 2-3 nagyságrenddel kisebbek, mint amit kompakt jegek esetén várnánk, és alacsonyabbak, mint amit pl. a Szaturnusz holdrendszerében, vagy a Plútó-Charon rendszerben találunk
- A legnagyobb albedójú égitestek kivétel nélkül rendkívül alacsony hőtehetetlenségűek, ami nagyon porózus felszínre utal

Szórt korong- és lecsatolódot objektumok

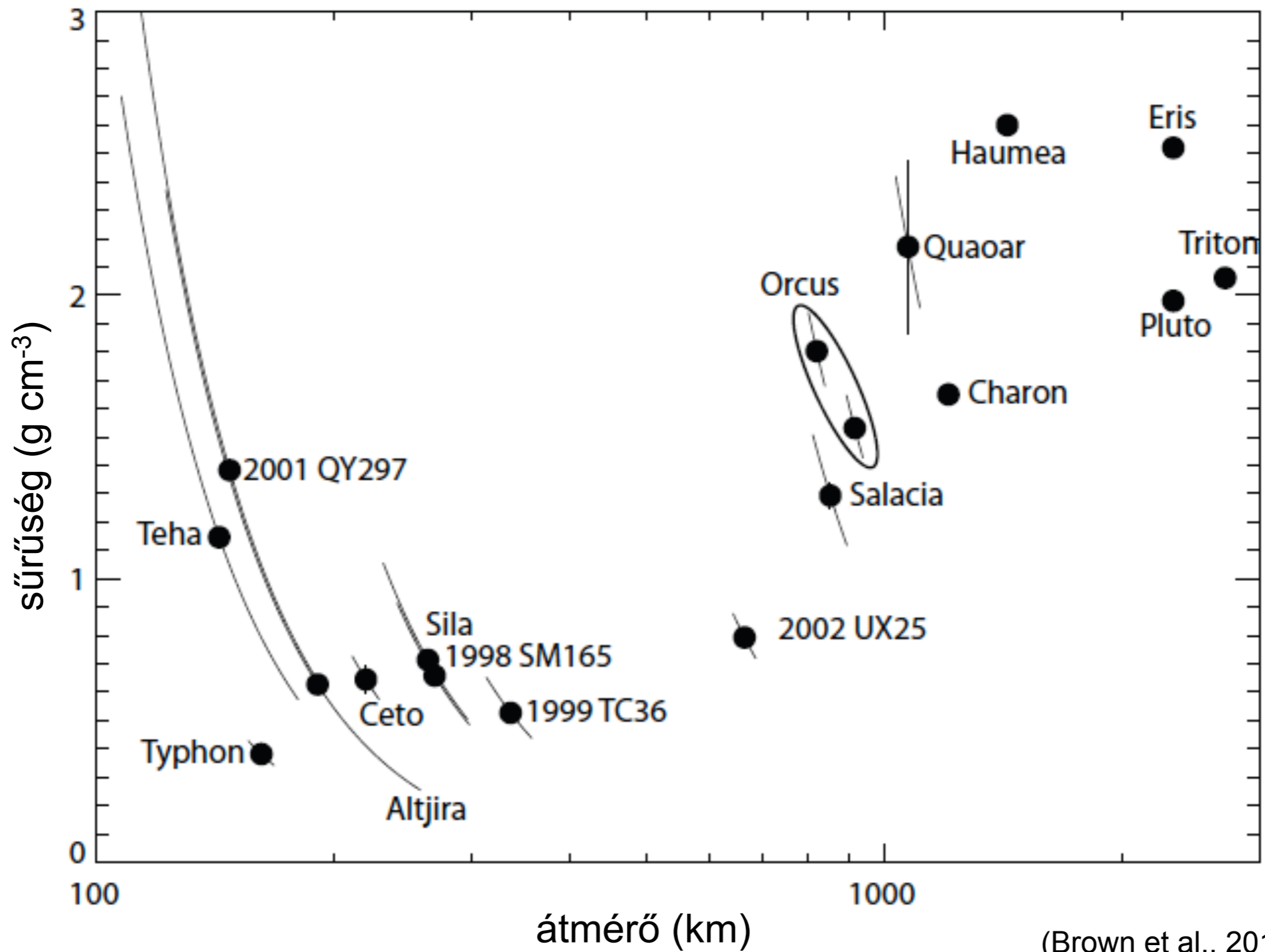


Szórt korong- és lecsatolódtott objektumok



- A nagyméretű, távoli égitesteknek fényesebb felszínük van, könnyebben meg tudják tartani az illó anyagokat a nagyobb felszíni gravitáció és az alacsony felszíni hőmérséklet miatt.
- Valóban ezek a legöregebb felszínek a Naprendszerben? A kisebb/Naphoz közelebbi égitestek felszíne könnyebben át tud alakulni az űridőjárás hatására
- Vagy folyamatosan újraformálódó felszín (ütközések?, kriovulkanikus aktivitás?)
- Bizonyos esetekben ez évszakos változásokkal is magyarázható, pl. a metán atmosféra lecsapódása a felszínre nagy heliocentrikus távolságoknál az Eris esetében

