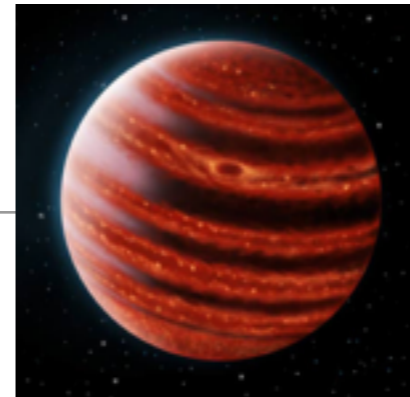
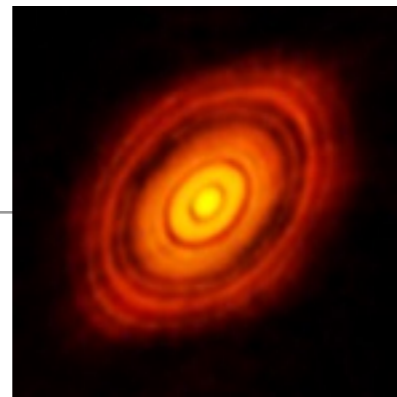
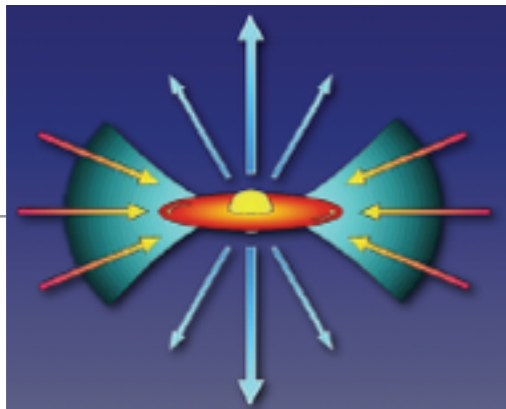


Miért *olyanok* a bolygórendszerek?



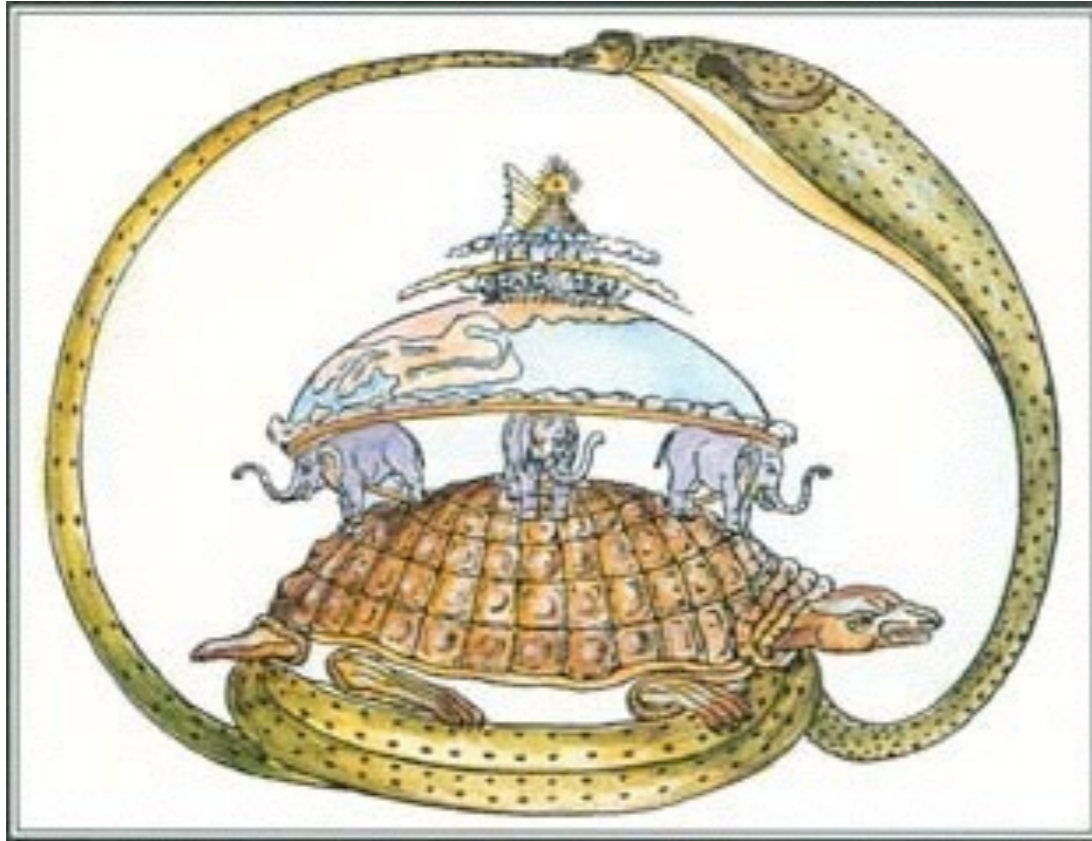
Ábrahám Péter

MTA Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont
Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézet

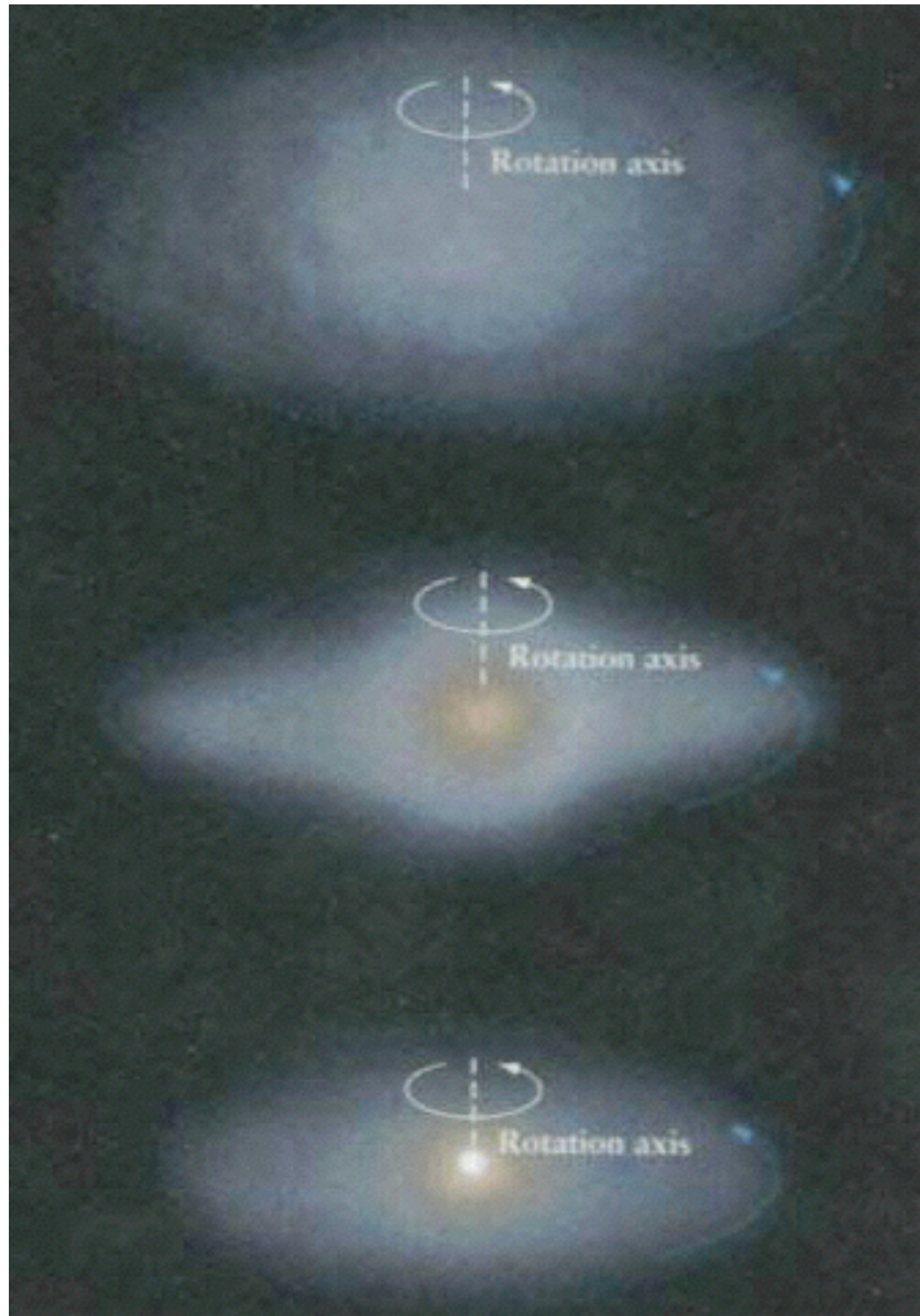
2016 november 24.

“Az atomoktól a csillagokig”, ELTE TTK

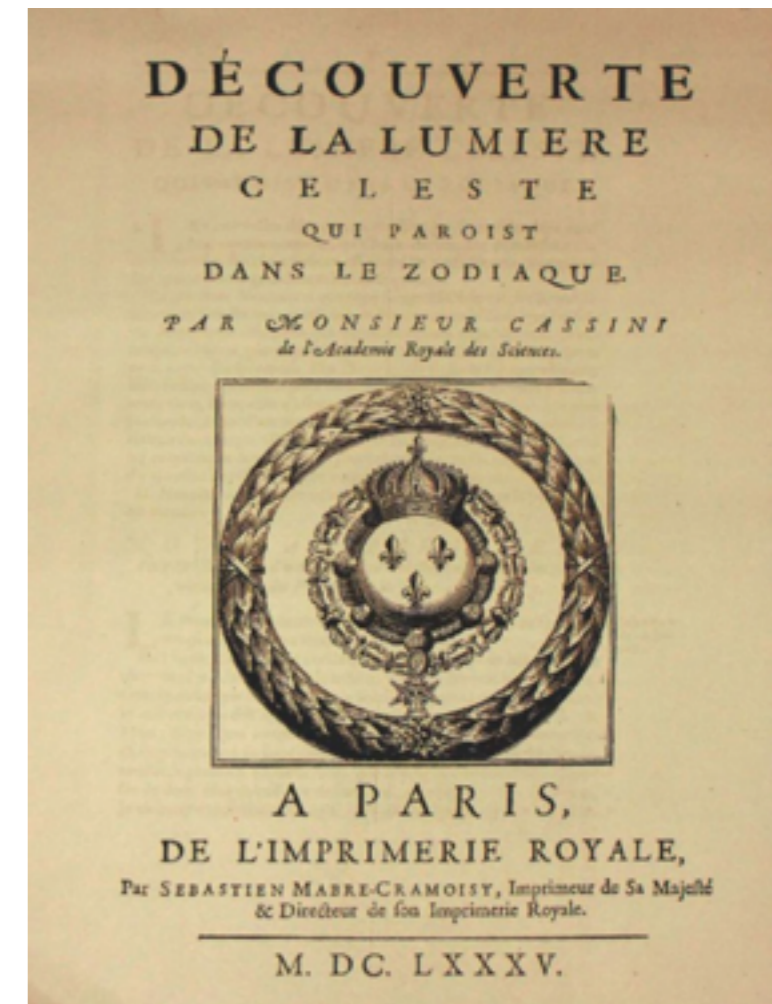
Minden civilizáció (egyik) alapkérdése...



Tudományos megközelítés: XVII-XVIII. sz.



Az állatövi fény jelenségének helyes értelmezése (Cassini, 1683)



A Naprendszer keletkezésének Kant-Laplace elmélete (XVIII. sz.)

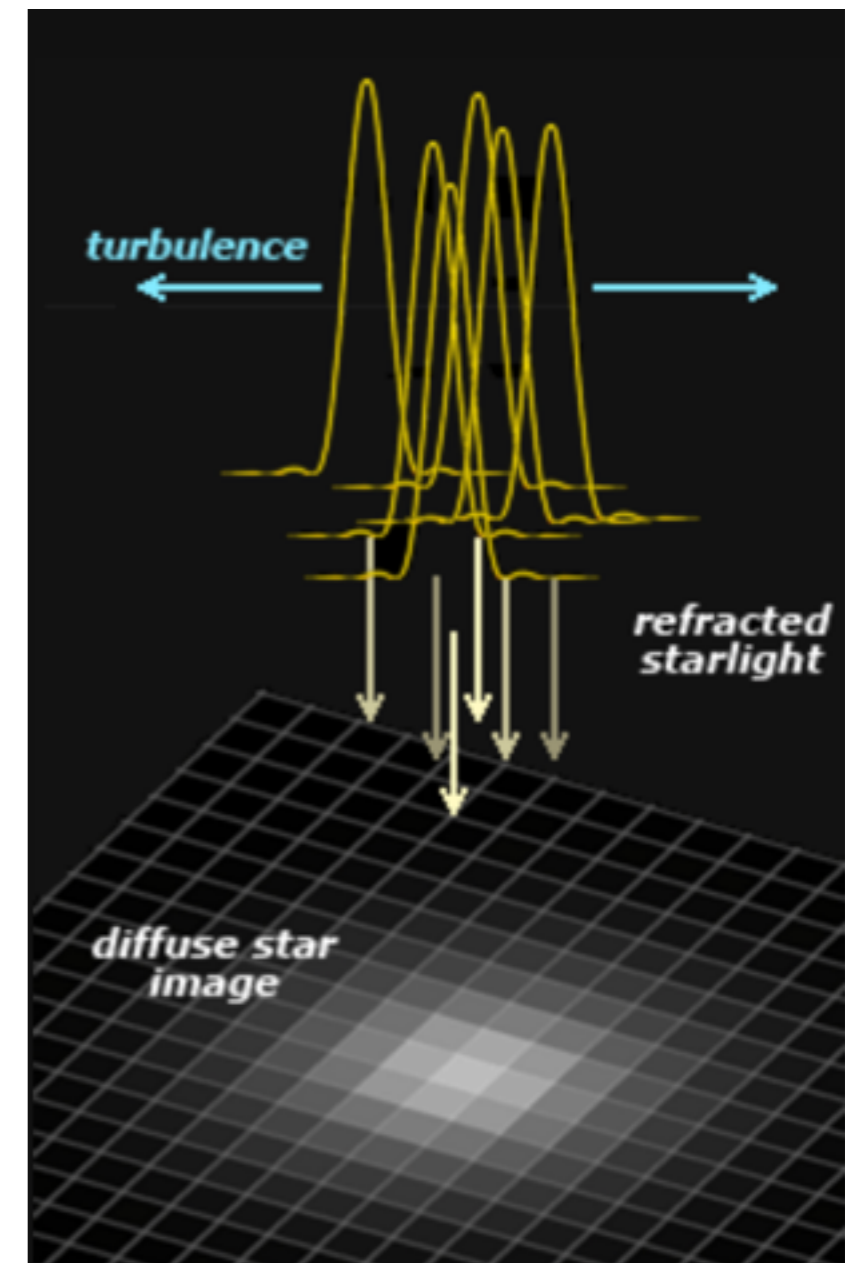
A "nebula/ösköd" meglepően hasonlít a mai elképzelésünkre...

A “nebula” megfigyelhetősége

- A hideg hidrogéngázt (H_2) nehéz megfigyelni
- A “nebula” a gáz mellett port (nehezebb elemeket) is tartalmaz:
 - porszemcséken szóródó fény
 - porszemcsék hősugárzása
- Szögmásodpercnél jobb térbeli felbontás (<seeing)
- Infravörös technológia
- Milliméteres molekulavonalak (CO)

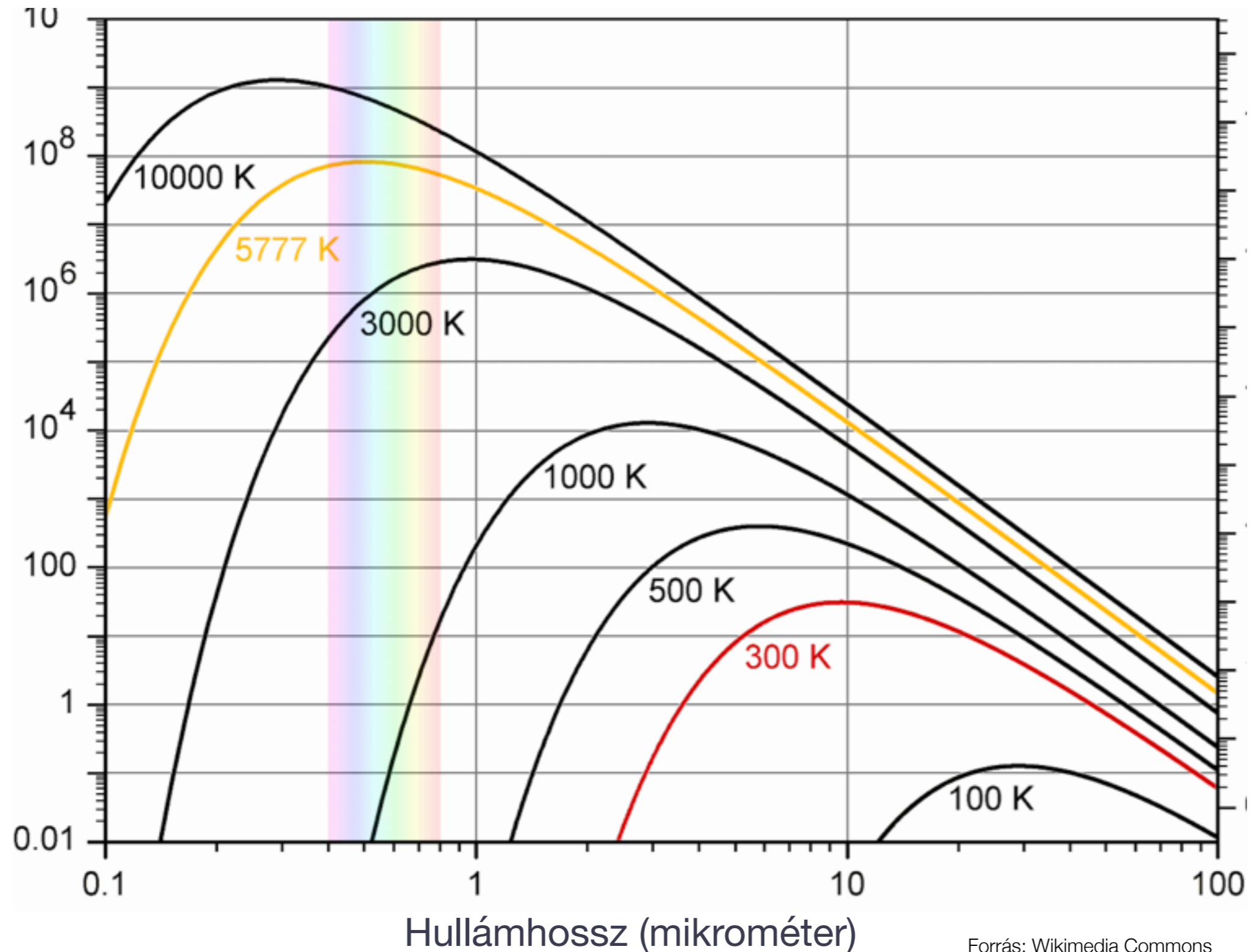
Taurus csillag-keletkezési terület (450 fényév)

