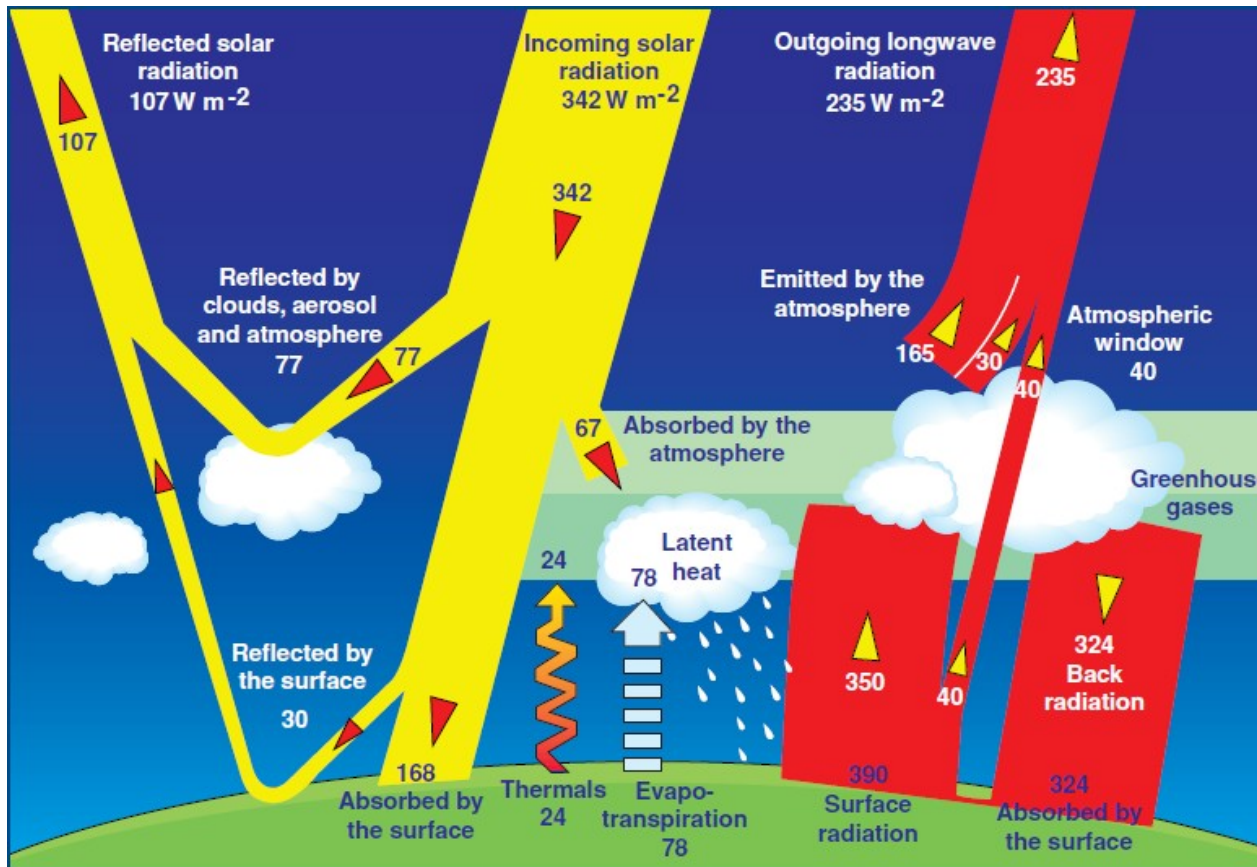


$$S = k \ln \Omega$$

Entropie a radiační bilance

0,5°

360°



fotony s vysokou energií $E = hf$ přicházejí z jednoho směru, ale IR fotony s nízkou energií odcházejí všemi směry

- Slunce “nic nedodává” ← jen udržuje rovnovážný stav
- skvrna na jinak temné obloze = zdroj nízké entropie (Penrose 2013)