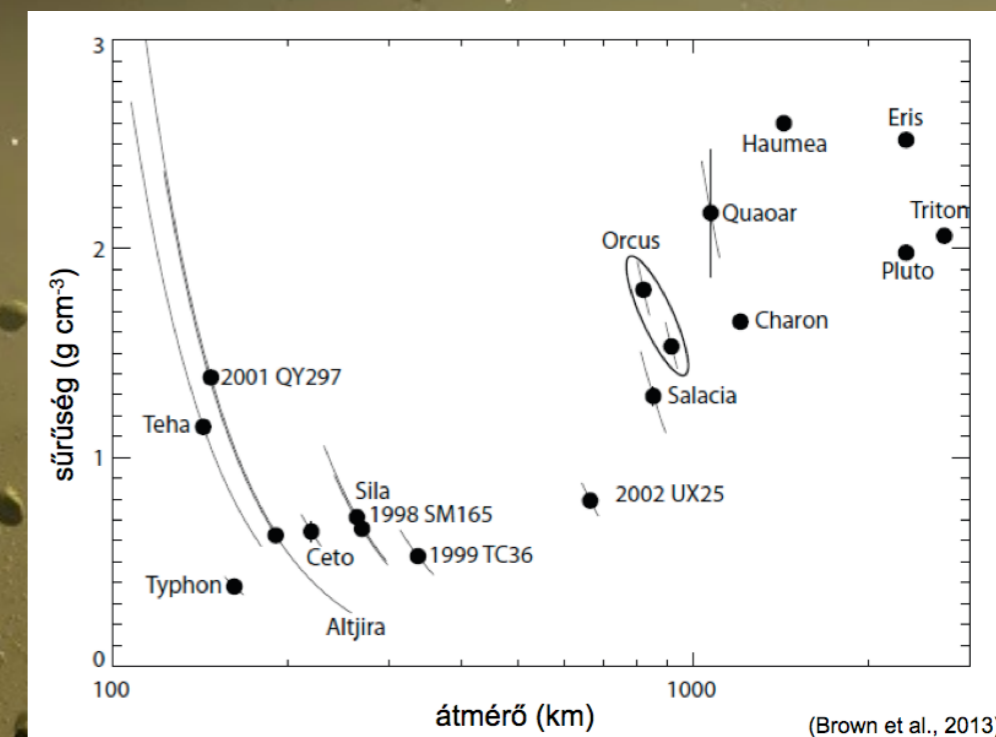
Hogyan épülnek fel a neptunuszon túli égitestek?



(Brown et al., 2013)

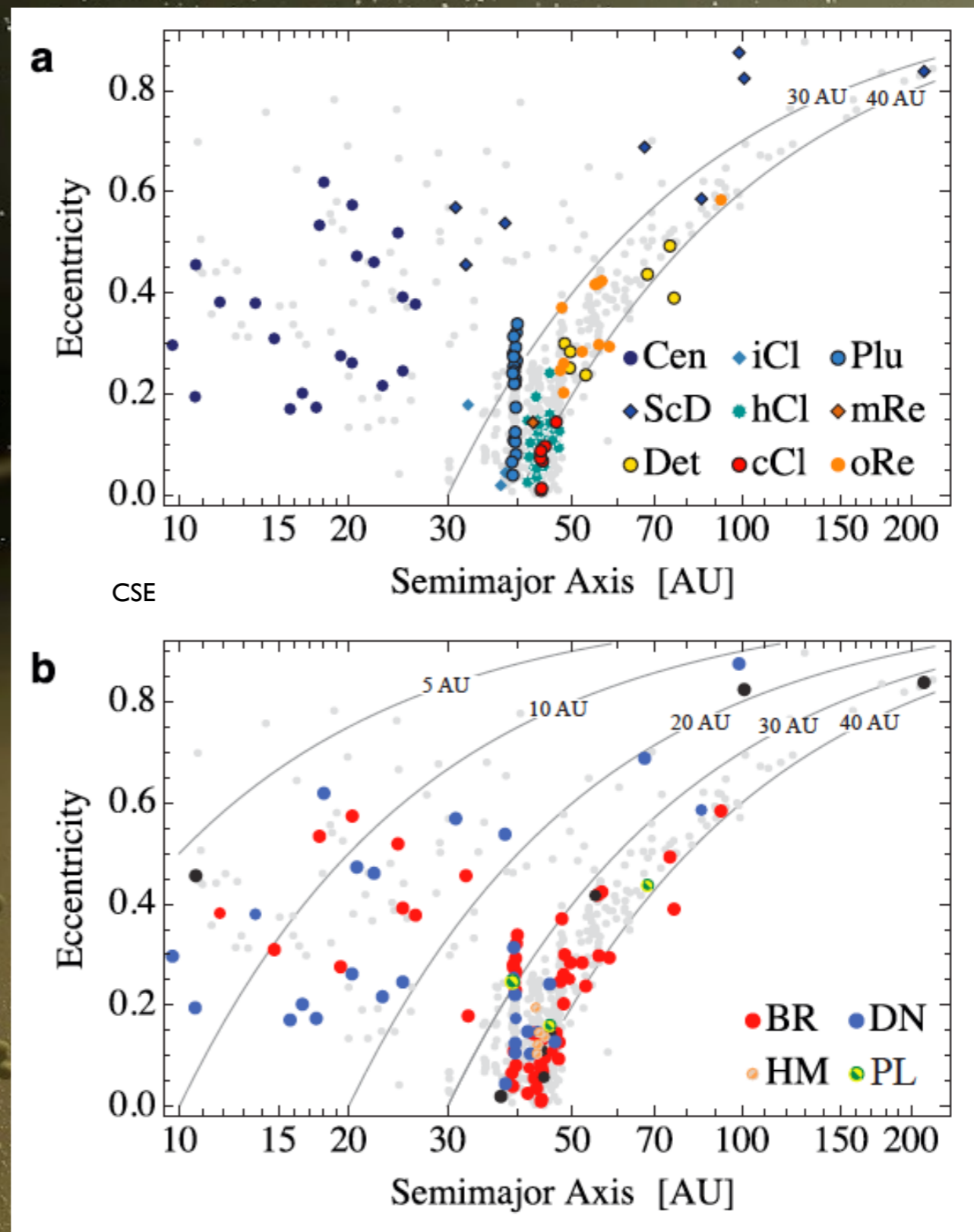
Hogyan épülnek fel a Neptunuszon túli égitestek?