1 CSE (Föld)	0.007"
5 CSE (Jupiter)	0.035"
50 CSE (Plutó)	0.35"
100 CSE (korong)	0.7"
1000 CSE	7"

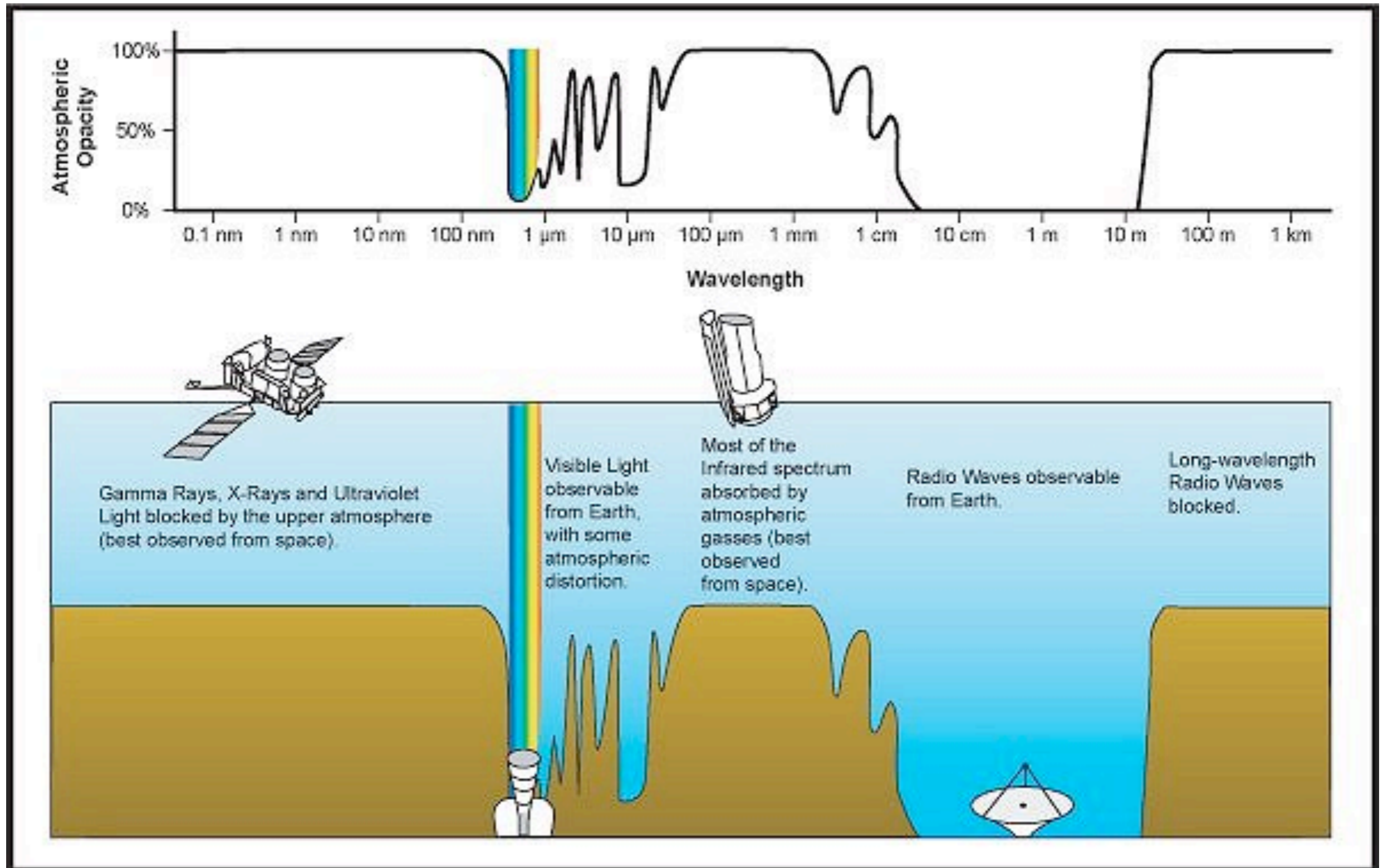


Forrás: handprint.com

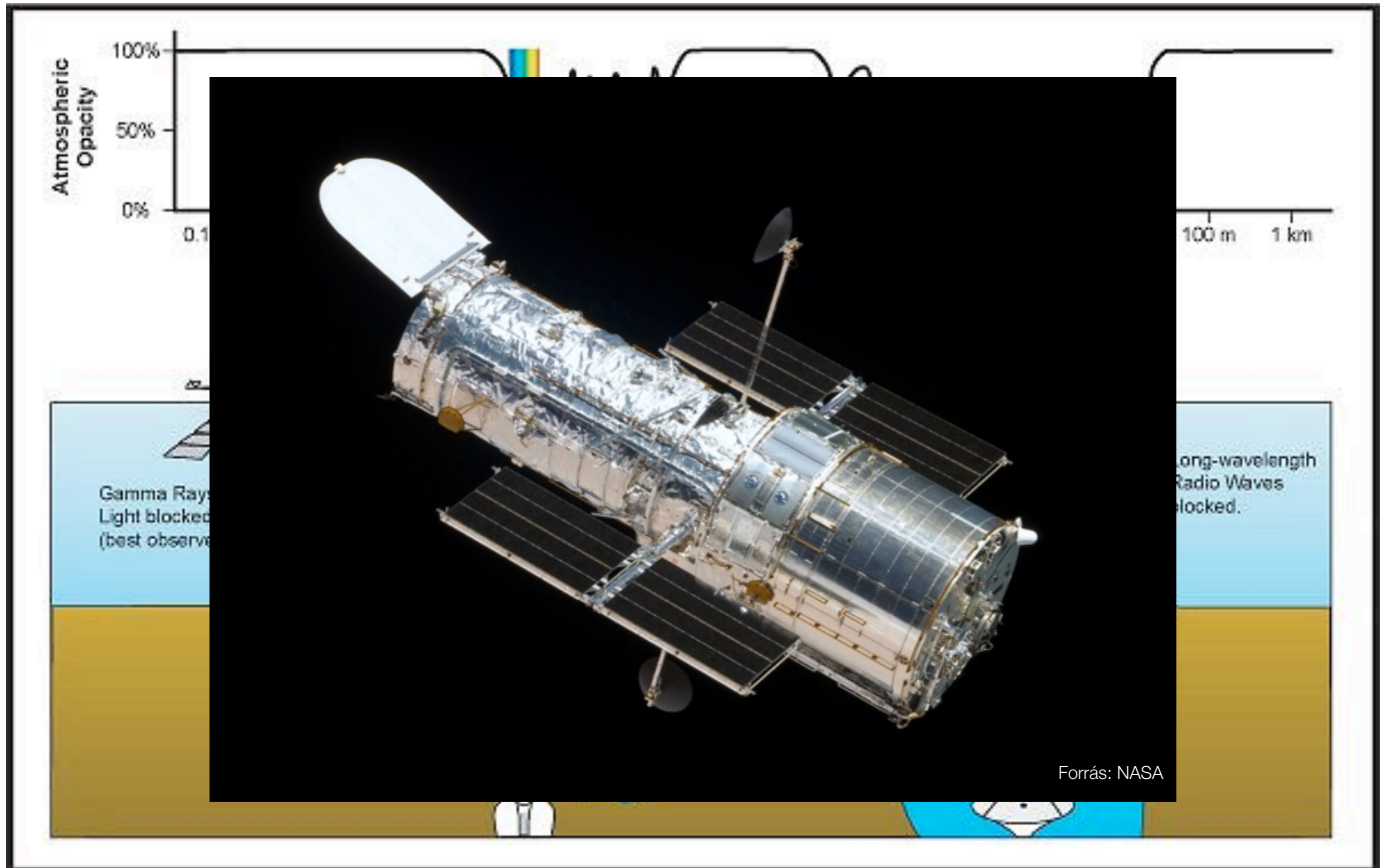
Hősugárzás - infravörös csillagászat

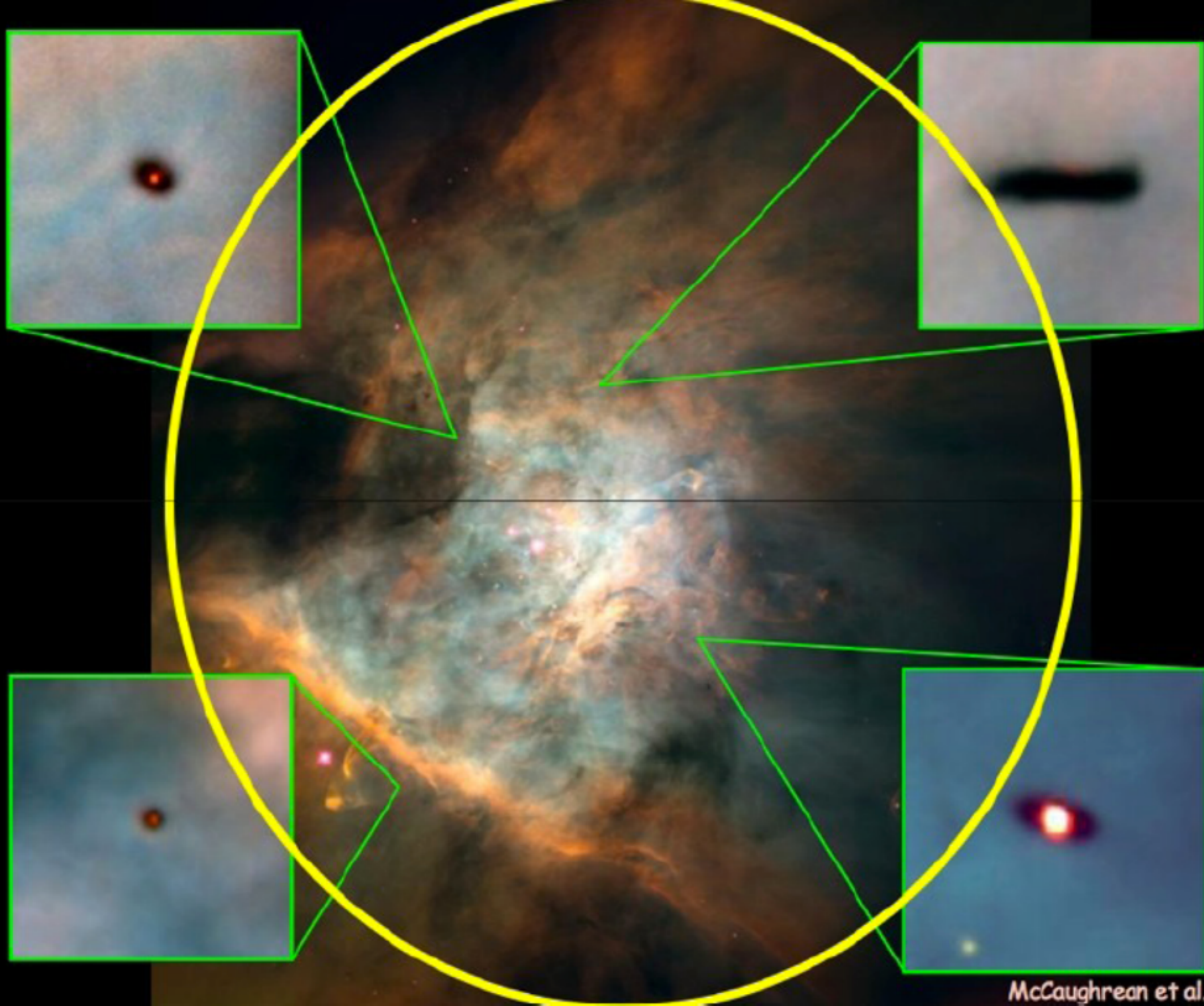


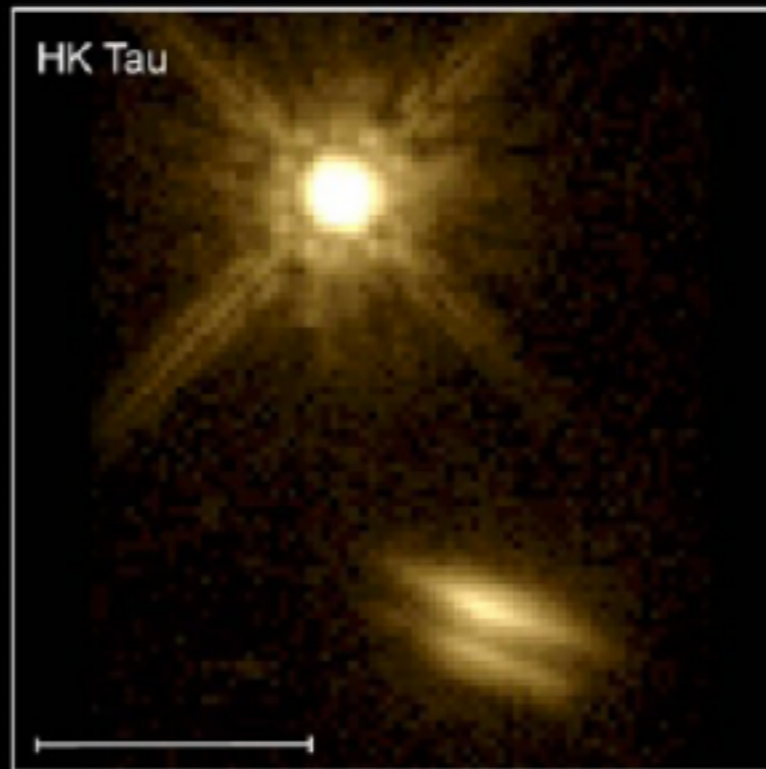
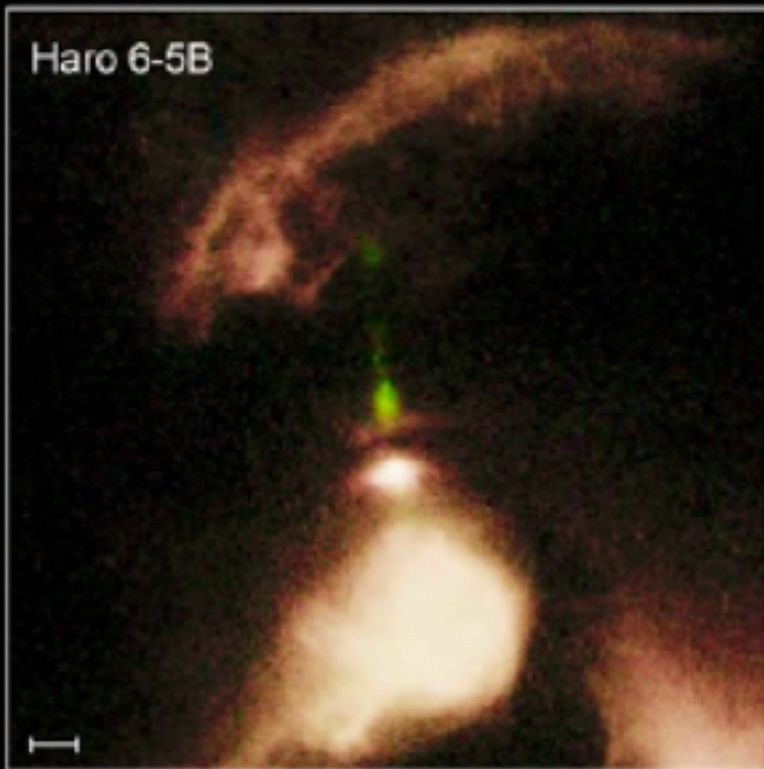
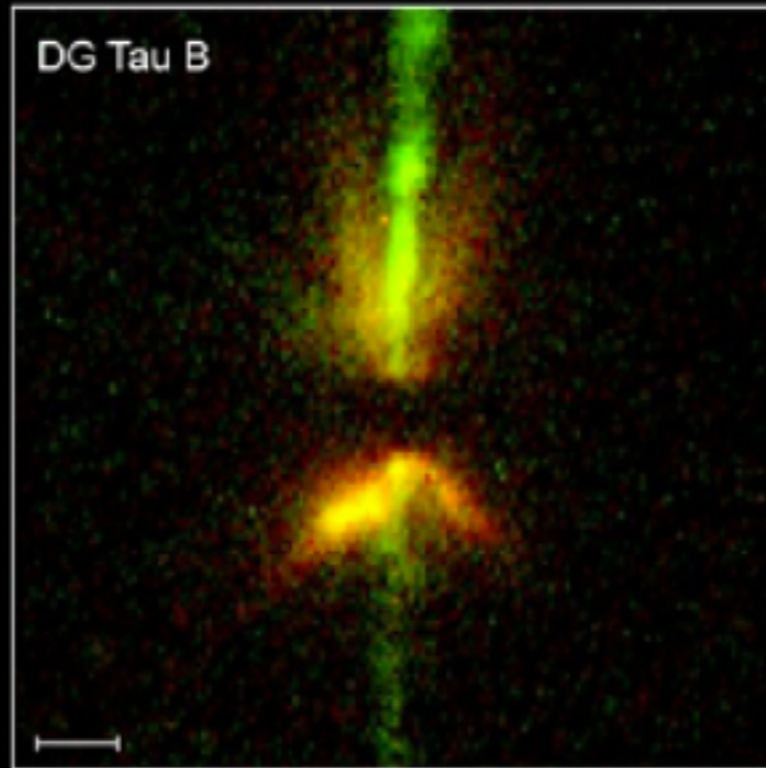
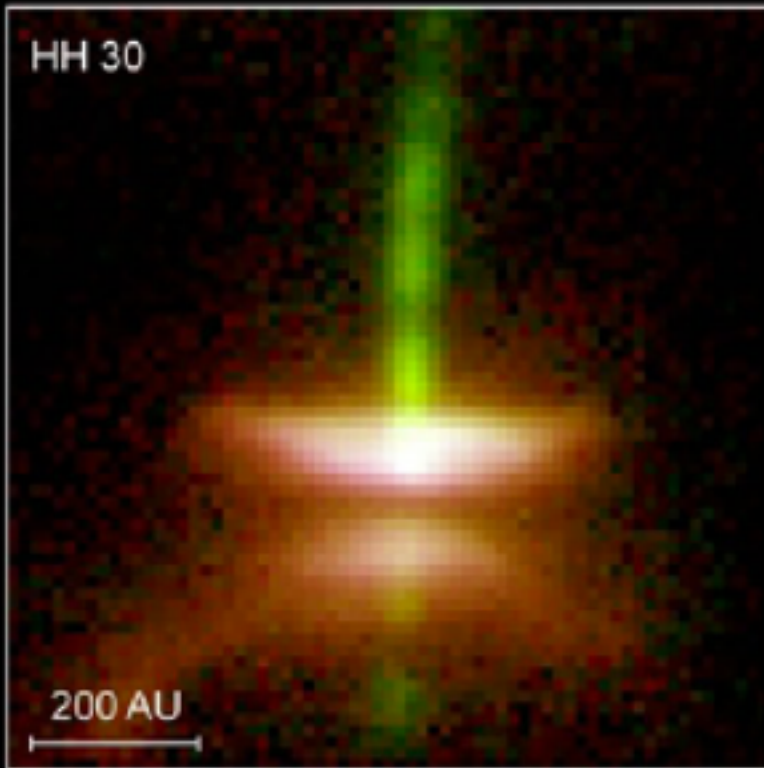
Légköri áteresztés



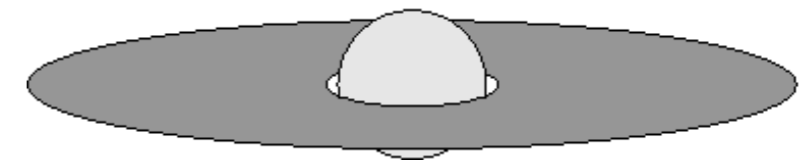
Hubble-űrtávcső (1990 -)







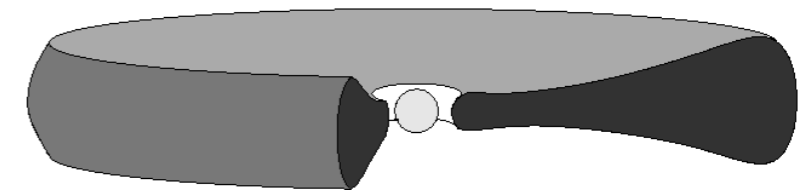
Disks around Young Stars
Hubble Space Telescope • WFPC2



A korongok lehetnek akár:

- lapos korongok
- trapézkorongok

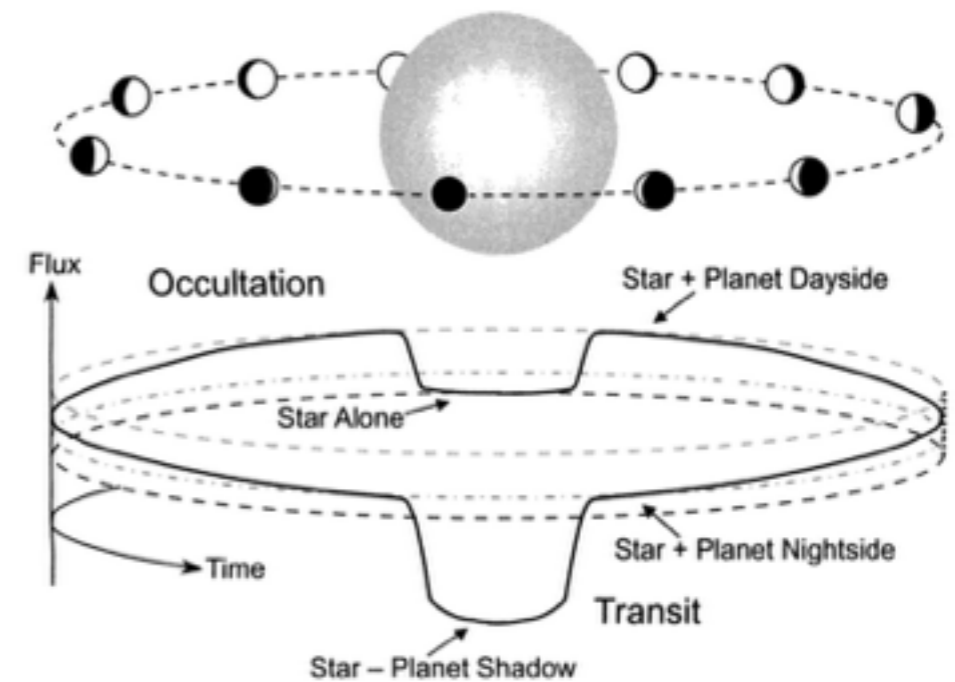
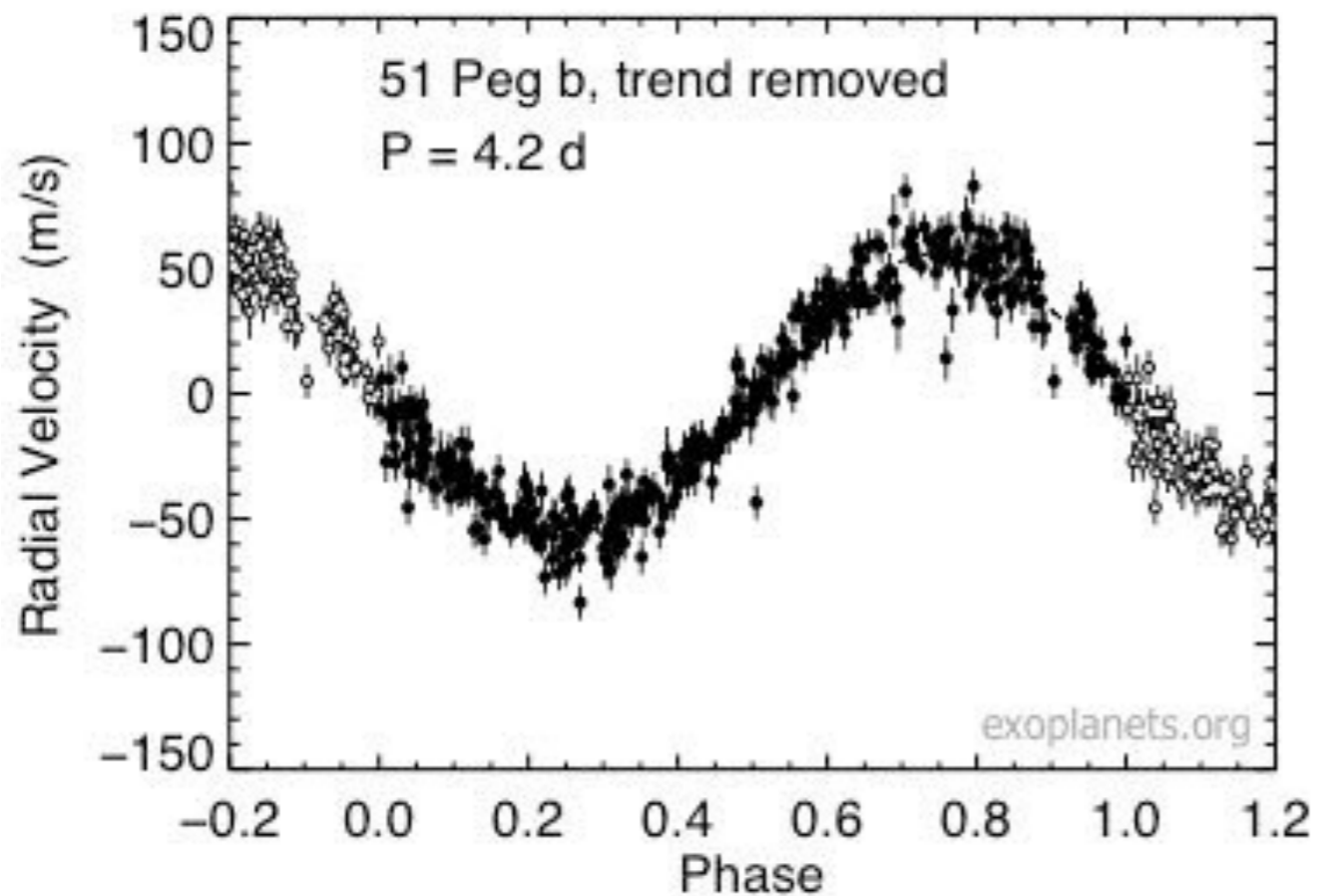
(Kóspál Á., ELTE diplomamunka, 2004)



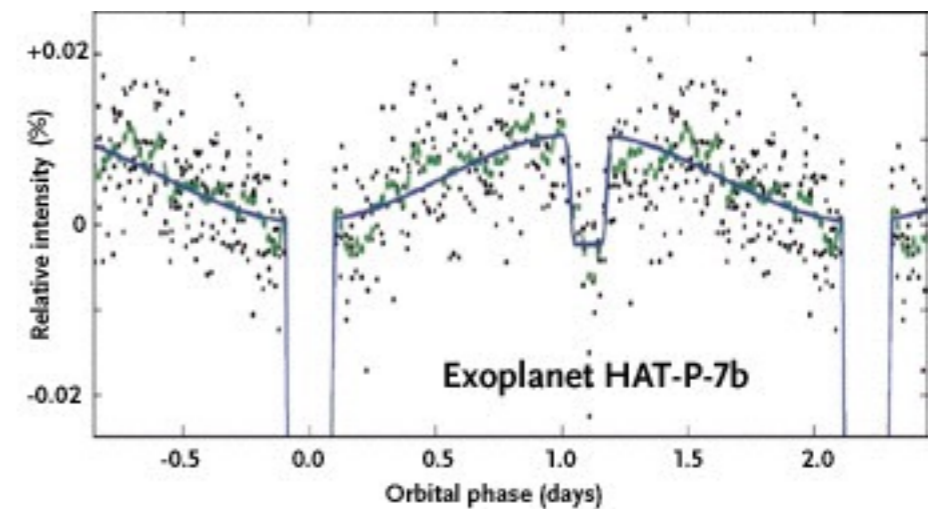
Exobolygó-rendszerek

51 Pegasi b: az első exobolygó Naphoz hasonló csillag körül (Mayor & Queloz, 1995)

- látóirányú sebességváltozás Doppler-effektusból
- bolygófedés (tranzit)

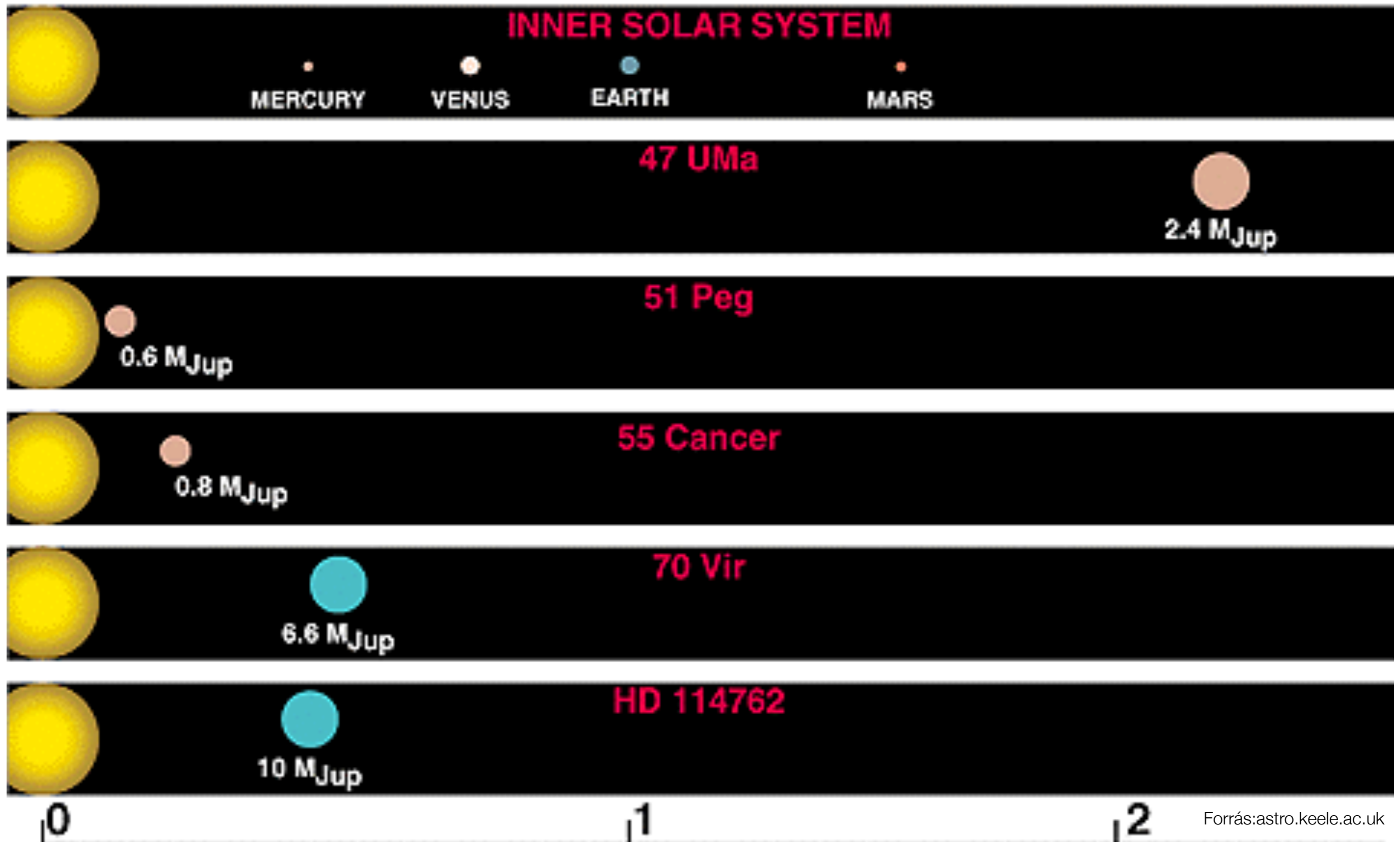


Forrás: Josh Winn



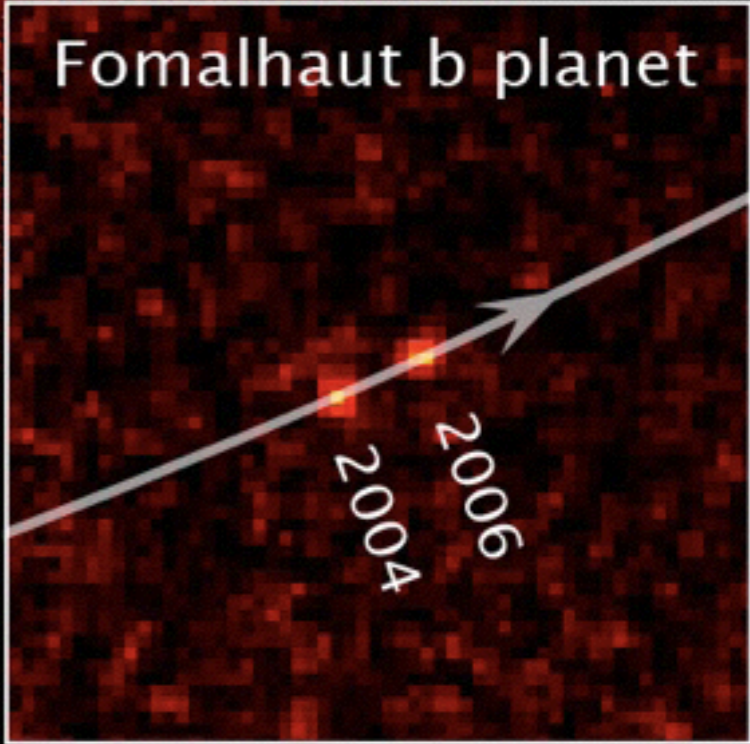
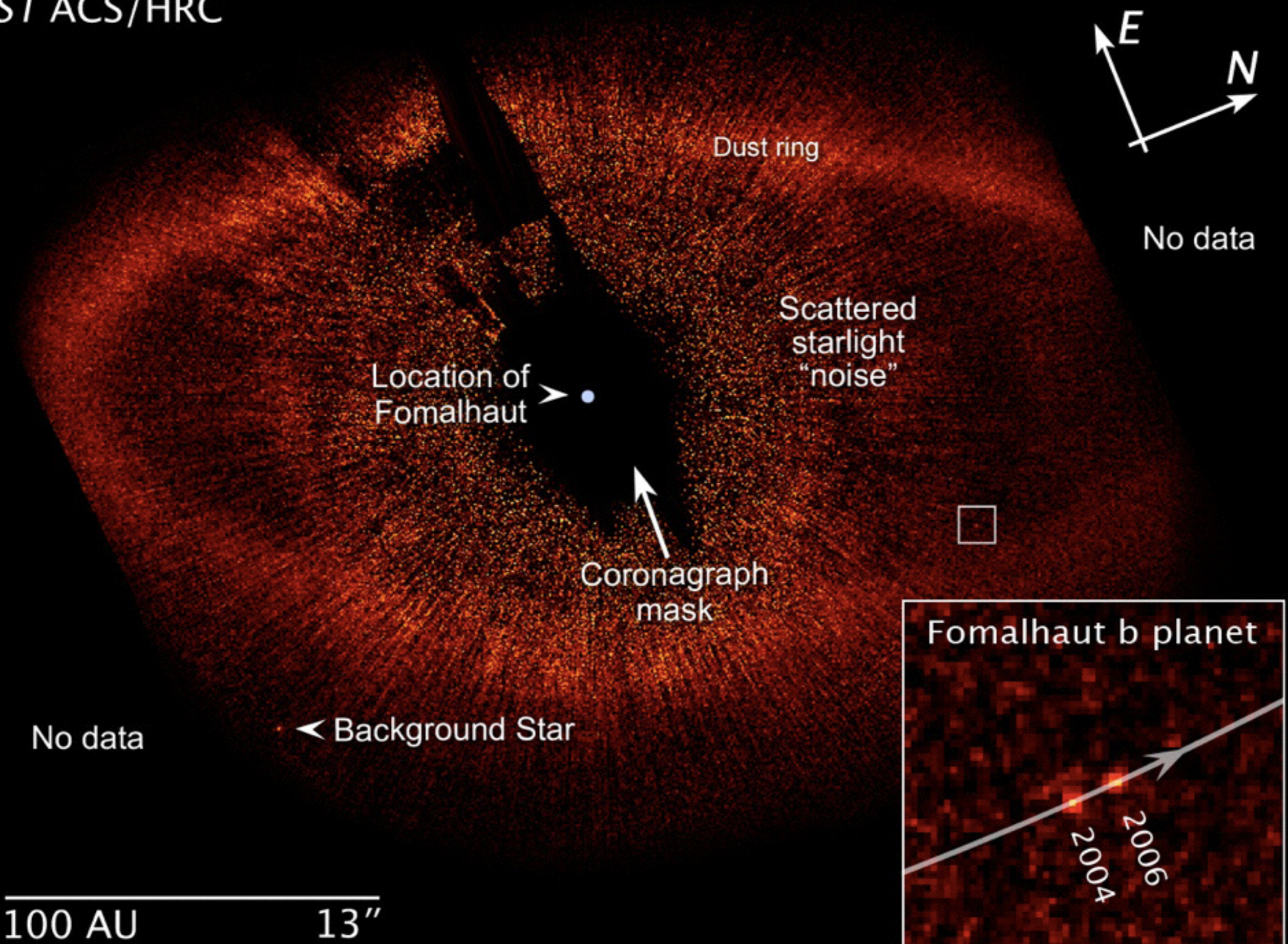
Forrás: Sky & Telescope