Entropie ve Slunci

kód Mesastar
Paxton et al. (2011)

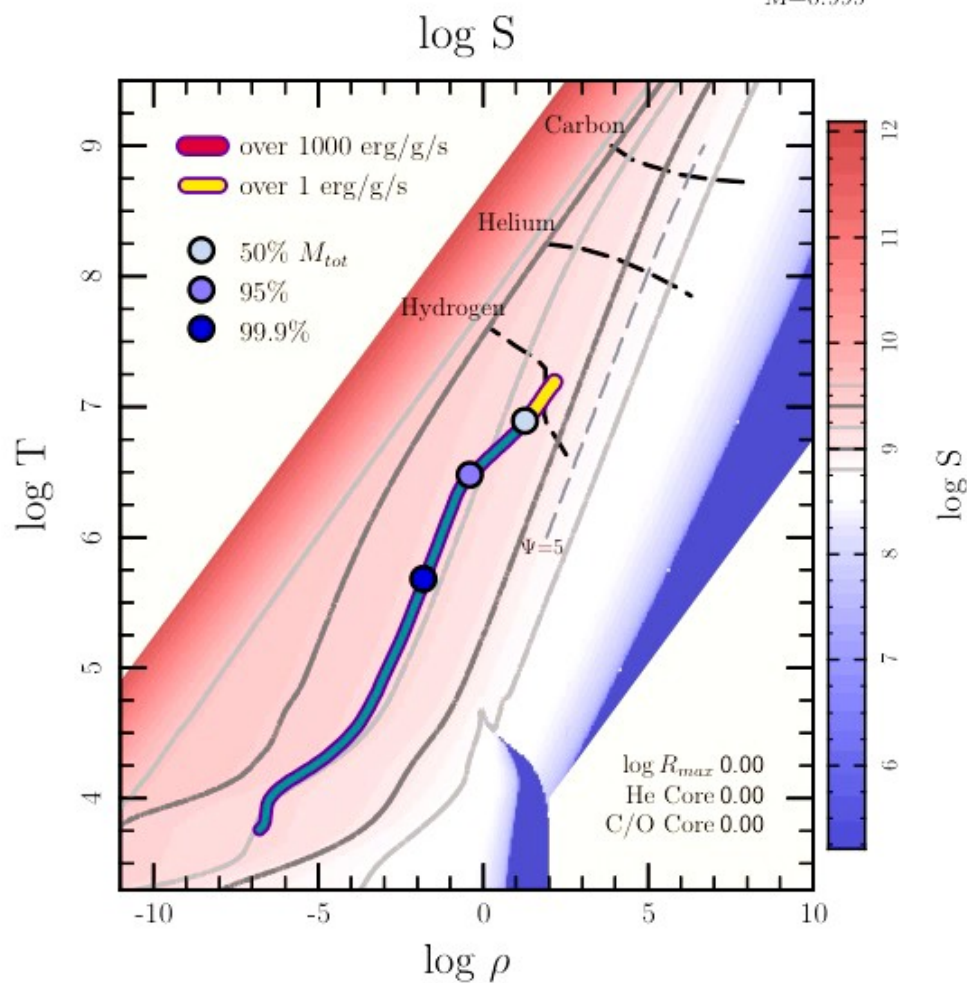
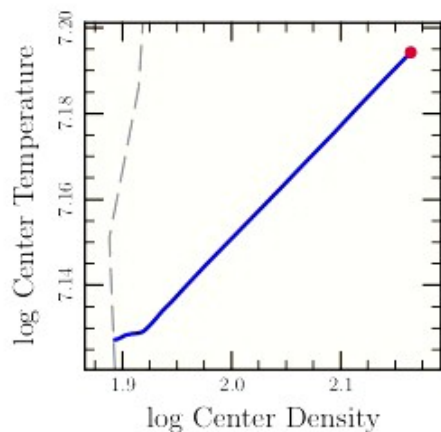
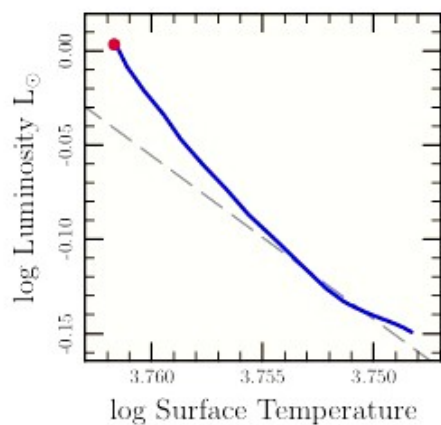
Age 4.554 (Gyr)