- Standard forgatókönyv: nagyobb égitestek kisebbek összetapadásával jöttek létre -- a nagyobbak sűrűsége is maximum kb. 1 g cm^{-3} lehetne.
- Kisebb égitestek porozitása nagyobb -- a Kuiper-övben kisebb kellene, hogy legyen, mint a kisbolygóövben a jegek nagyobb aránya miatt.
- Megoldás?
 - Kiválasztási effektus (vannak sűrűbb kis égitestek is, amiket nem látunk)
 - Alábecsült porozitás
 - Keletkezési hely
 - Óriási ütközések (Haumea)

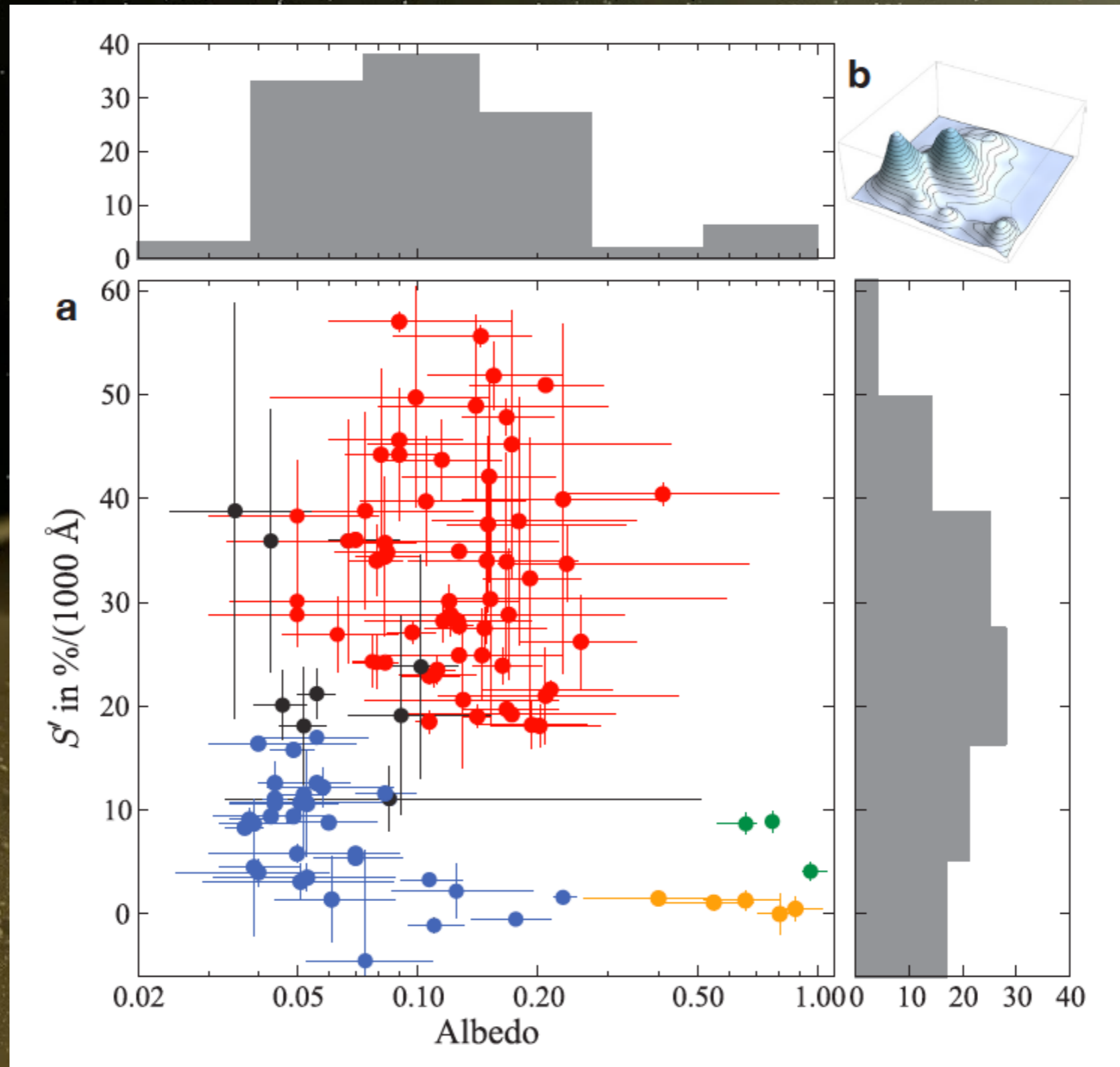


Albedok és színek a Neptunuszon túli égitestek között

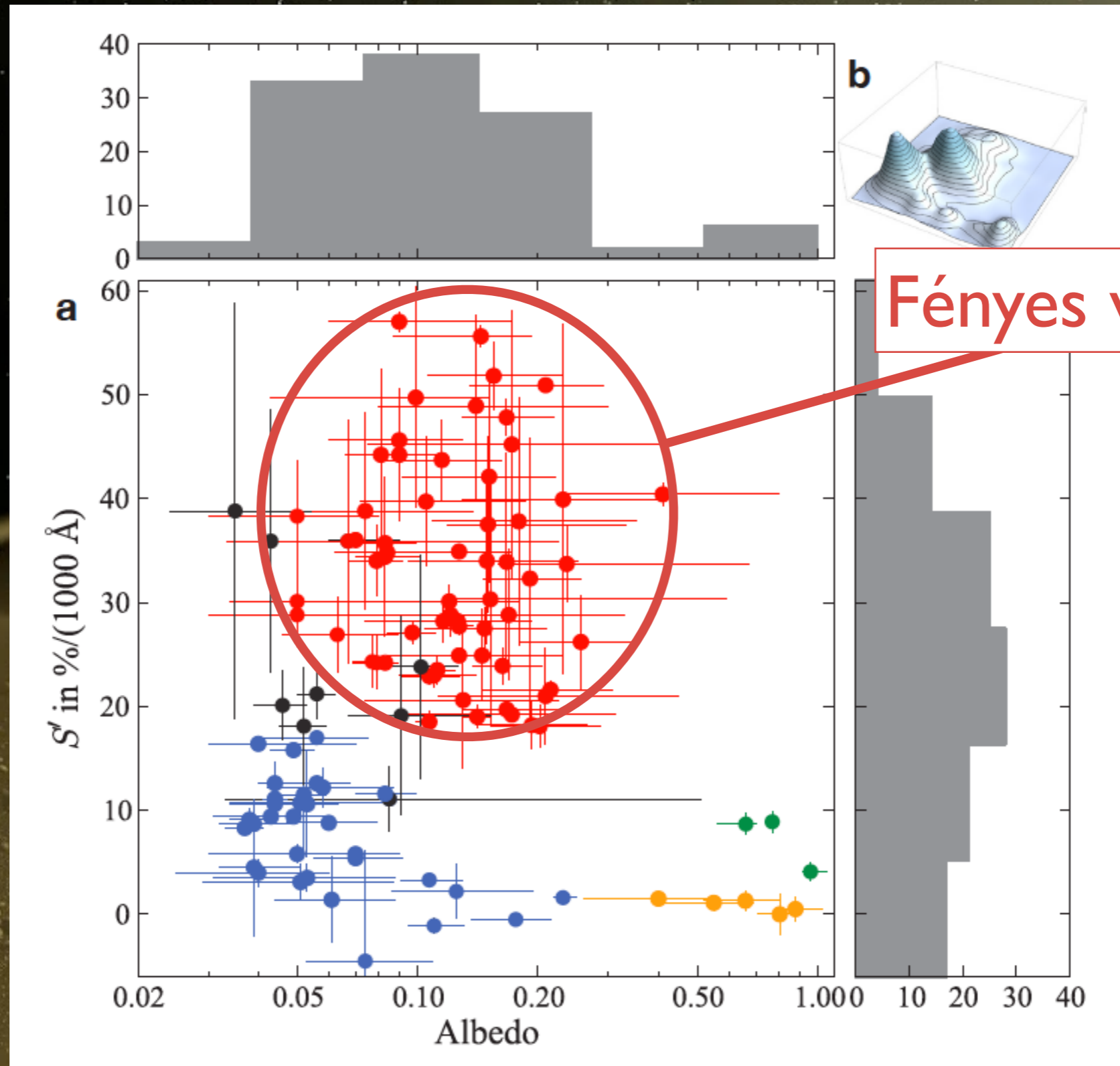
- TNO-k színei nagyon változatosak, vannak egészen “kékek” (szürkek), és nagyon “vörösek” is.
- Egyedül a színek alapján nehéz róluk bármit is mondani
- “TNOs are Cool!” minta “biztos” albedójú része (109 égitest) → albedo
- Szín + albedo együtt: ~ felszíni “kémia”