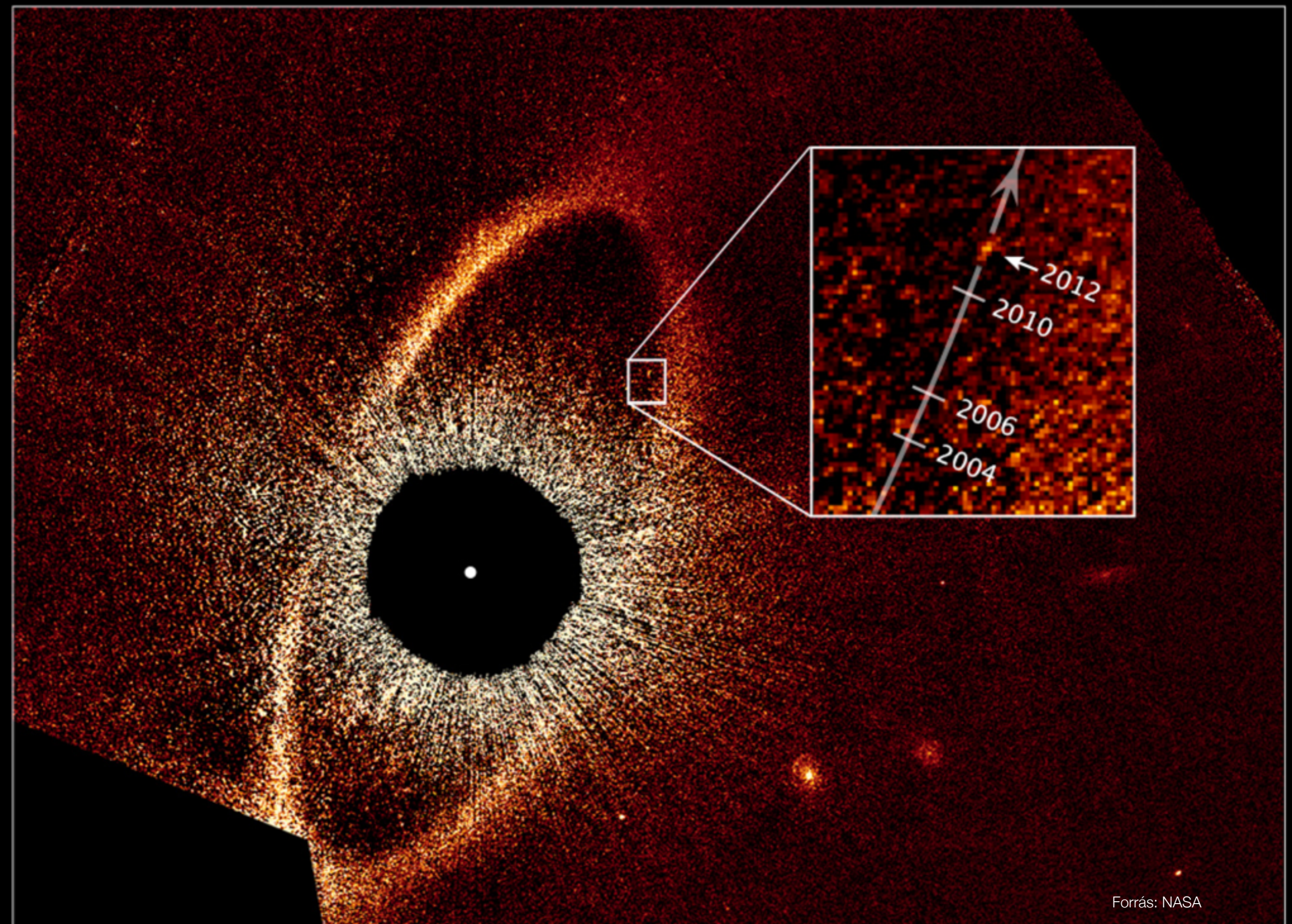
Bolygórendszerek



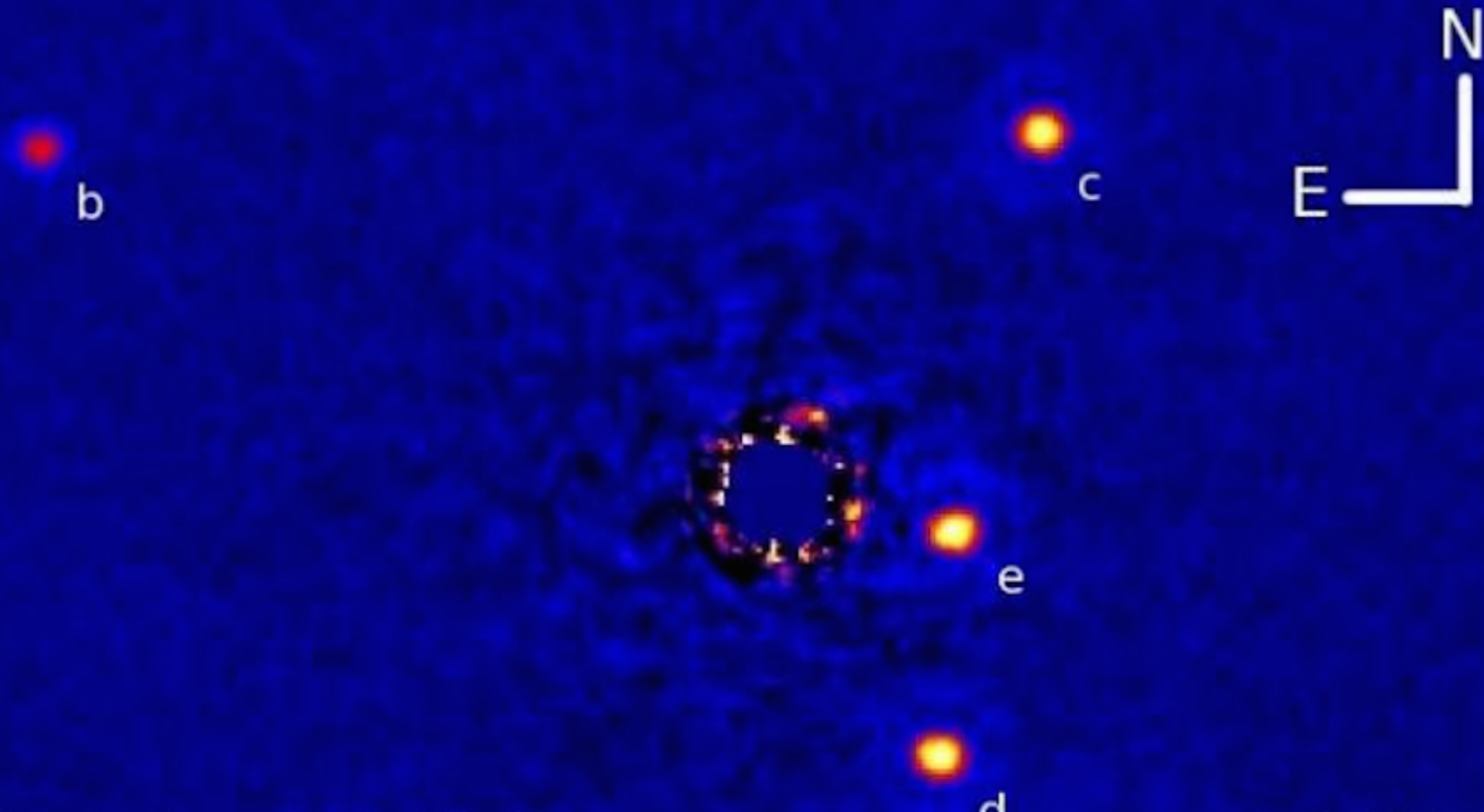
Fomalhaut

HST ACS/HRC





HR 8799 “családfotó”



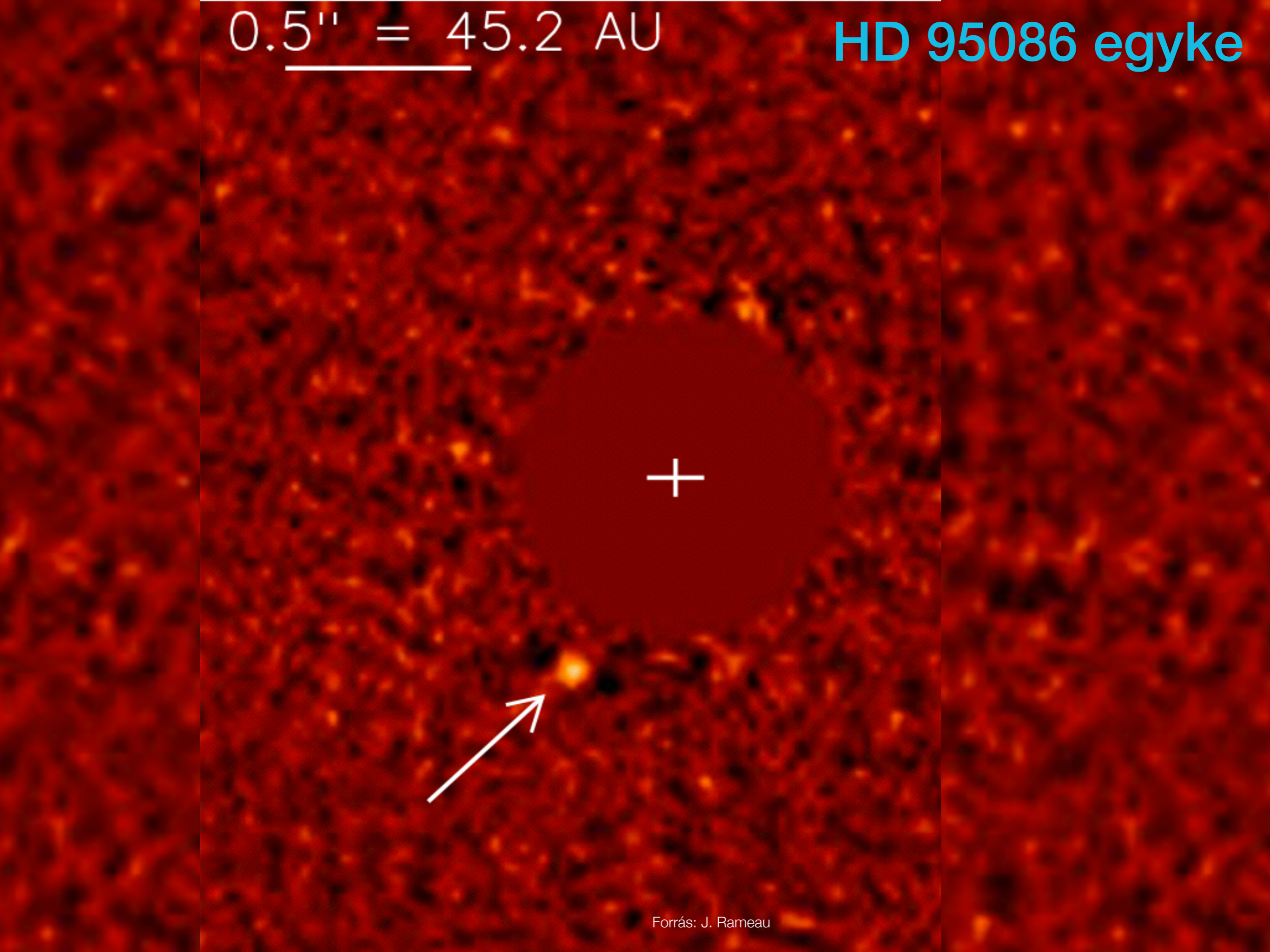
October 30, 2012
Keck/NIRC2 Lp

Forrás: Keck Observatory

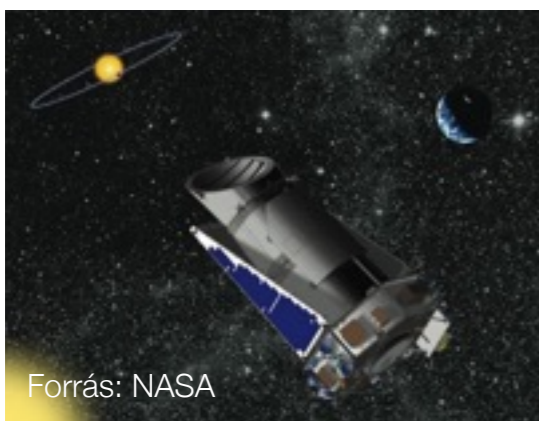
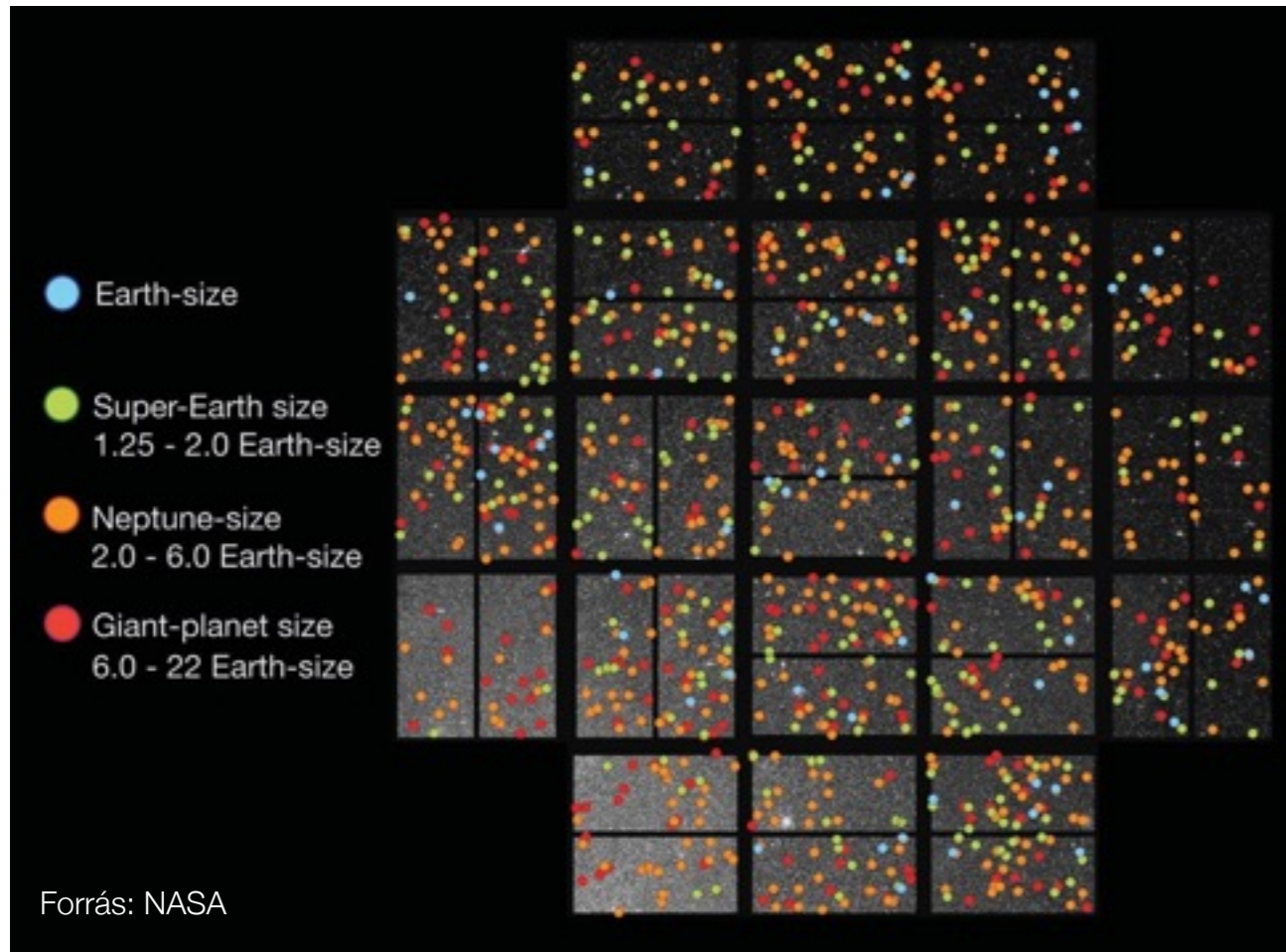
20 AU
0.5"

0.5'' = 45.2 AU

HD 95086 egyke



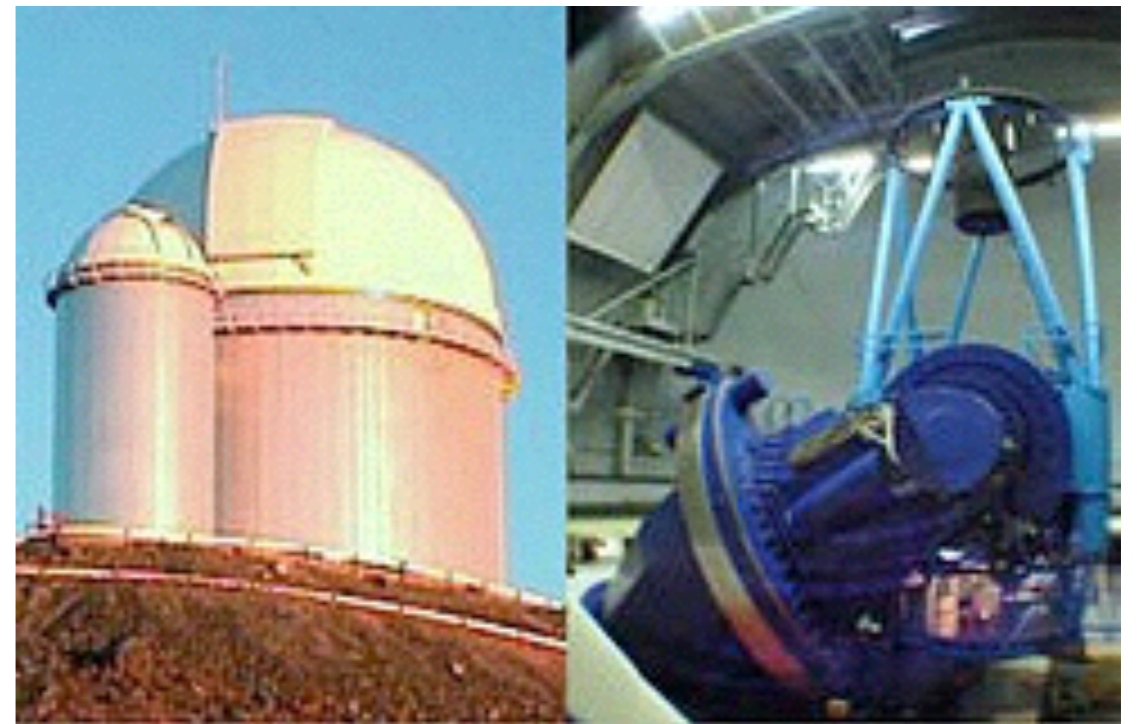
Az exobolygórendszerek számossága...



Forrás: NASA

NASA Kepler űrtávcső
(0.0001% fényváltozás)

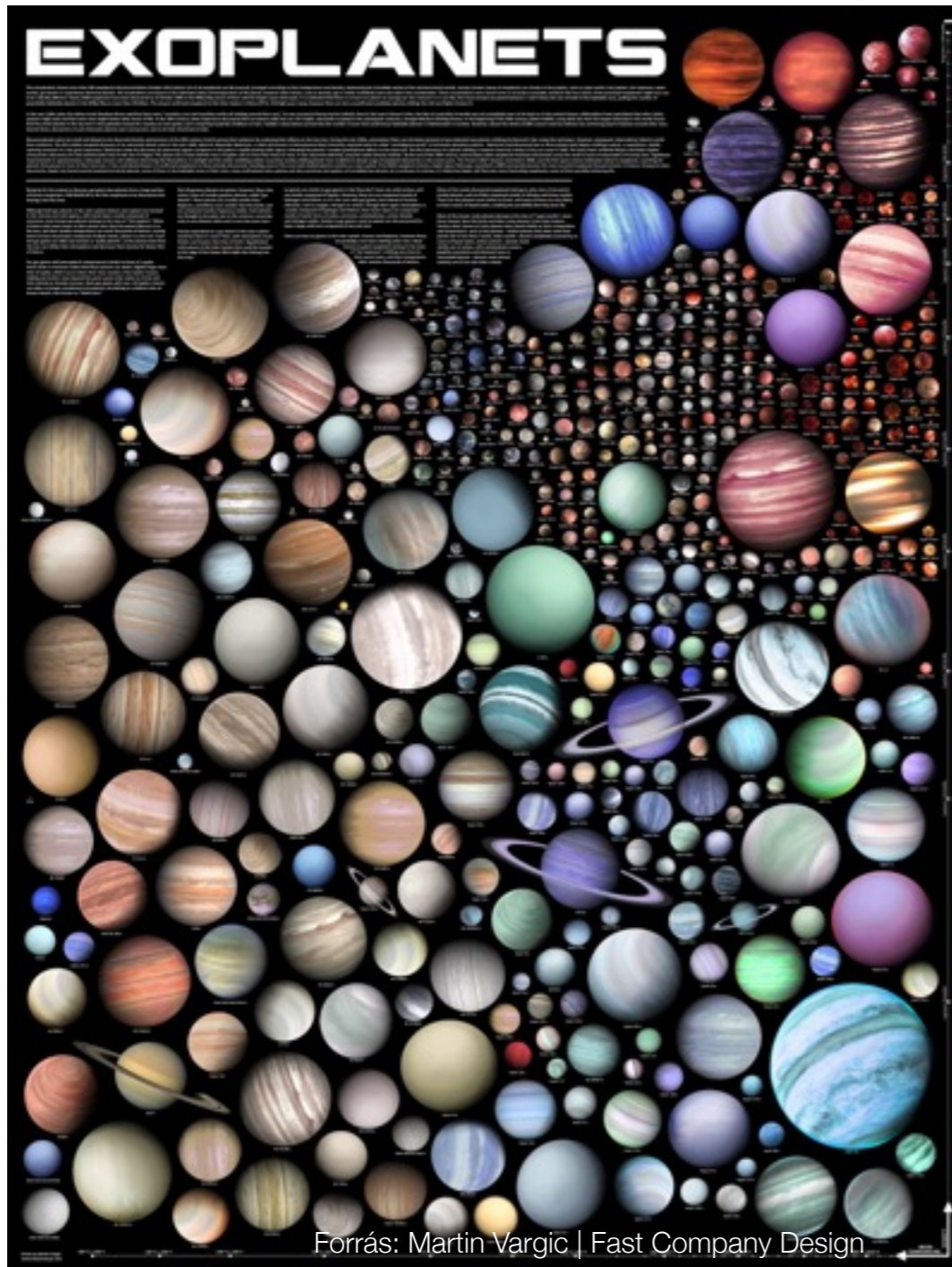
Összes exobolygó 3414
Tranzit mérésből: 2679
Látóirányú sebesség: 611
Közvetlen képalkotás: 44



Forrás: Wikipedia

HARPS spektrográf (Chile) - 30 cm/s

Az exobolygórendszerek változatossága...



Forrás: Martin Vargic | Fast Company Design

Napközeli “Forró Jupitererek/Neptunuszok”,
Szuperföldek

Excentrikus pályák

Sűrűn telepakolt bolygórendszerek
(Kepler-11 hat bolygóval)

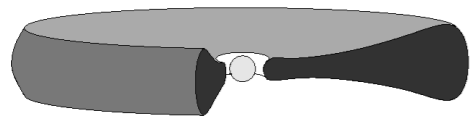
Bolygók rezonáns pályákon (pl. Gliese
876e,b,d - 1:2:4)

Bolygók nagy naptávolságra (HR8799)

Szögben hajló vagy retrográd pályák

Bolygók többes rendszerekben (Kepler 16
b, Kepler-34 b, Kepler-35 b)

Miért *olyanok* a bolygórendszerek?

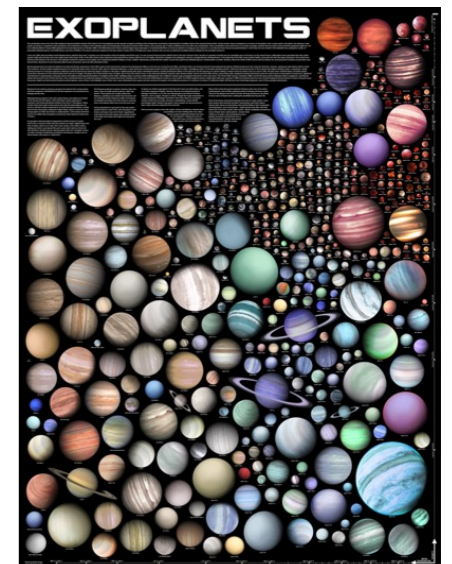


Miért olyan változatosak? Miért nem tudjuk megjósolni a bolygókeletkezés végeredményét?