64

$M_{\text{init}}=1.0$

$Z_{\text{init}}=0.02$

$M=0.999$



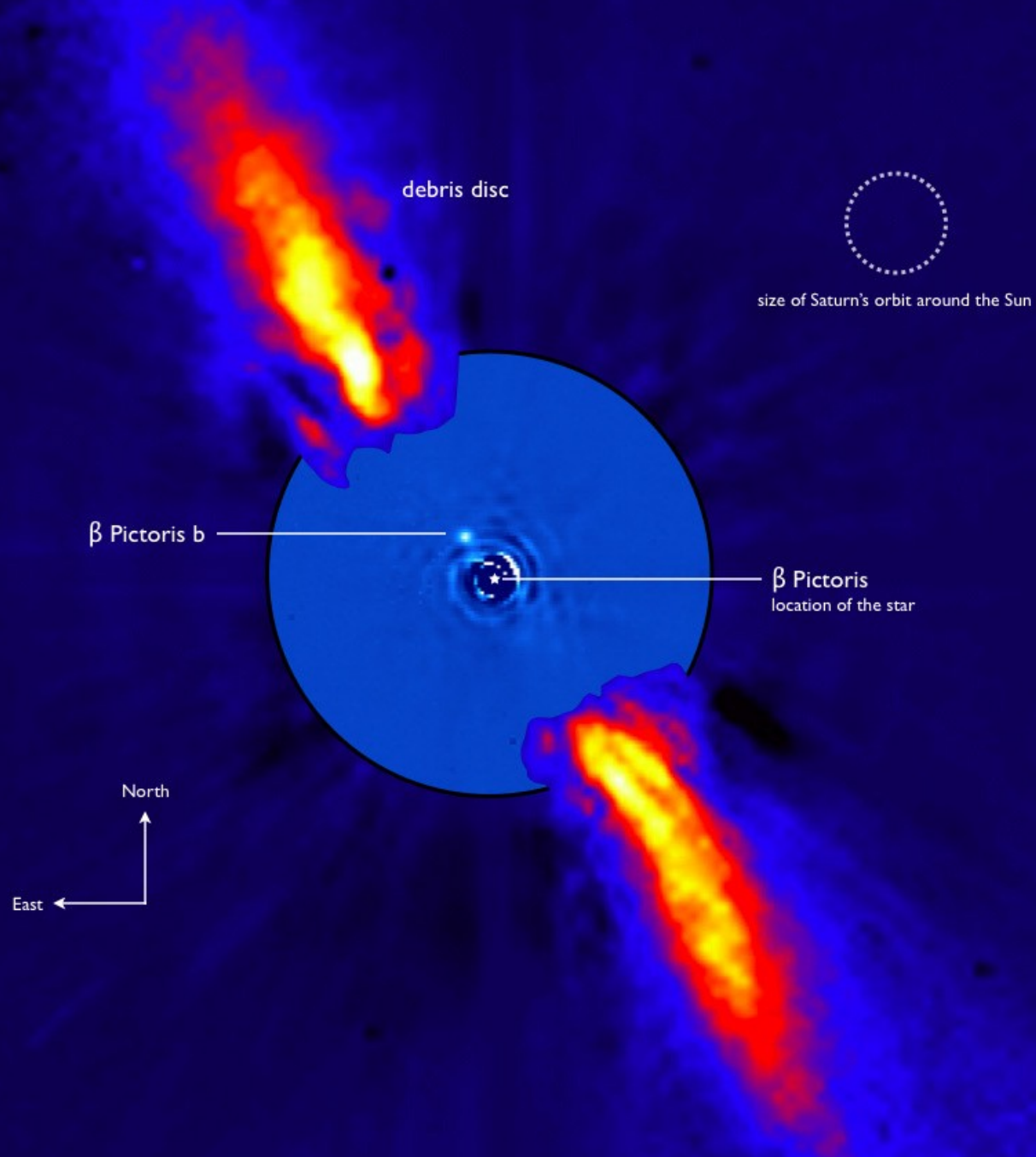
Entropie při kolapsu

- řešením problému 2 těles je kuželosečka: $r = p/(1 + e \cos f)$
- viriálový teorém pro vázané systémy: $2\langle E_K \rangle + \langle E_G \rangle = 0$
- 1. věta termodynamiky: $TdS = dU + PdV$

- Kelvinova-Helmholtzova kontrakce, dV záporné, $S \downarrow$
- pouze za cenu vyzáření IR fotonů, jejich dU kladné, $S \uparrow$

9 základních fází

0. gravitační kolaps GMC
1. TN reakce ve \odot → rovnovážný protoplanetární disk
2. akrece prachu podporovaná turbulencí plynu
3. akrece balvanů, částečné kolapsy → obří planety (~10 Myr)
4. migrace v plynném disku
5. srážky embryí → terestrické planety, Měsíc (~100 Myr)
6. migrace v disku planetesimál
7. blízká přiblížení planet, vymrštění “9.” planety?
8. přiblížení hvězd a galaktické slapy
9. Jarkovského jev, gravitační rezonance a srážky planetek



10 rovnic ← magneto-hydrodynamických

rovnice kontinuity (neboli zákon zachování hmoty, např. v jednotkách $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}$):¹

$$\overbrace{\frac{\partial \rho}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \rho}^{\text{derivace } f(\mathbf{r}, t)} = \overbrace{-\rho \nabla \cdot \mathbf{v}}^{\text{zředění}}, \quad (1)$$

Navierova–Stokesova rovnice (též pohybová, $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$):