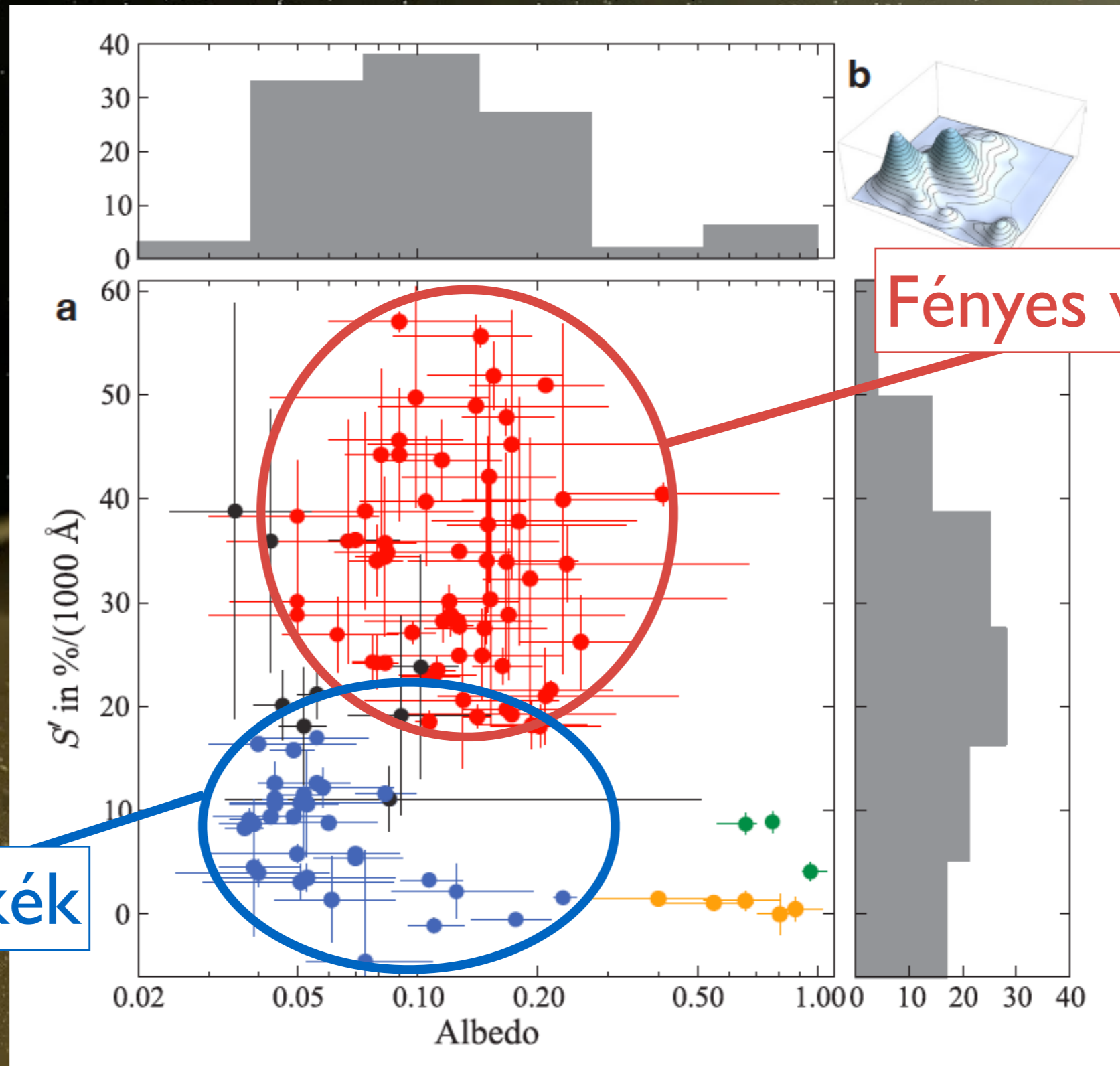
Albedok és színek a Neptunuszon túli égitestek között



Albedok és színek a Neptunuszon