Tipp: a (klasszikus) fizika miatt! Sok nagyságrendnyi változás, nagyon sok hatás működik egyidejűleg. A fizika klasszikus, de hogy mi játszik valóban szerepet, nehéz kérdés.

Tipp: a korong miatt! Változatosabb, mint gondoljuk, és végeredményben ez határozza meg a folyamat kezdőfeltételeit.

Tipp: a környezet (szupernóva szennyezés, kettősség, a csillag sugárzási és mágneses tere, csillagszele, kitörése...)



Az a fizika...

“A csillagkeletkezés folyamata során a sűrűség 10^4 cm^{-3} -ről 10^{24} cm^{-3} -re változik, szerepet játszik benne a természetben megismert valamennyi erő, megfigyeléséhez használni kell a teljes spektrumot, és tanulmányoznunk kell a Naprendszerben fellelhető primitív anyagokhoz.” (Shu 1993)

Csillagközi felhőmag

$$n \sim 10^5 \text{ cm}^{-3}$$

$$T \sim 10\text{-}30 \text{ K}$$

$$R \sim 10^{17} \text{ cm}$$

$$B \sim 20\text{-}30 \text{ mikroGauss}$$

$$\text{Szögsebesség} \sim 3 \times 10^{-14} \text{ rad s}^{-1}$$

(egy fordulat 7 millió év)

Fiatal csillag

$$n \sim 10^{23} \text{ cm}^{-3}$$

$$T \sim 10^6 \text{ K}$$

$$R \sim 10^{11} \text{ cm}$$

$$B \sim 1 \text{ kiloGauss}$$

$$\text{Szögsebesség} \sim 10^{-5} \text{ rad s}^{-1}$$

(egy fordulat: 1 hét)

Bolygókeletkezés: a természetben megismert valamennyi erő + kémia + ásványtan +...

Extrém adaptív optika + ALMA

VLT/SPHERE



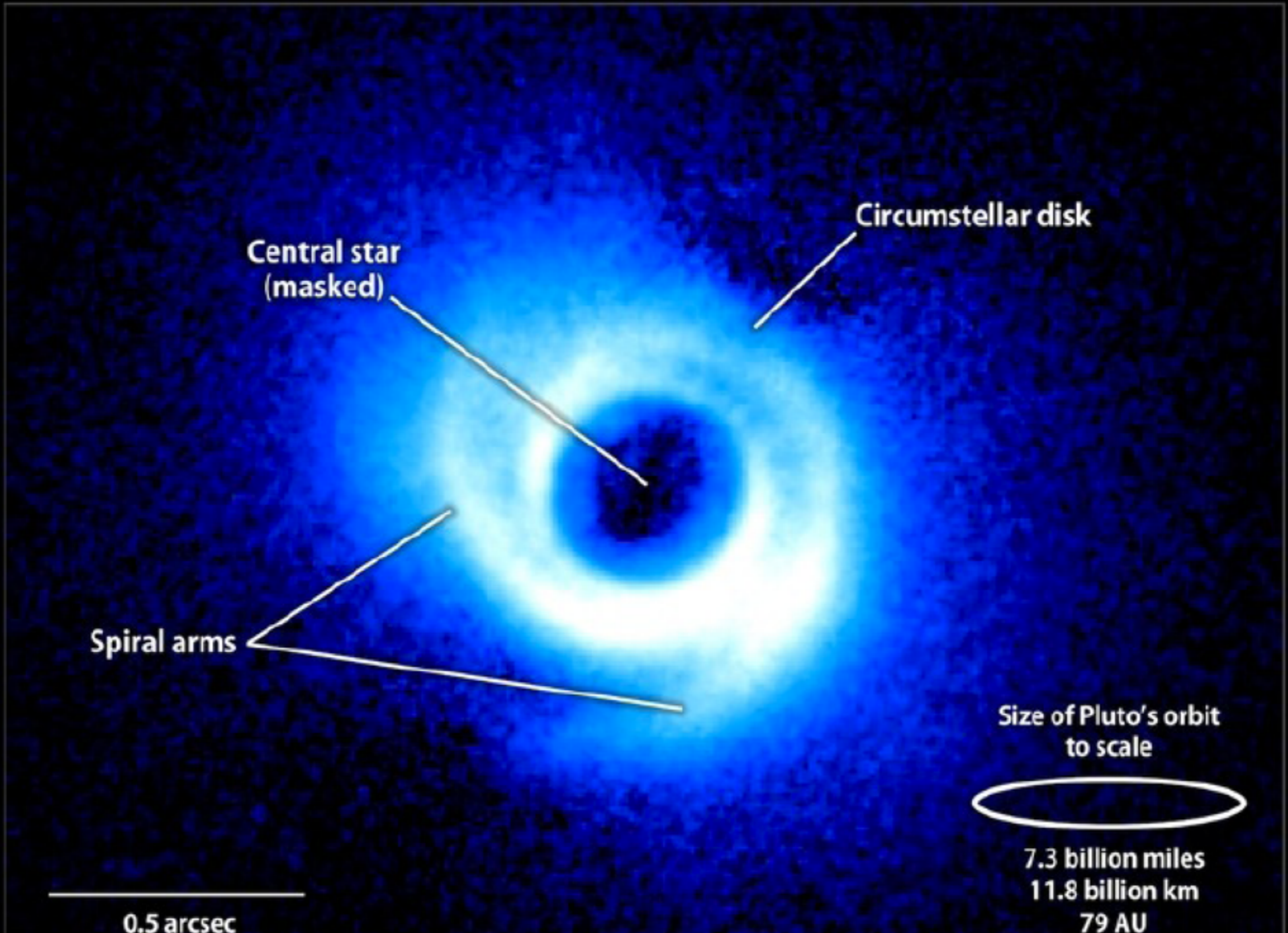
Forrás: ESO

ALMA

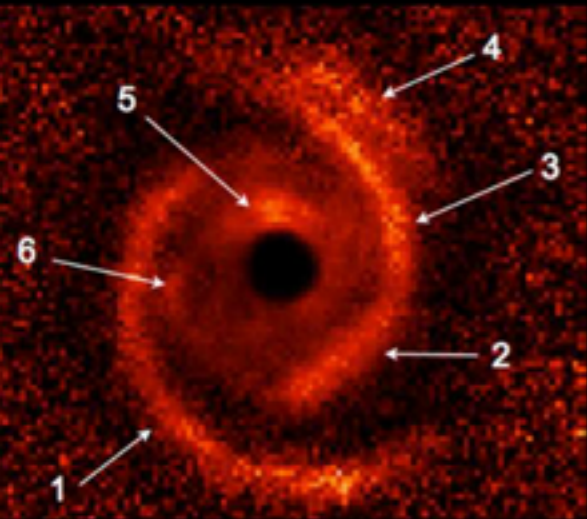


Forrás: space.com

Spiral features revealed in SAO 206462's dust disk

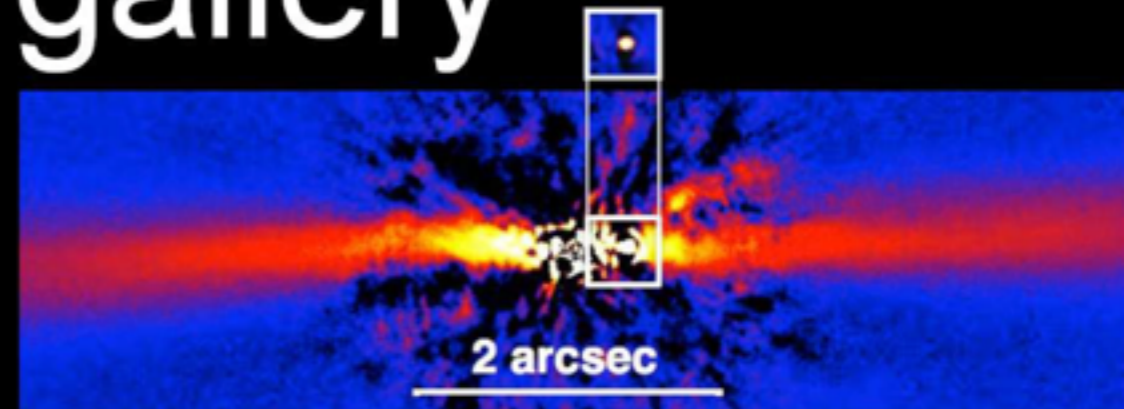


Sphere disk image gallery



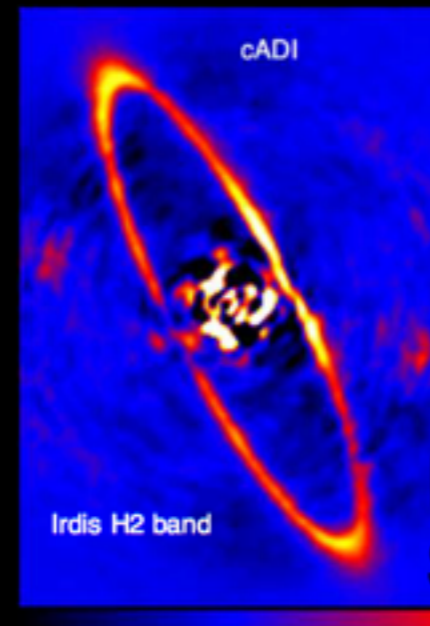
MWC 758
SVT

β Pic

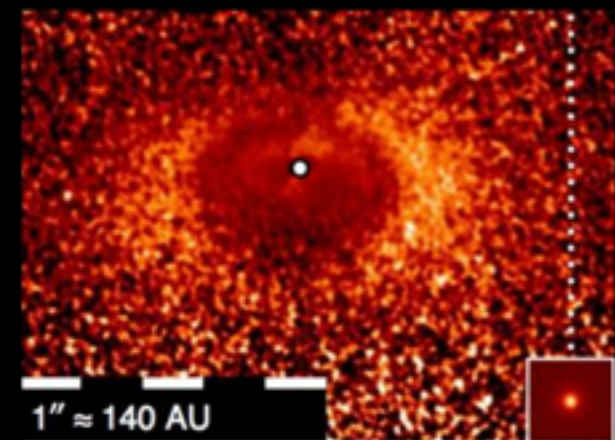
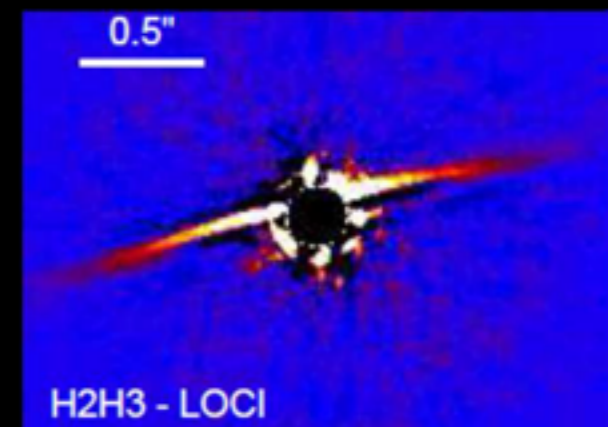


HD142527
COMM/GTO

HR4796A
COMM

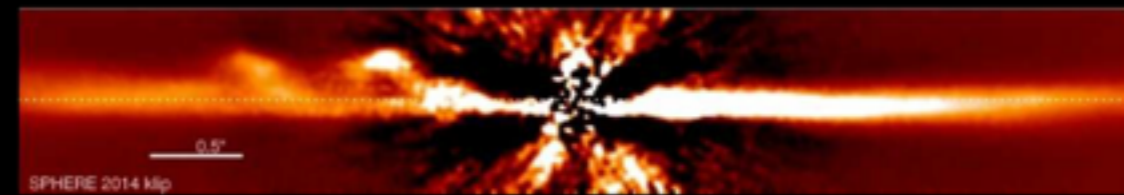


HD 106906
GTO

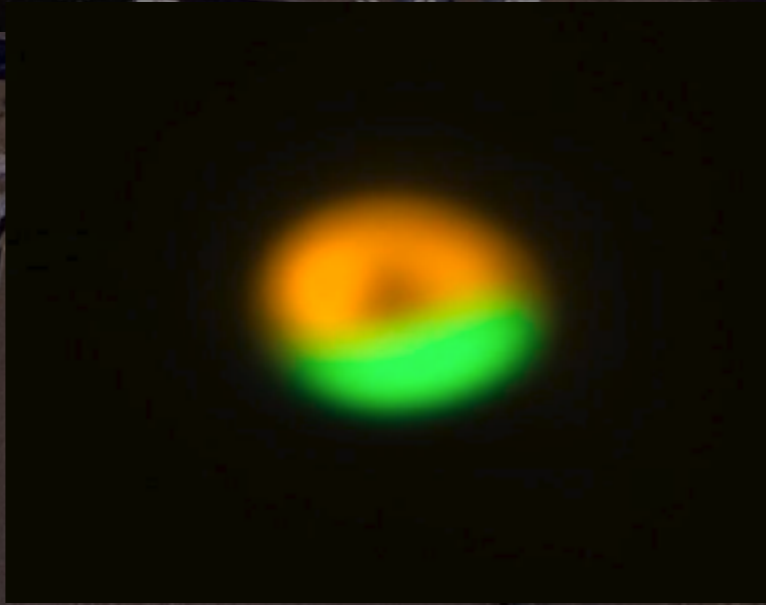
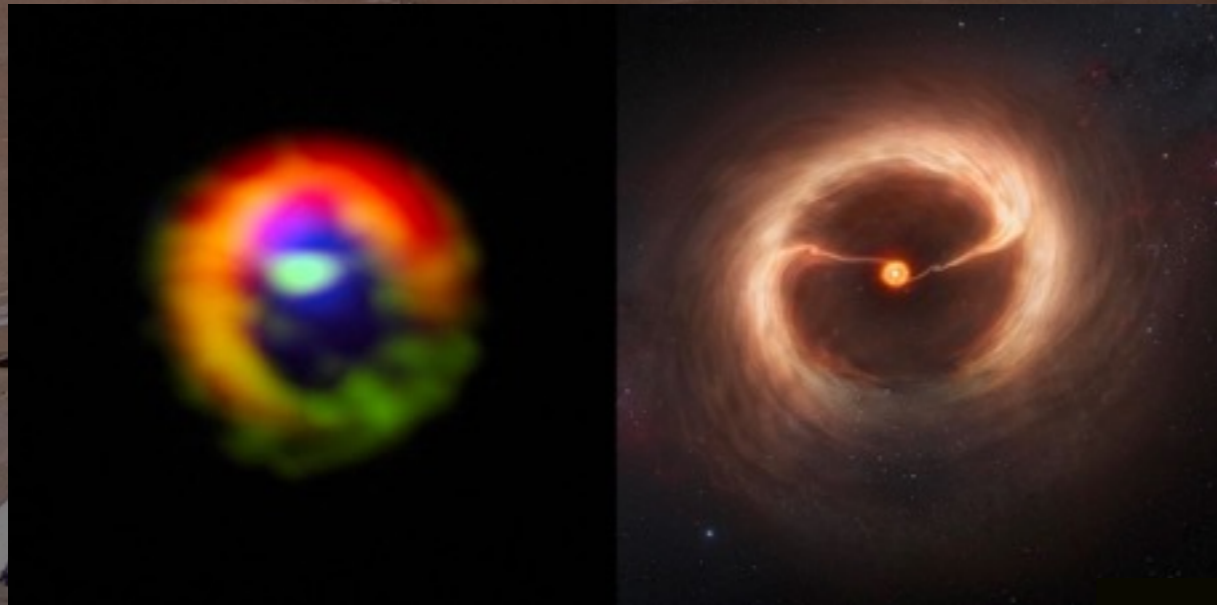
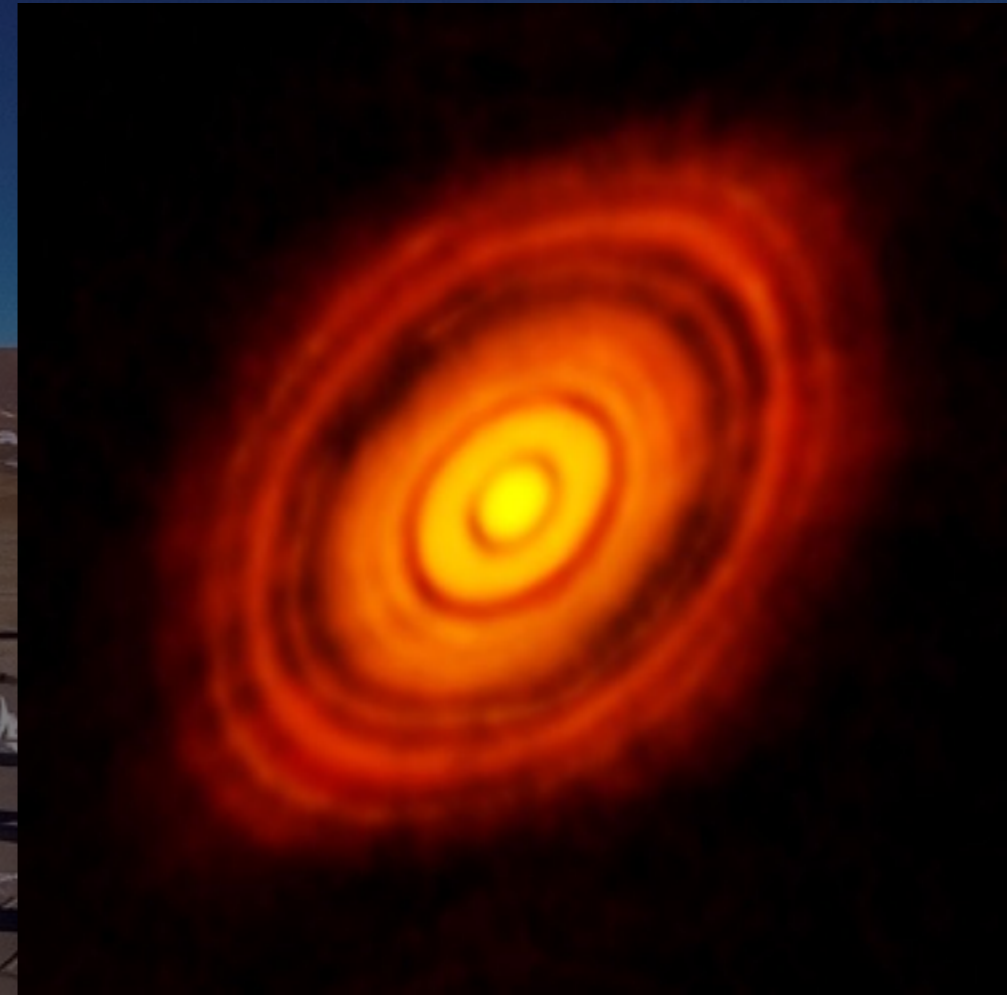
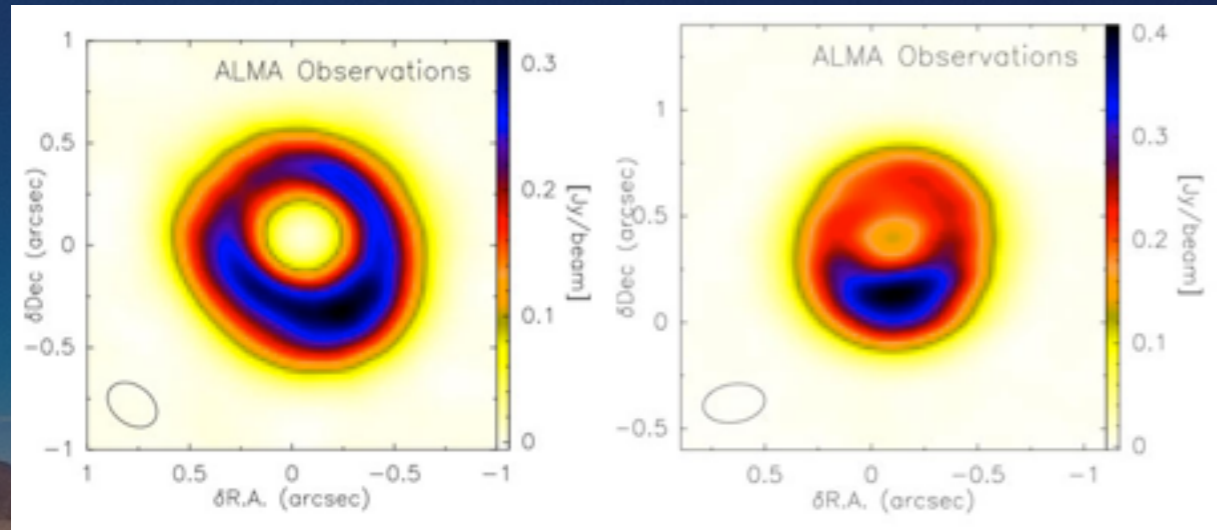