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla P - \overbrace{\nabla \Phi}^{\text{gravitace}} + \frac{1}{\rho} \overbrace{\frac{1}{\mu_{\text{vac}}} (\nabla \times \mathbf{B}) \times \mathbf{B}}^{\text{Lorentz}} + \frac{1}{\rho} \overbrace{[\nabla \cdot \mu_1 \nabla \mathbf{v} + \nabla(\mu_1 + \mu_2) \nabla \cdot \mathbf{v}]}^{\text{viskozita}}, \quad (2)$$

¹ pro připomenutí, operátor gradientu jest $\nabla \equiv \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z}\right)$, divergence $\nabla \cdot$ (tj. skalární součin), rotace $\nabla \times$ (vektorový součin); mějme na paměti jejich české významy: stoupání, rozbíhavost a stáčení

rovnice tepelné rovnováhy (1. věta termodynamická, $\text{J}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}$):

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla U = \overbrace{-U \nabla \cdot \mathbf{v}}^{\text{práce}} - \overbrace{P \nabla \cdot \mathbf{v}}^{\text{emise}} - \overbrace{\kappa_{\text{P}} \rho \frac{\sigma}{4} T^4}^{\text{absorpce}} + \overbrace{\kappa_{\text{P}} \rho c E_{\text{rad}}}_{\text{ozáření}} - \overbrace{\nabla \cdot F_{\star} \hat{r}}^{\text{vedení}} + \overbrace{\nabla \cdot K \nabla T}^{\text{vedení}}, \quad (3)$$

rovnice přenosu záření ($\text{J}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}$):²