túli égitestek között



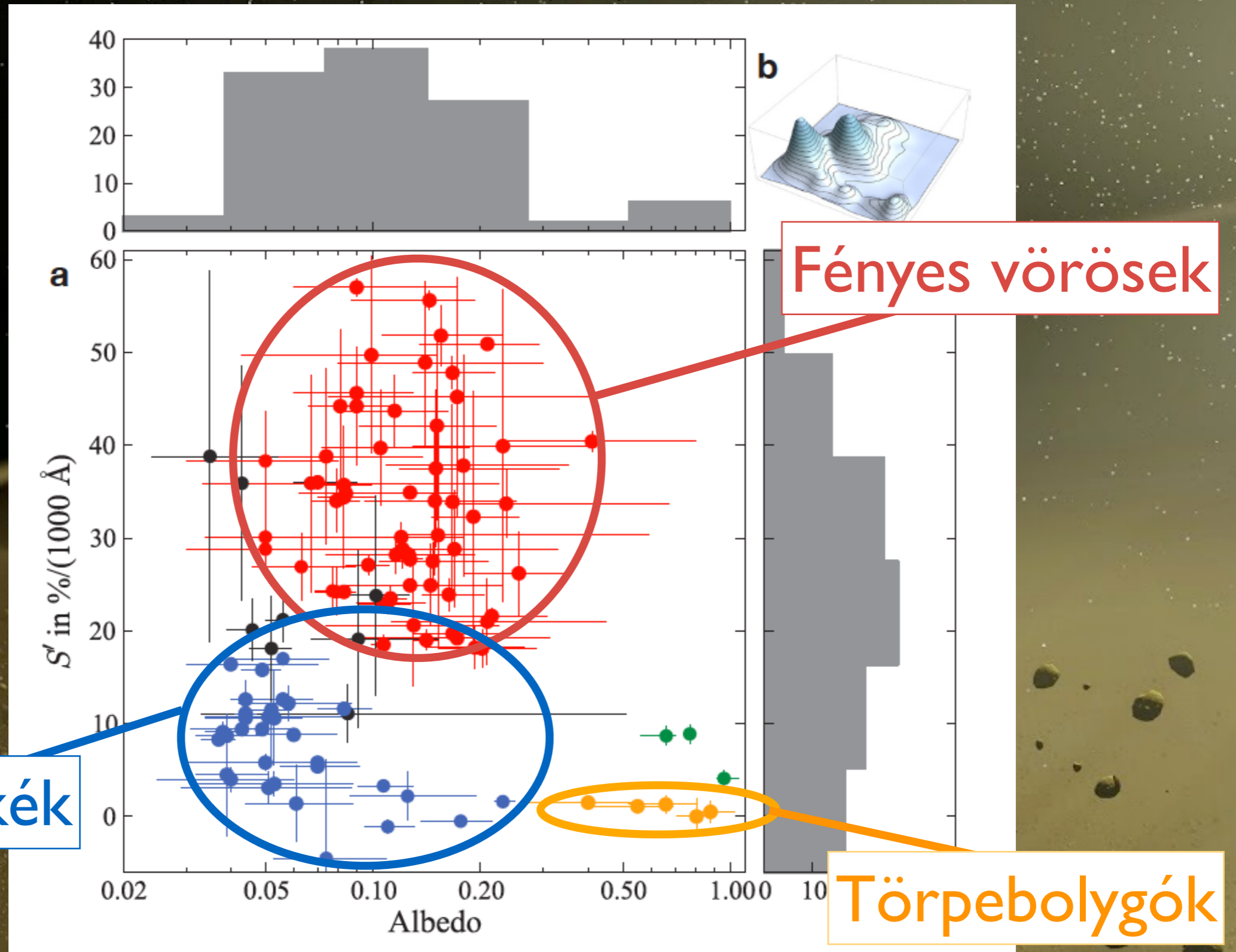
Albedok és színek a Neptunuszon túli égitestek között