LkCa 15
SVT

AU Mic
COMM/GTO



Korongok az ALMA-val





The Ophiuchus star-forming region
Image Credit: NASA/JPL-Caltech/WISE Team

Elias 2-27 as seen by ALMA



Kuiper Belt orbit



Credit: B. Saxton (NRAO/AUI/NSF);
ALMA (ESO/NAOJ/NRAO); L. Pérez (MPIfR)

Akkreció: a perdületmegmaradás problémája

1 naptömegnyi anyag perdülete egy
10 CSE sugarú korongban: 3×10^{53}
 cm^2/s

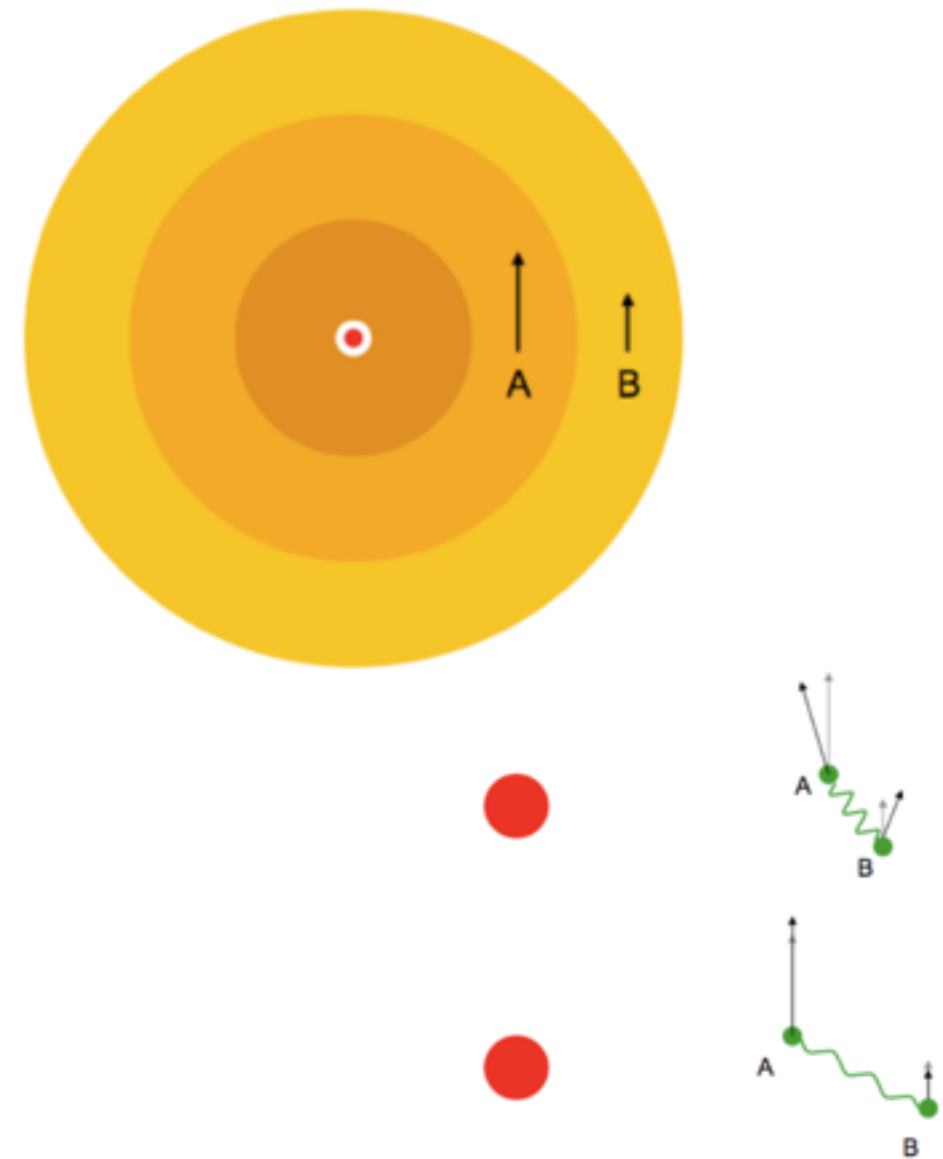
1 naptömegnyi anyag perdülete egy
napsugáron belül: $\ll 6 \times 10^{51}$ cm^2/s

50x csökkenés!!!!

Két elképzelés:

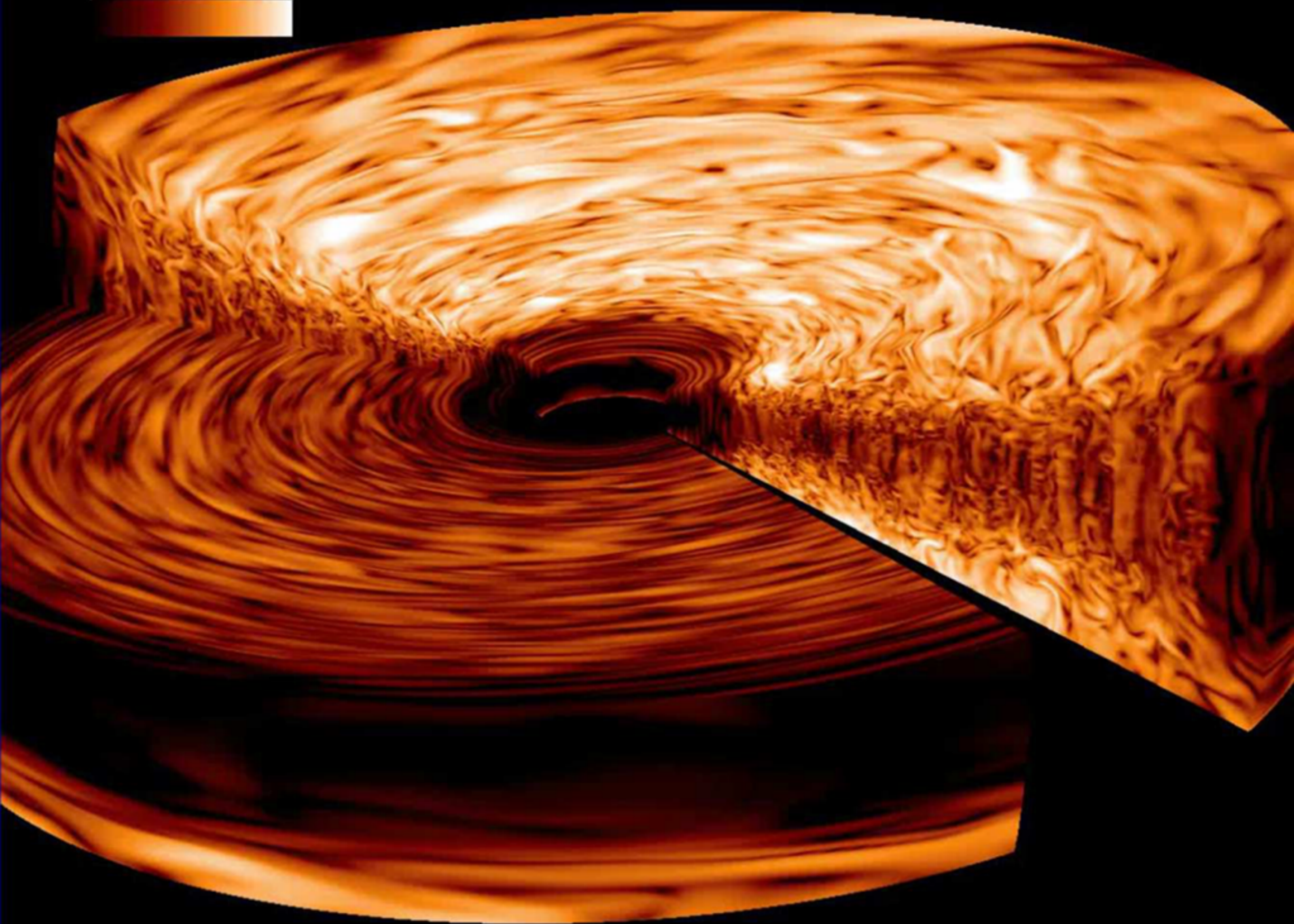
- csatolódás a külső térhez
(mágneses erővonalak)
- a korong külső része átveszi a
perdületet és eltávolodik

Perdületcsere nélkül nem megy!



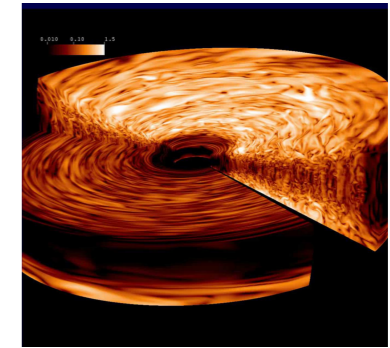
Forrás: Kees Dullemond

*Belső súrlódás egy korongban?!
turbulencia, magneto-rotációs
instabilitás,...*

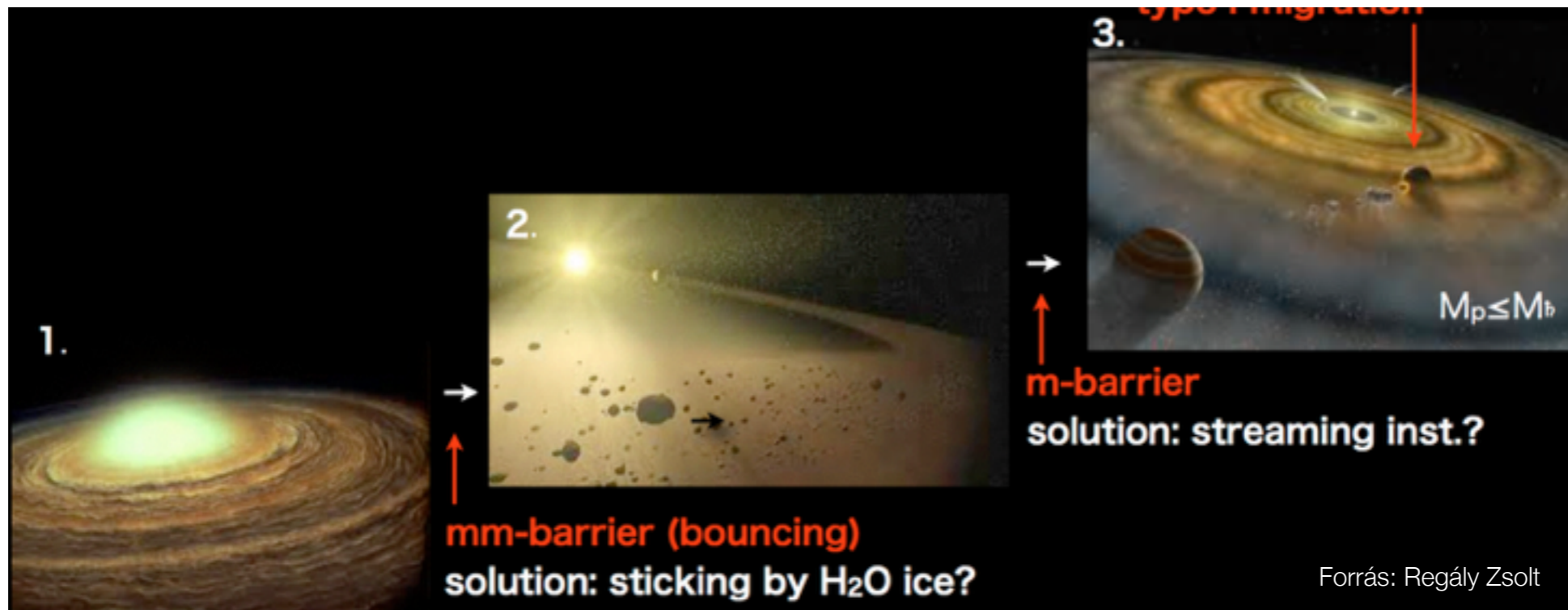


A por lecsatolódáása

A gáz spirálpályán halad befelé, azonban a kifelé mutató nyomásgradiens miatt szub-kepleri sebességgel. A mikroszkópikus méretű (~mikrométer) por vele elkeveredve követi. De ebből nem lesznek bolygók...

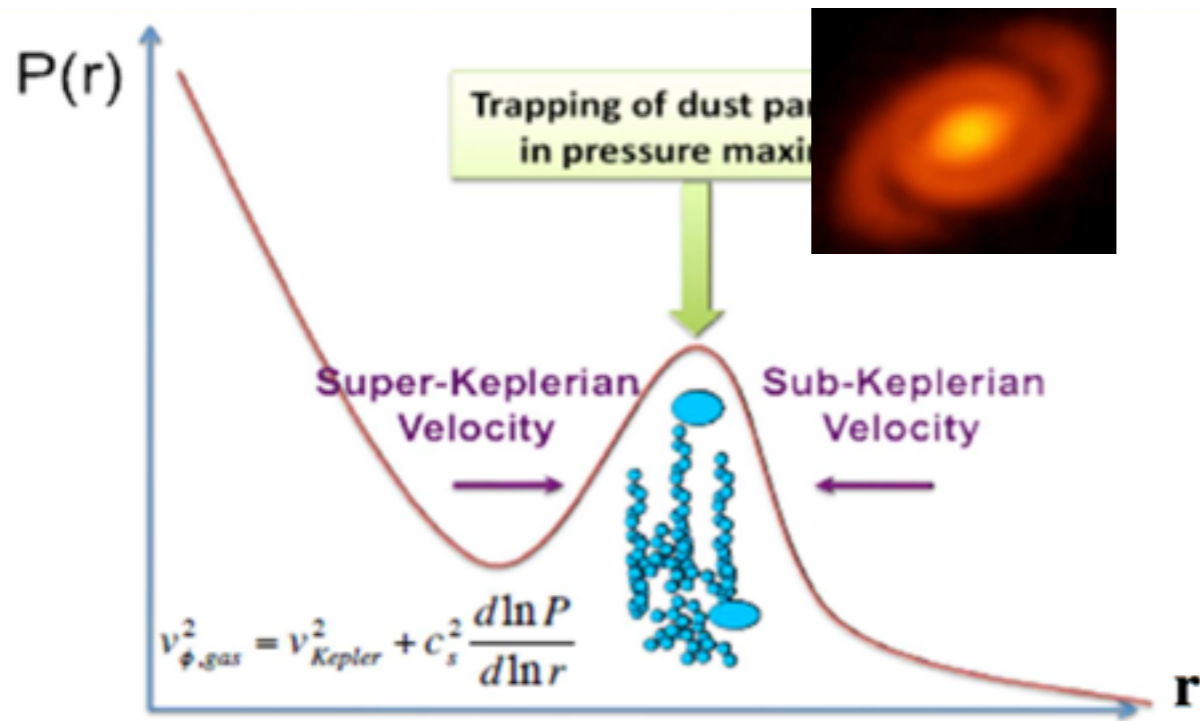


Porszemcsék összetapadása



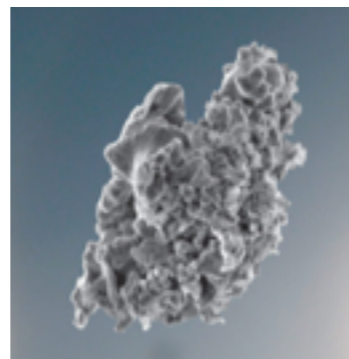
Forrás: Regály Zsolt

A méteres határ leküzdése



Forrás: Thomas Henning

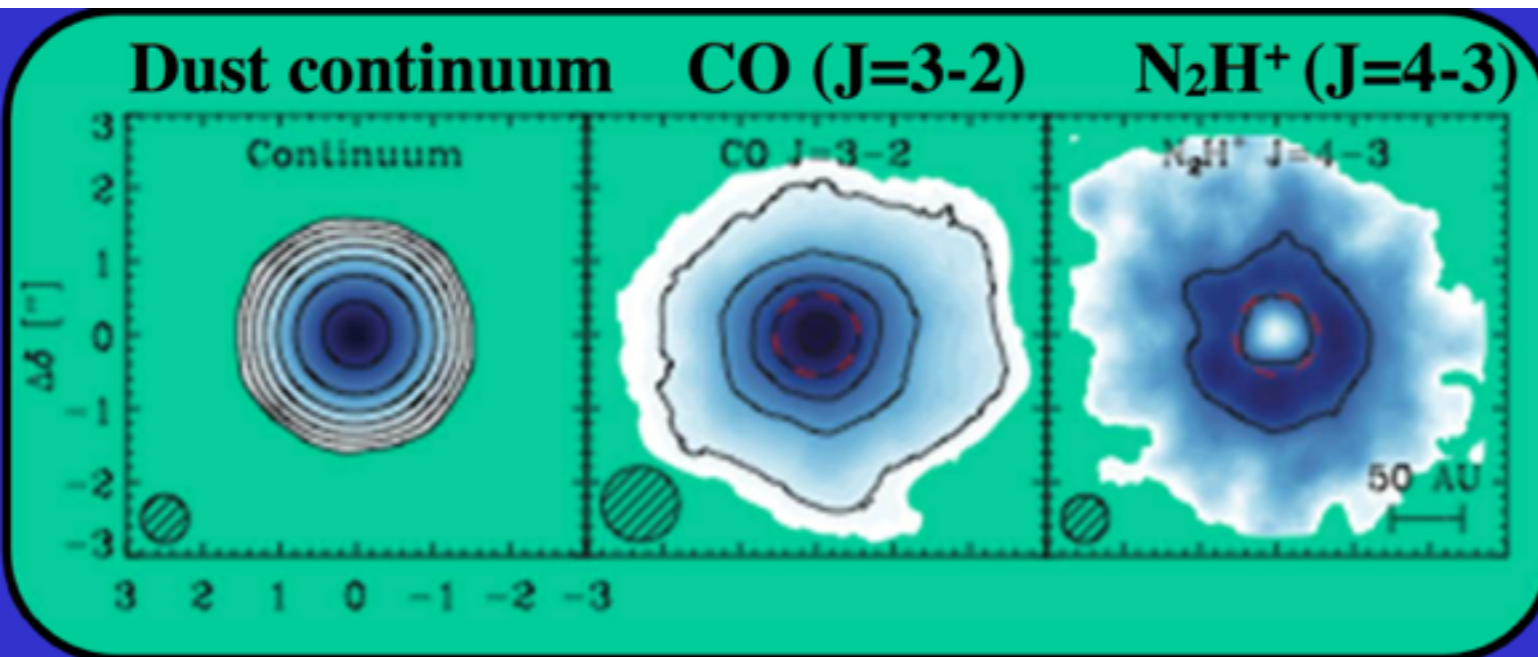
*Nyomásmaximum-csapdák
lassítják a behullást*