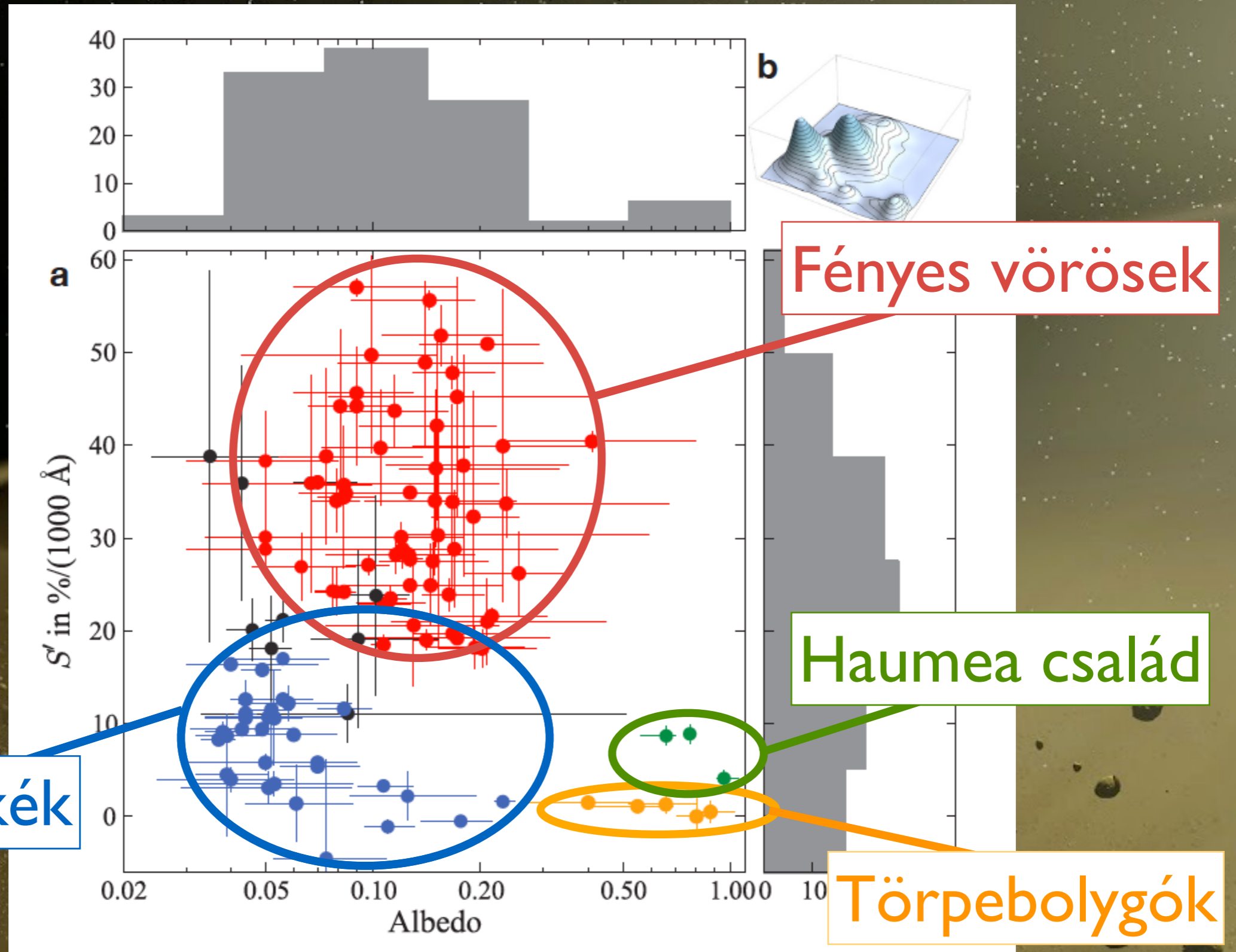
Fényes vörösek

Sötét szürkék

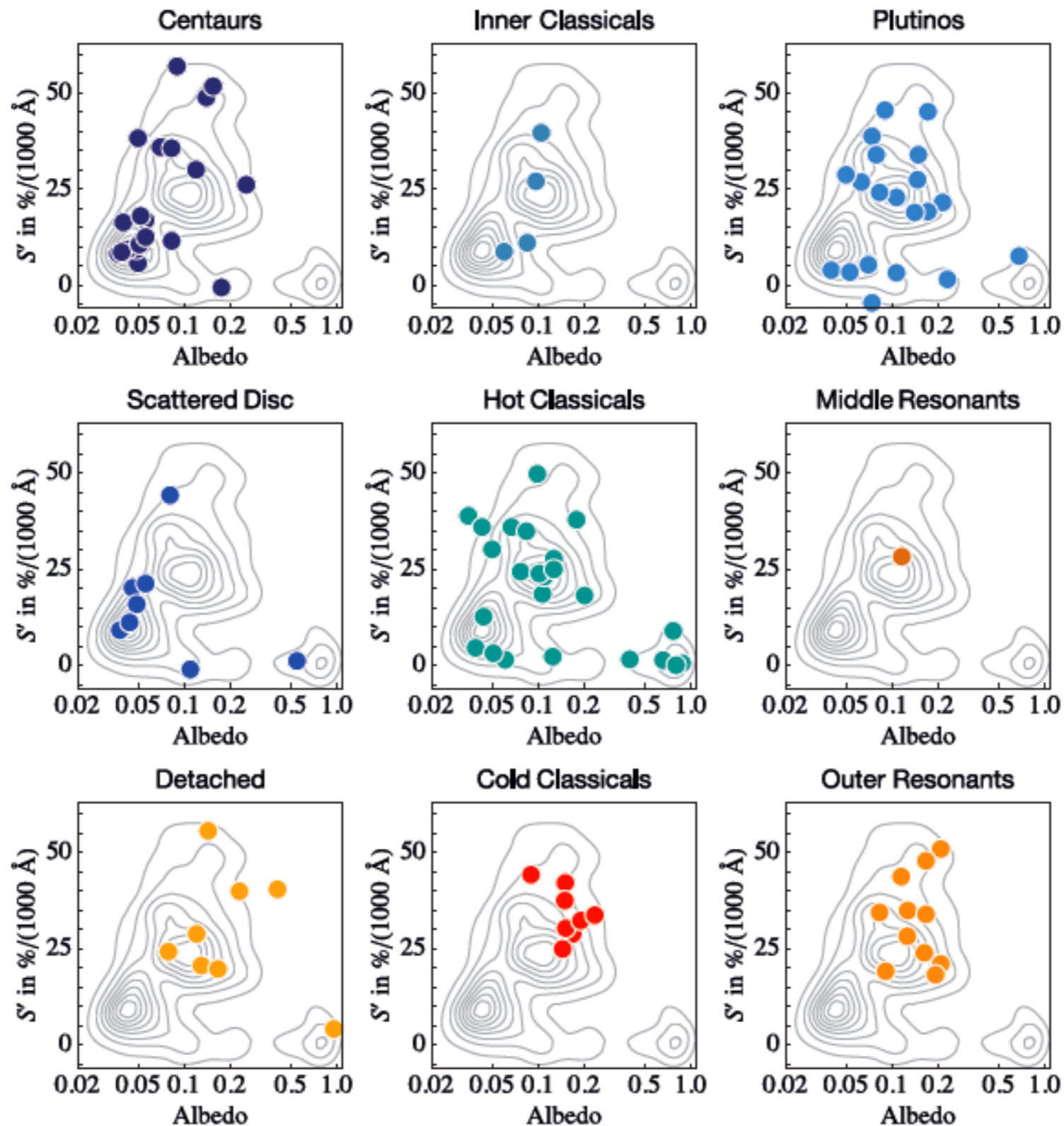
Albedok és színek a Neptunuszon túli égitestek között



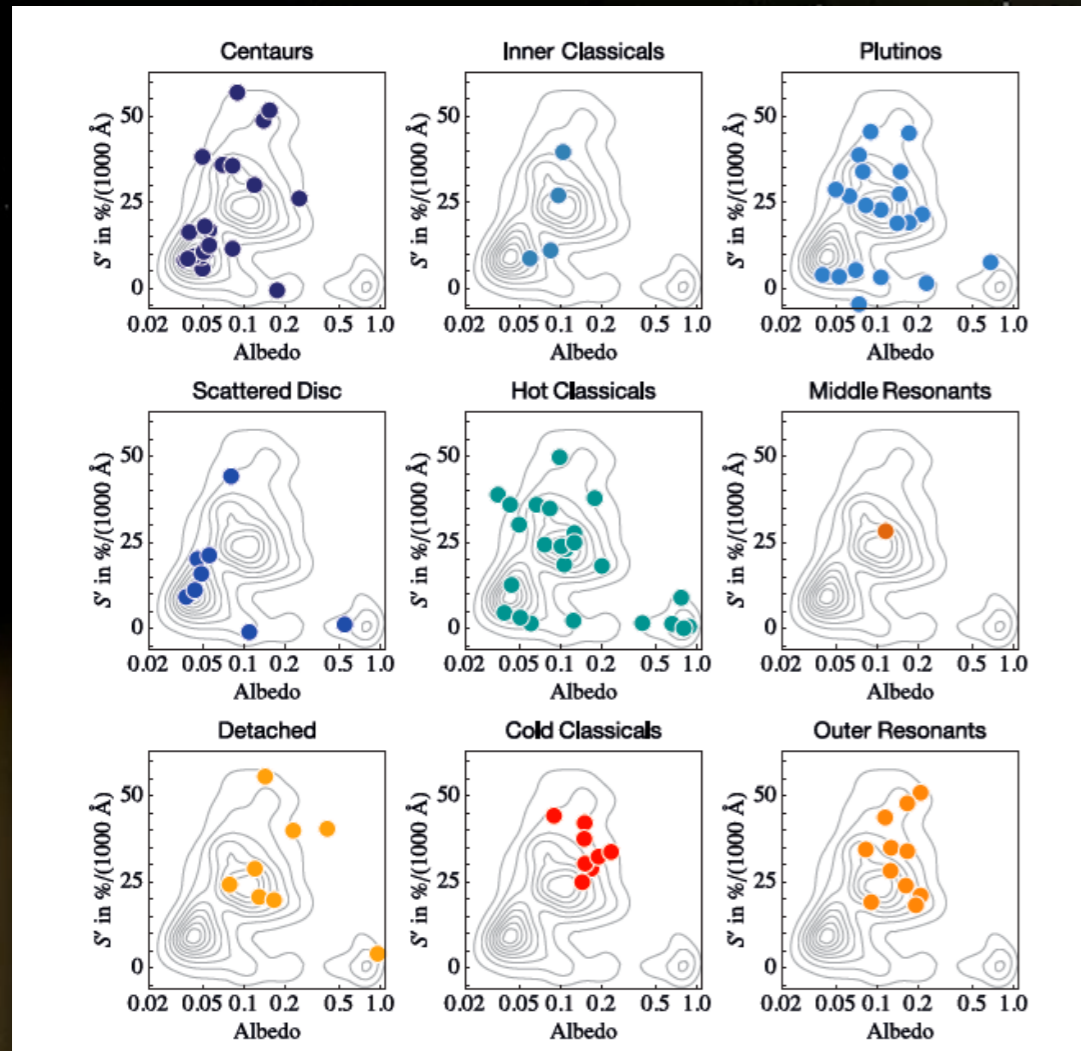
Albedok és színek a Neptunuszon túli égitestek között



Albedok és színek a Neptunuszon túli égitestek között



Albedok és színek a Neptunuszon túli égitestek között



- Ősi(nek gondolt) populációkban csak fényes-vörös objektumok vannak (hideg klasszikusok, lecsatolódtak, külső rezonánsak)
- A többi populációban vegyesen fordulnak elő
- Ezekről a populációkról gondoljuk, hogy “átjárás” van közöttük (Szórt korong → Kentaurók; Plutínok → Jupiter-család üstökösei)
- Eszerint a színek eredendően különböznek, nem a környezet (heliocentrikus távolság) hatása alakítja ki
- NICE modell: A Neptunusz kifelé tartó migrációja során kb. 20 CSE-től “szórt” égitesteket a szórt korongba ill. fogott be rezonanciákba, de ezekbe távolabb keletkezett égitestek is belekerülhettek
- Az ősi populációk “megúszták”...

Konklúzió...

- Az egyedi égitestek tulajdonságain kívül nagyon sok információt kaptunk a törmelékkorong szerkezetéről és evolúciójáról — ez az egyetlen törmelékkorong, amit részleteiben tudunk tanulmányozni
- “TNOs are Cool!” portfolio:
 - 14 dedikált, referált cikk 2009 és 2014 között (A&A), kéttucat konferencia-cikk (poszter, előadás)
 - kb. további 10 cikk előkészületben
 - kb. egy tucat “szatelit” cikk (NEO, üstökösök, kisbolygók)
- Az adatok további sorsa: végső, teljes újrafuttatás, publikus adatbázis 2015 elején (TNOs are Cool! Data Workshop, 2014. október 14-17.)
- Mire lehet még használni?:
 - “TNOs are Cool!” örökség: évtizedekig nem lesz olyan (űr)eszköz, ami hasonló minőségű és mennyiségű adatot tudna szolgáltatni
 - SPICA sorsa bizonytalan — ez képes lenne a teljes ma ismert Neptunuszon túli populáció észlelésére a termális infravörösben
 - Okkultációs mérésekkel kombinálva rendkívül nagy pontossággal lehet méretet/albedot számolni

Támogatók

OTKA K-101393

OTKA K-104607

A Magyar Űrkutatási Iroda és az Európai
Űrhivatal (ESA) PECS pályázata
(4000109997/13/NL/KML)

MTA Bolyai János Kutatási Ösztöndíj