Forrás: Bertram Bitsch

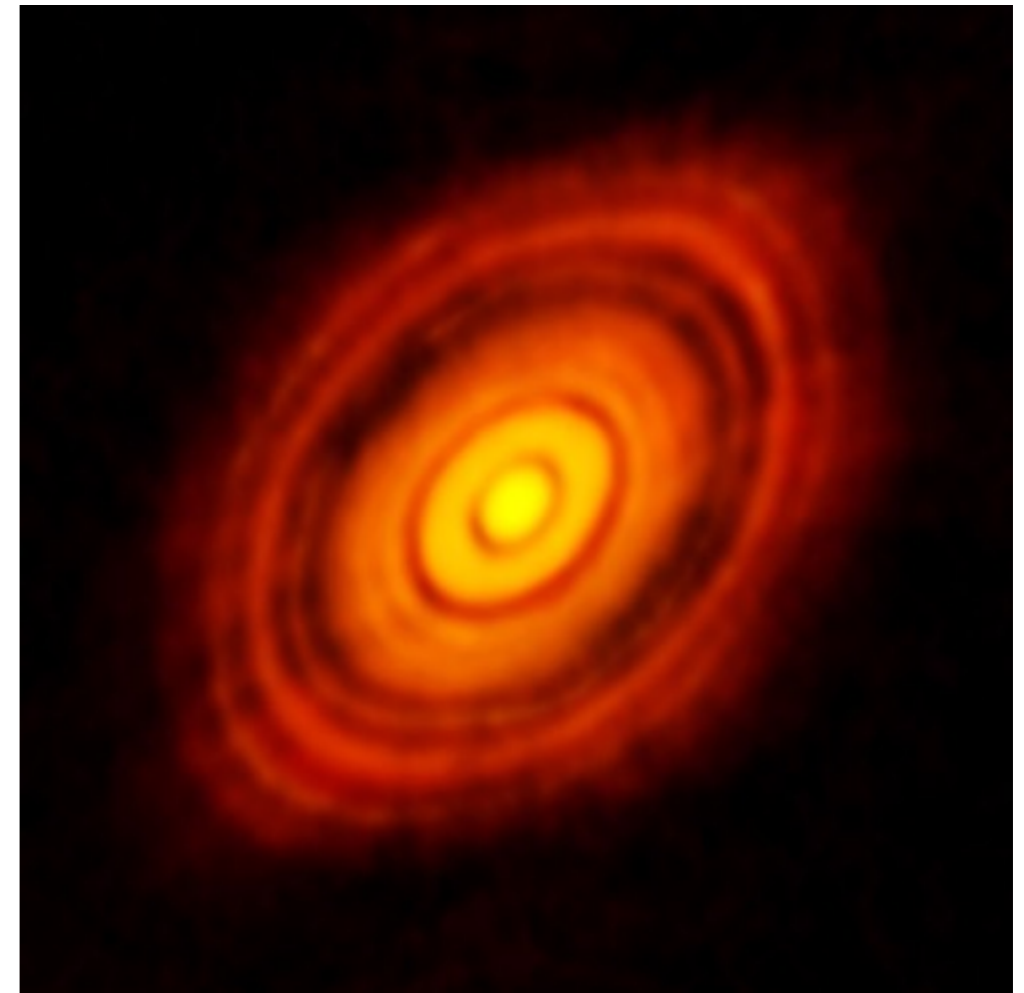
*Kavics (pebble)-akkréció:
hatékony és gyors*

Hóhatár a korongban



Forrás: Thomas Henning

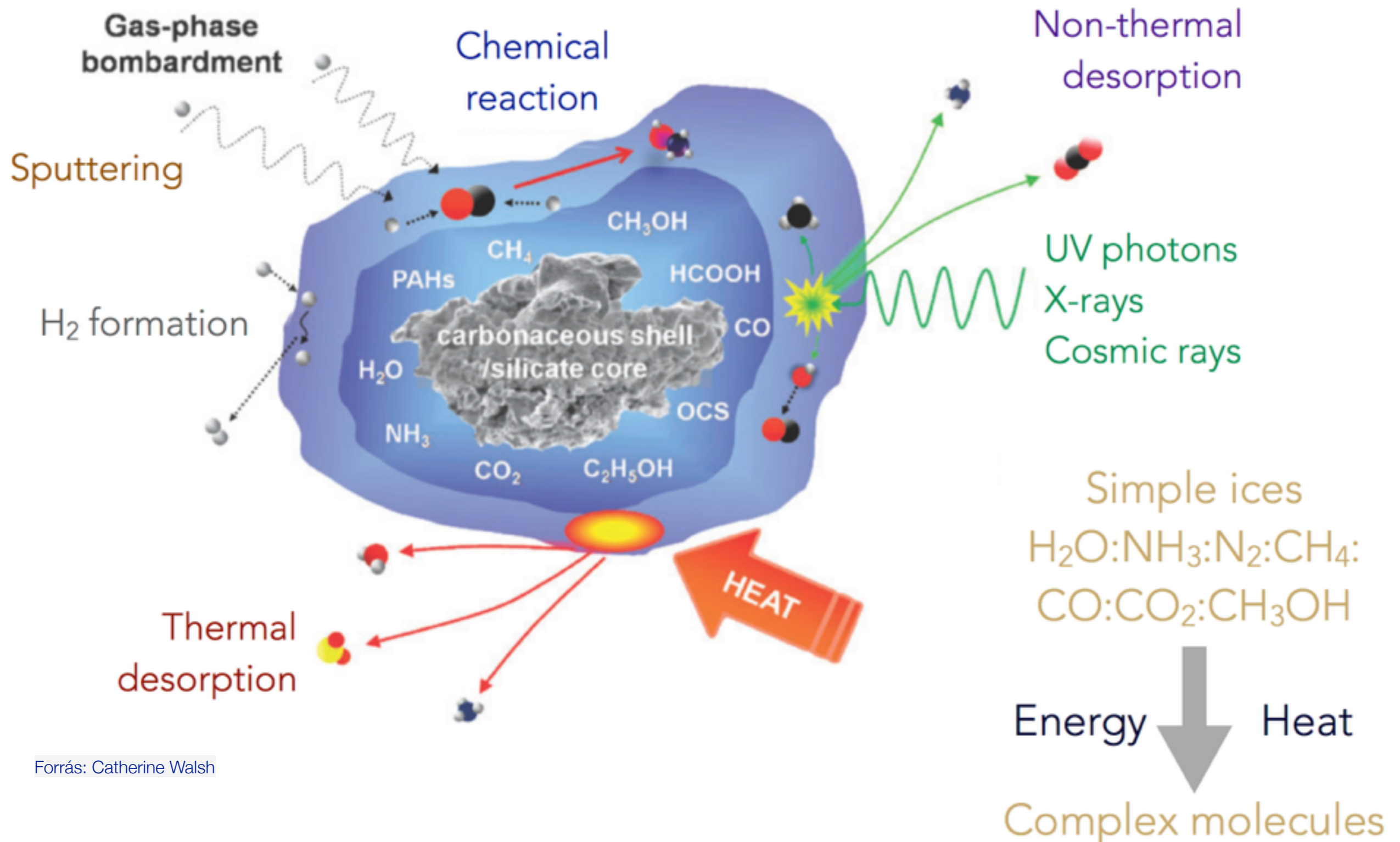
Az N₂H⁺ és a CO molekula anti-korrelál:



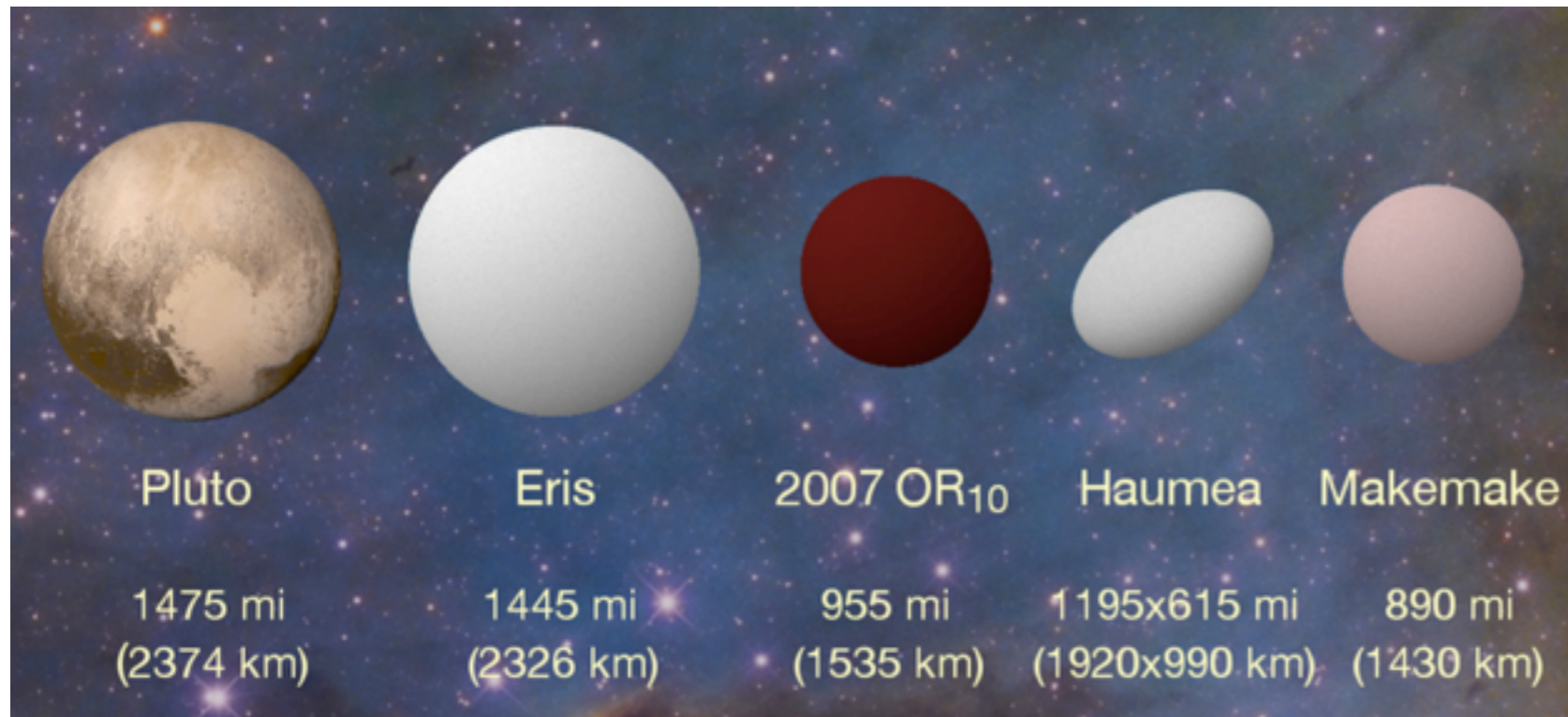
HL Tauri ALMA képe

A hóhatár mögött a porszemcséken jégköpeny képződik, nagyobbak, “nedvesebbek”, jobban tapadnak ütközéskor, több fényt nyelnek el, gázt visznek magukkal a bolygóba

Kémiai folyamatok a korongokban



Bolygócsírák, planetezimálok

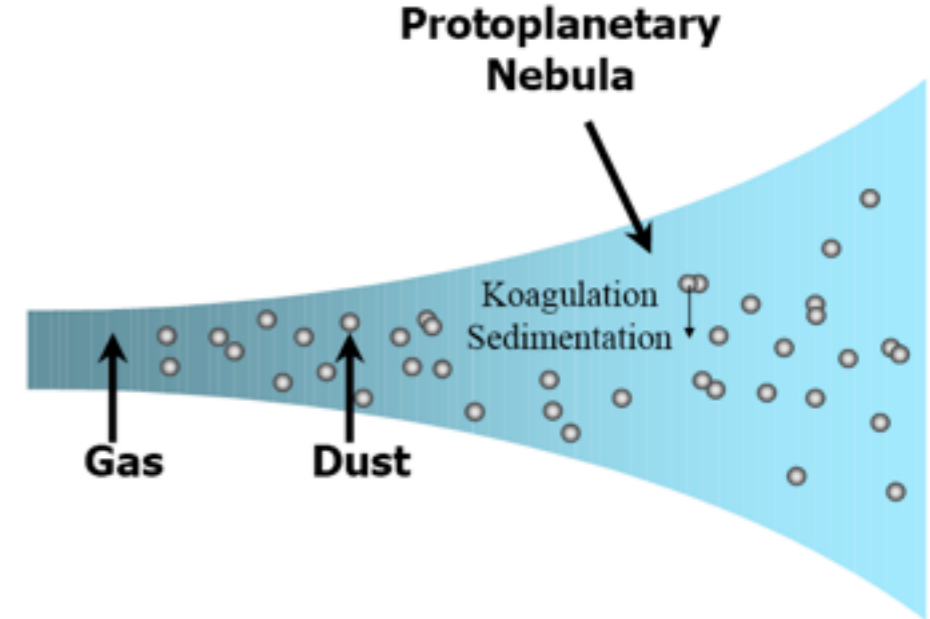


Forrás: space.com



Forrás: ESA

A bolygók születése

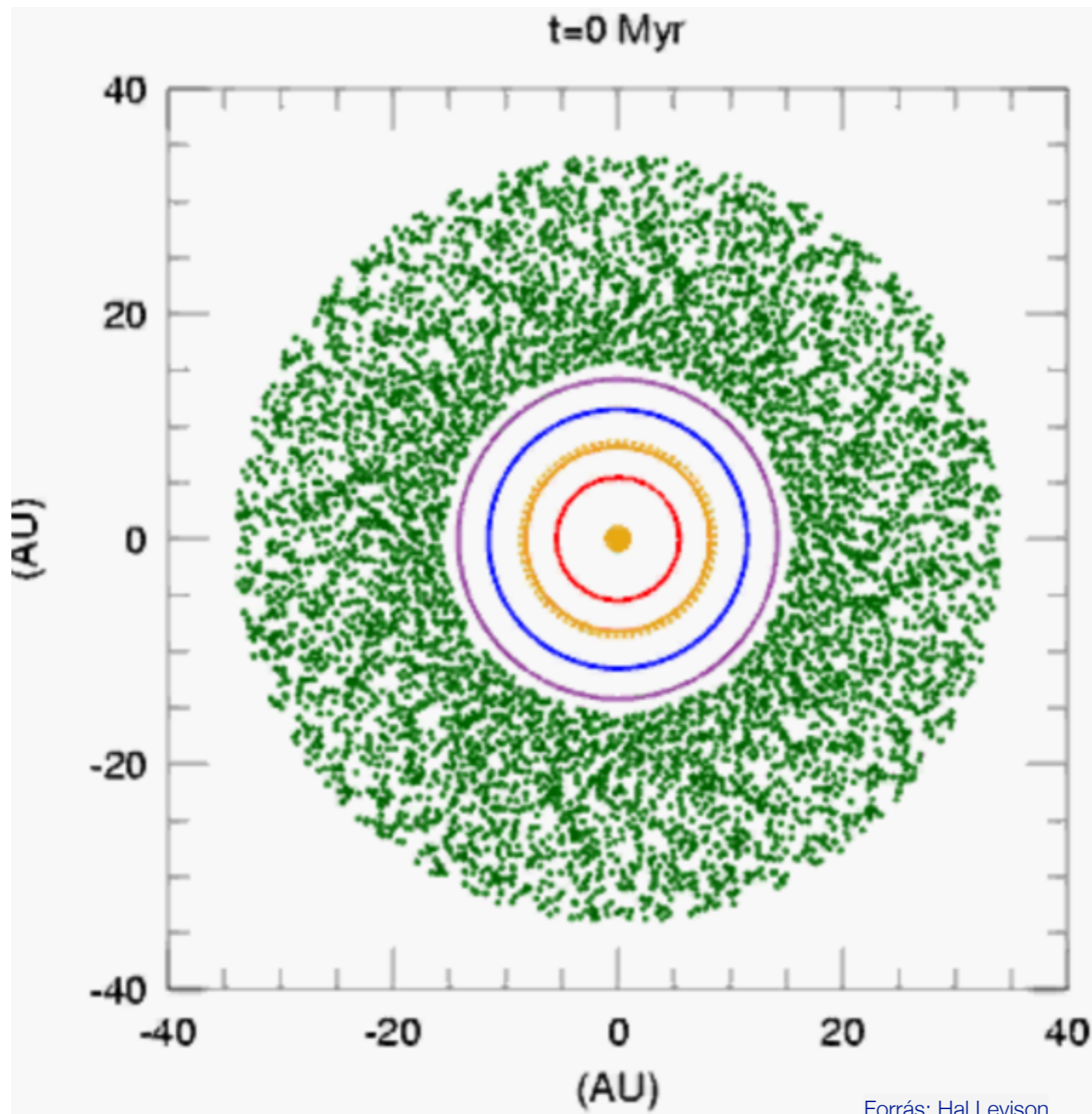


Forrás: Williams & Cieza 2011

1. gyorsnövekedés és ülepedés. Kilométeres testek létrejötte.
2. gravitációs hatáskeresztmetszet
3. “megszaladási fázis”: a legnagyobb bolygócsírák növekednek leggyorsabban
4. oligarcha fázis
5. a protobolygóktól a bolygóig (kaotikus növekedési fázis)
6. A gázburok akkretálása
7. Időskála: néhány millió év!

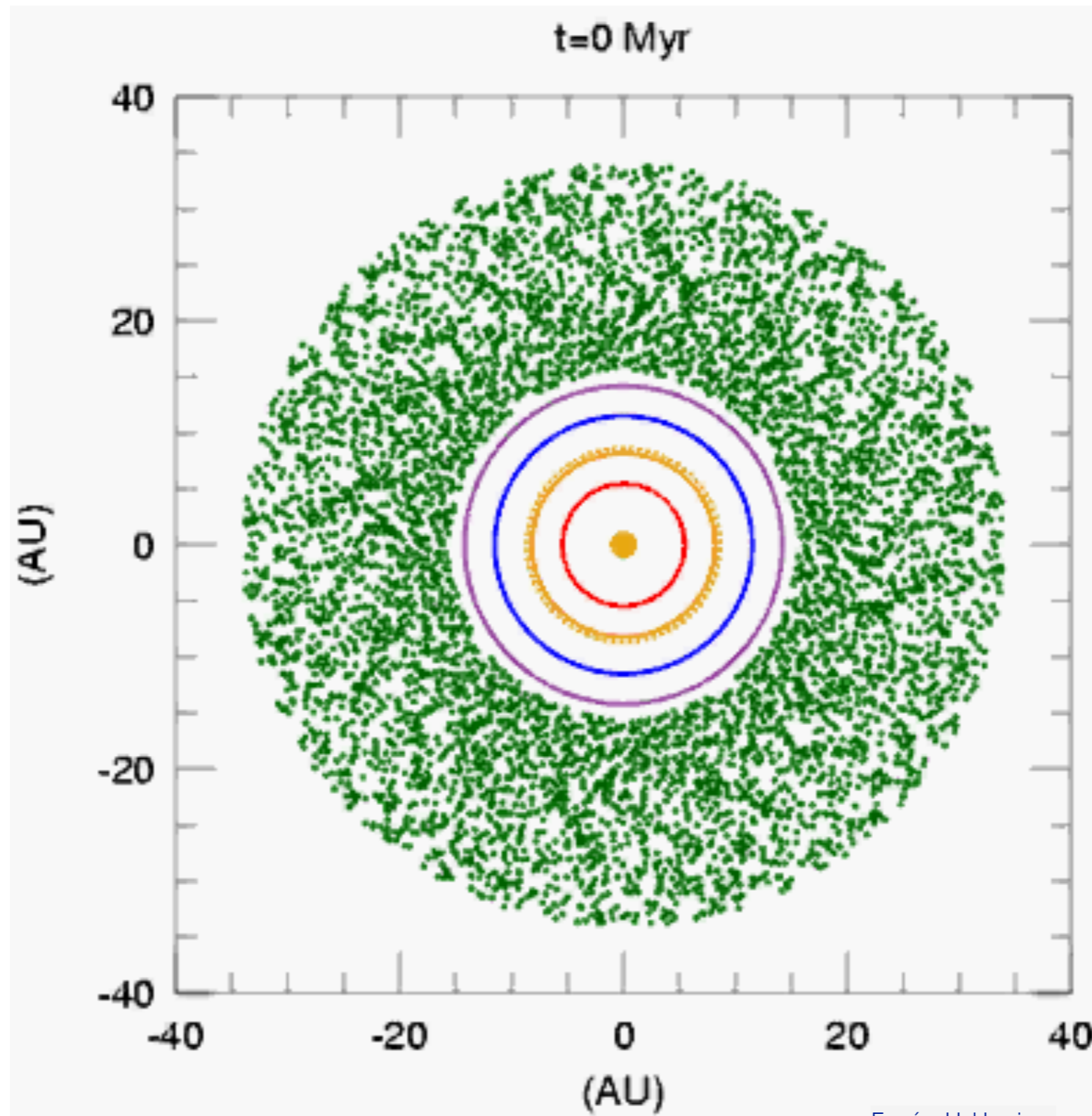
A korong fizikai paramétereit (sűrűség- és hőmérsékletprofil, kémiai összetétel, a jégvonal helye, fejlődési időskálák) megadják a bolygókeletkezés kezdőfeltételeit, és közvetlenül megszabják, milyen bolygórendszer fog keletkezni.

Bolygómigráció a korai Naprendszerben



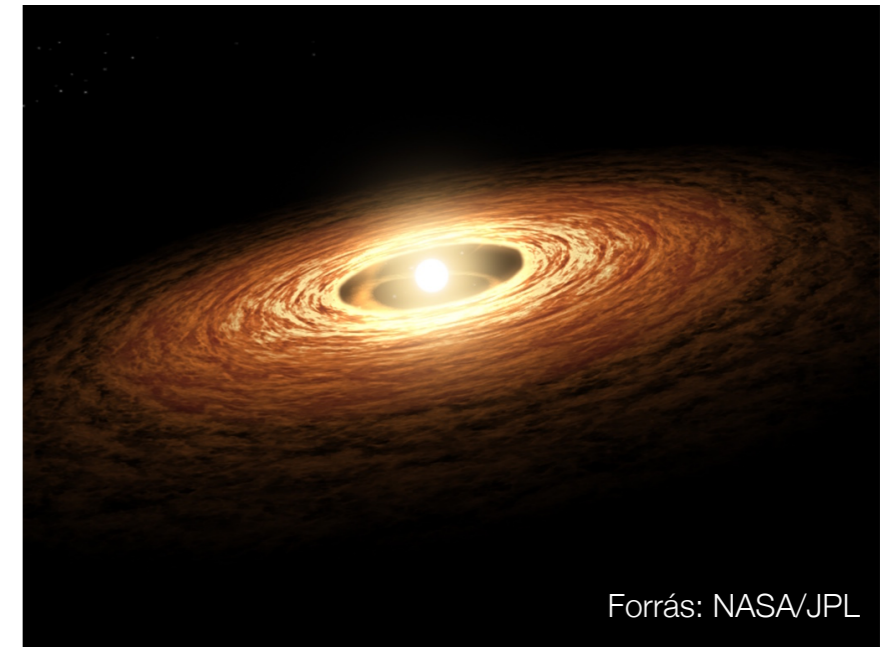
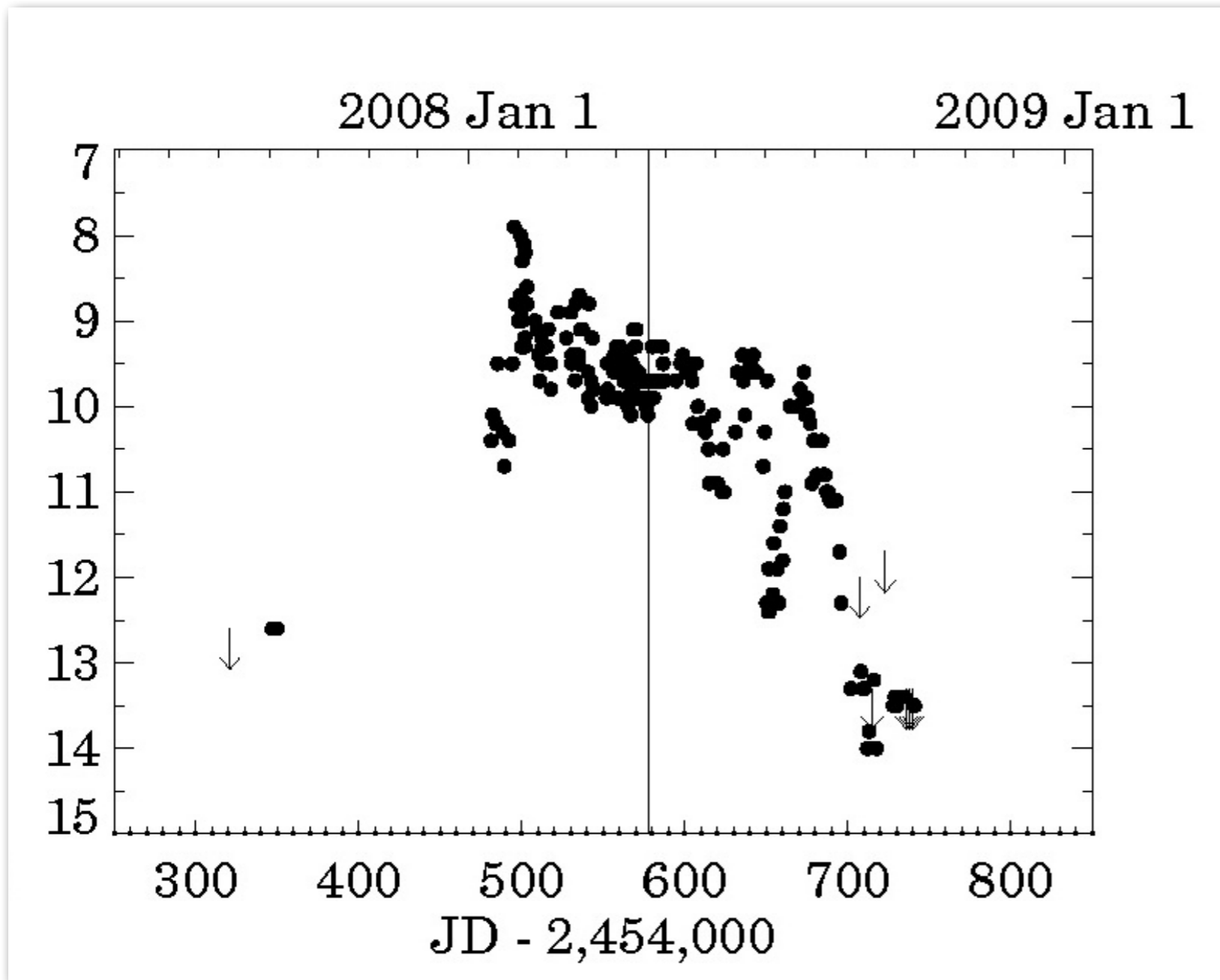
Forrás: Hal Levison

Bolygómigráció a korai Naprendszerben

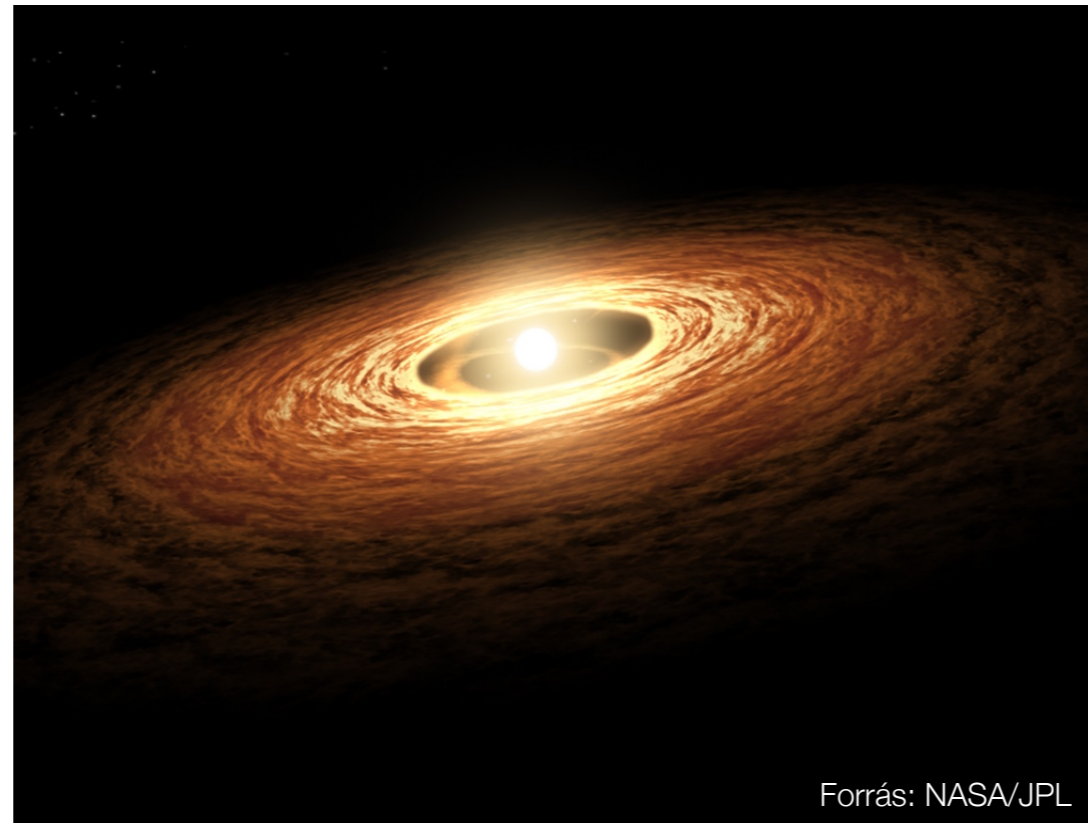
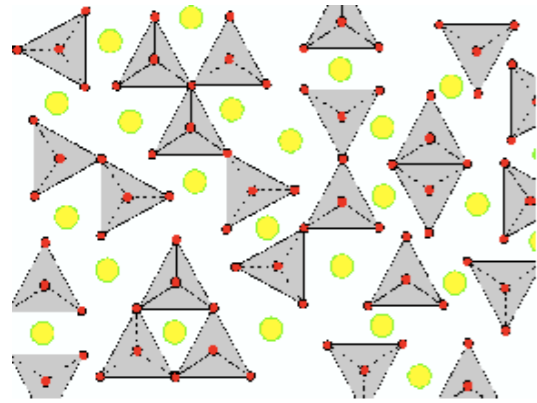


Forrás: Hal Levison

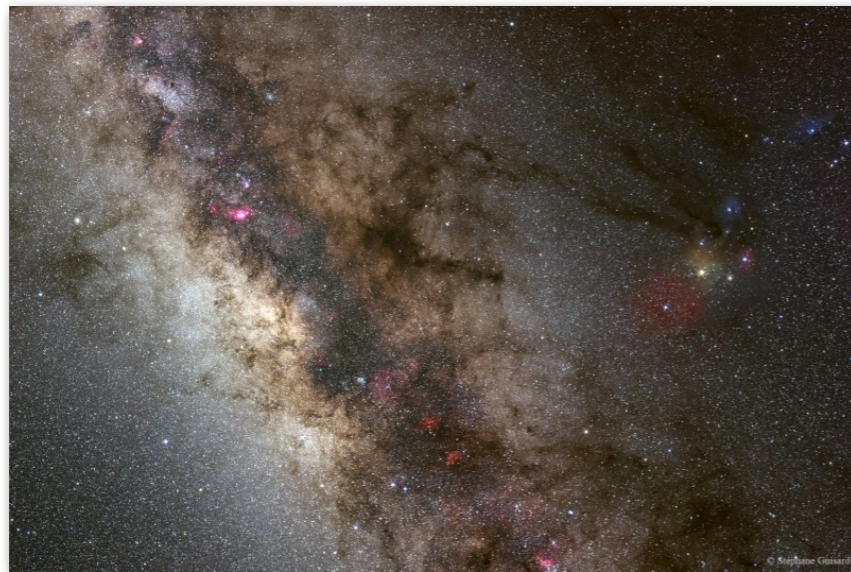
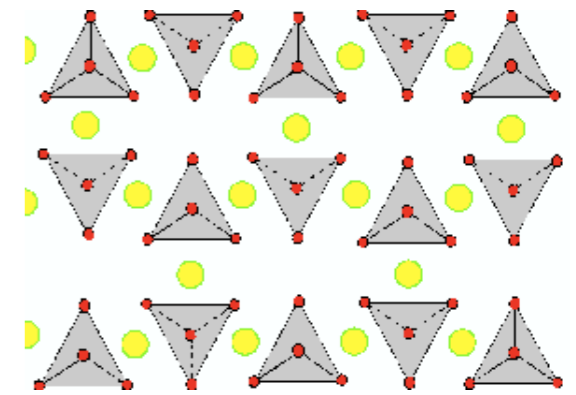
A központi csillag kitörése: EX Lupi 2008

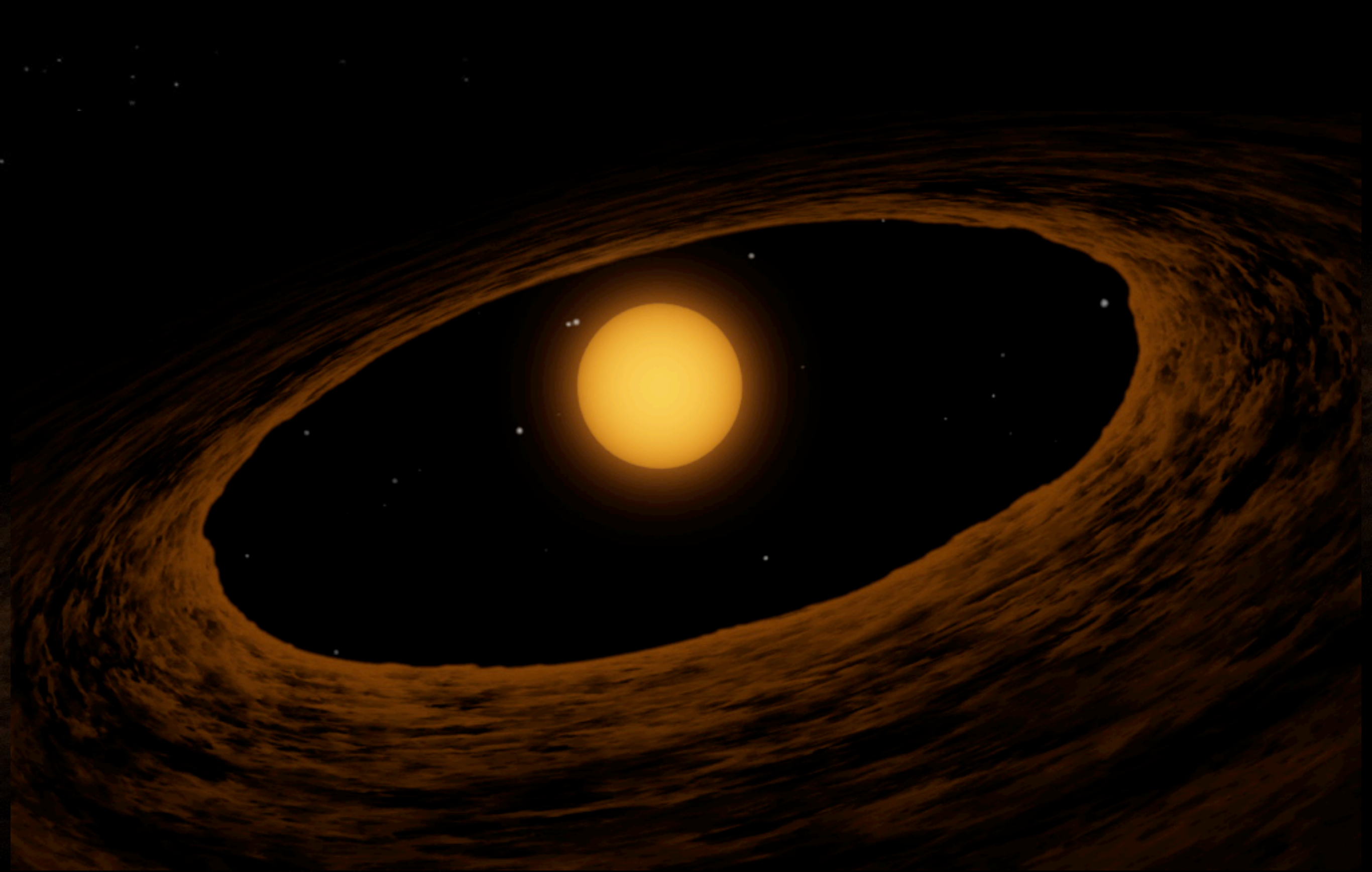


A központi csillag kitörése: EX Lupi 2008

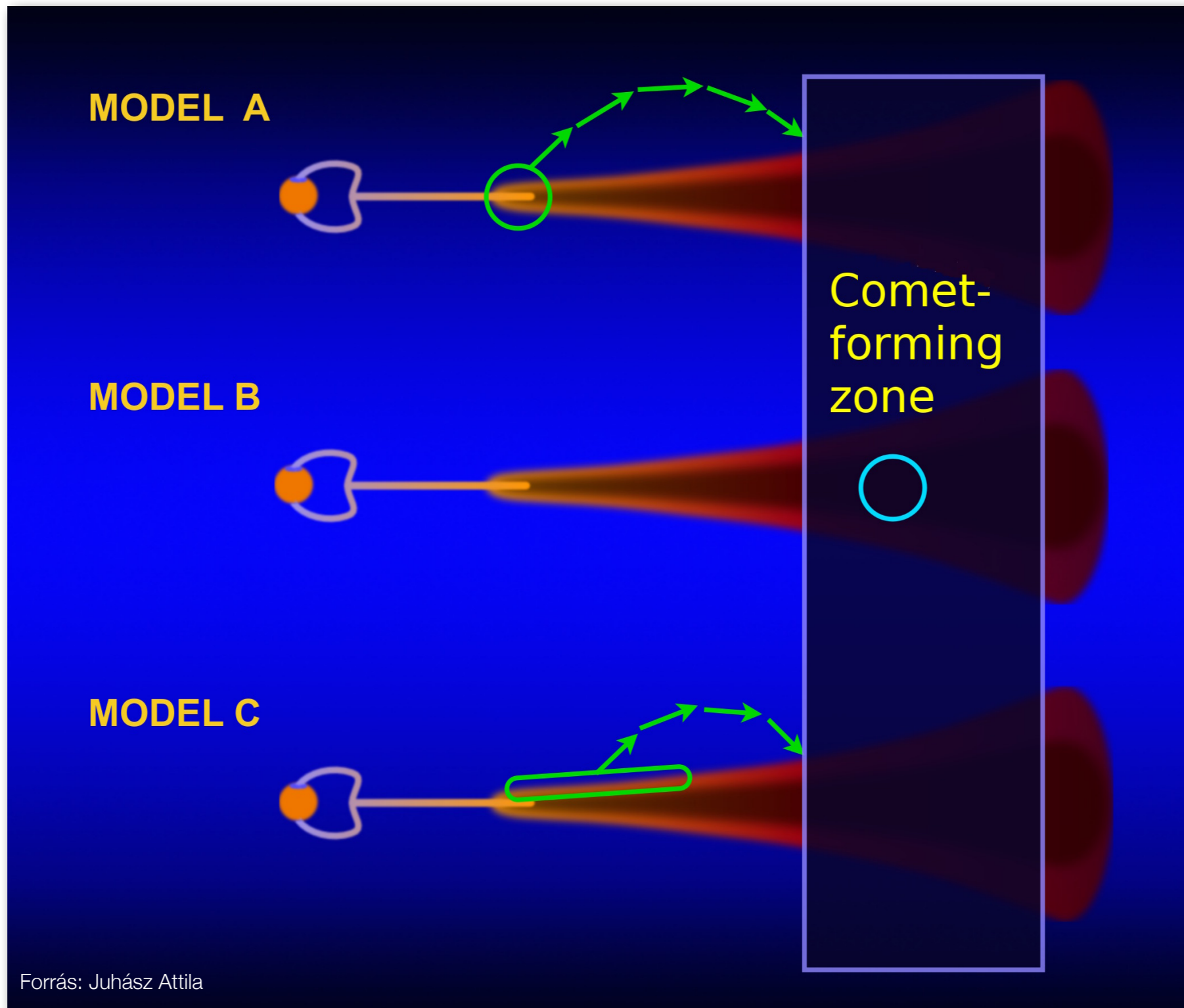


Forrás: NASA/JPL





Kristályos szilikátok keletkezése



Összefoglalás

Miért is olyanok a bolygórendszerek?

Egyszerű kép: a por összetapadása bolygókat hoz létre, amelyek gázban gazdag helyen gázburkot vonzanak magukra (Jupiter-típusú bolygók)

Ahogy ma látjuk:

- Rendkívül gazdag és komplex (klasszikus) fizika, kémia, ásványtan, és ez így mind együtt-egyidőben
- A korongoknak belső szerkezetük van (gyűrűk, spirálkarok), amelyek segíthetnek átlépni az 1 m-es határon
- A központi csillag kitörései, és egyéb környezeti hatások jelentősen megváltoztatják a korongot, és befolyásolják a bolygókeletkezés kezdőfeltételeit

Köszönöm a figyelmet!