$$\frac{\partial E_{\text{rad}}}{\partial t} = \overbrace{\nabla \cdot \frac{c \lambda_{\text{lim}}}{\kappa_{\text{R}} \rho} \nabla E_{\text{rad}}}_{\text{difuze}} + \overbrace{\kappa_{\text{P}} \rho \frac{\sigma}{4} T^4}_{\text{emise}} - \overbrace{\kappa_{\text{P}} \rho c E_{\text{rad}}}_{\text{absorpce}}, \quad (4)$$

indukční rovnice ($\text{T}\cdot\text{s}^{-1}$):³

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \overbrace{\nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B})}_{\text{advekce}} + \overbrace{\nabla \cdot \eta_{\text{mag}} \nabla \mathbf{B}}_{\text{difuze}}, \quad (5)$$

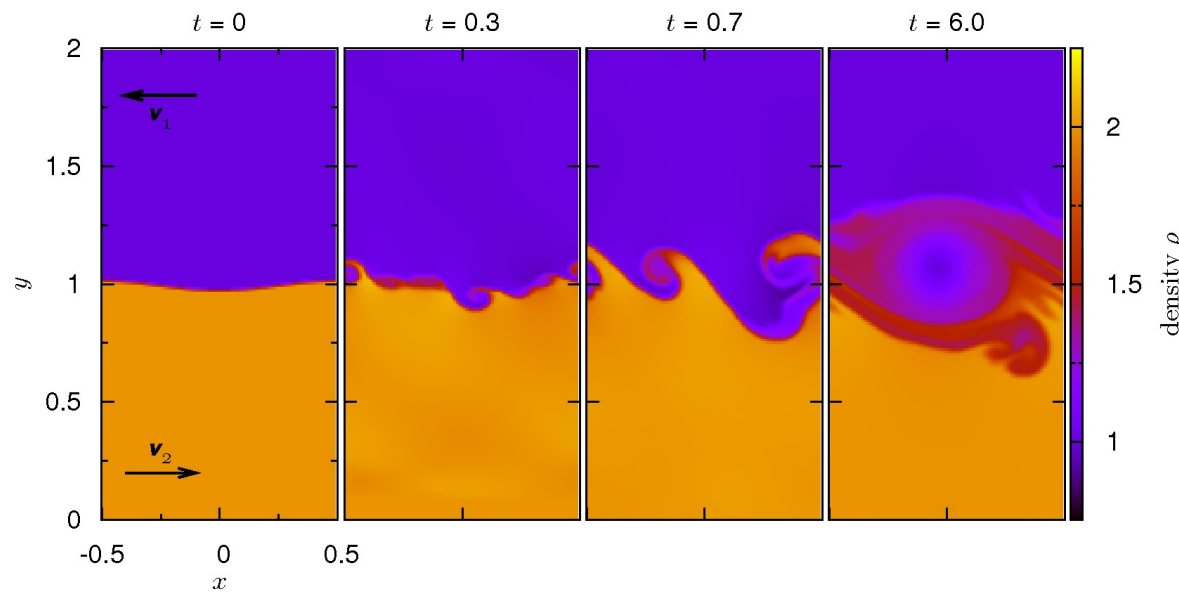
Poissonova rovnice ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$):

$$\nabla^2 \Phi_{\text{disk}} = 4\pi G \rho, \quad \Phi = -\frac{GM_{\star}}{r} + \Phi_{\text{planet}} + \Phi_{\text{disk}}, \quad (6)$$

prov. pozn. o vztahu k biologii, determinismu a svobodné vůli

5 problémů ← seriózních

1. turbulence a nestability (KH, RT, MRI, 2-stream, ...)
2. deterministický chaos pro $N \geq 3$
3. termodynamická nevratnost $dS \geq 0$, srážky
4. stochasticita, malé $p_{\text{události}}$
5. počáteční podmínky v čase $t = 0$ neměřitelné → **inverze**

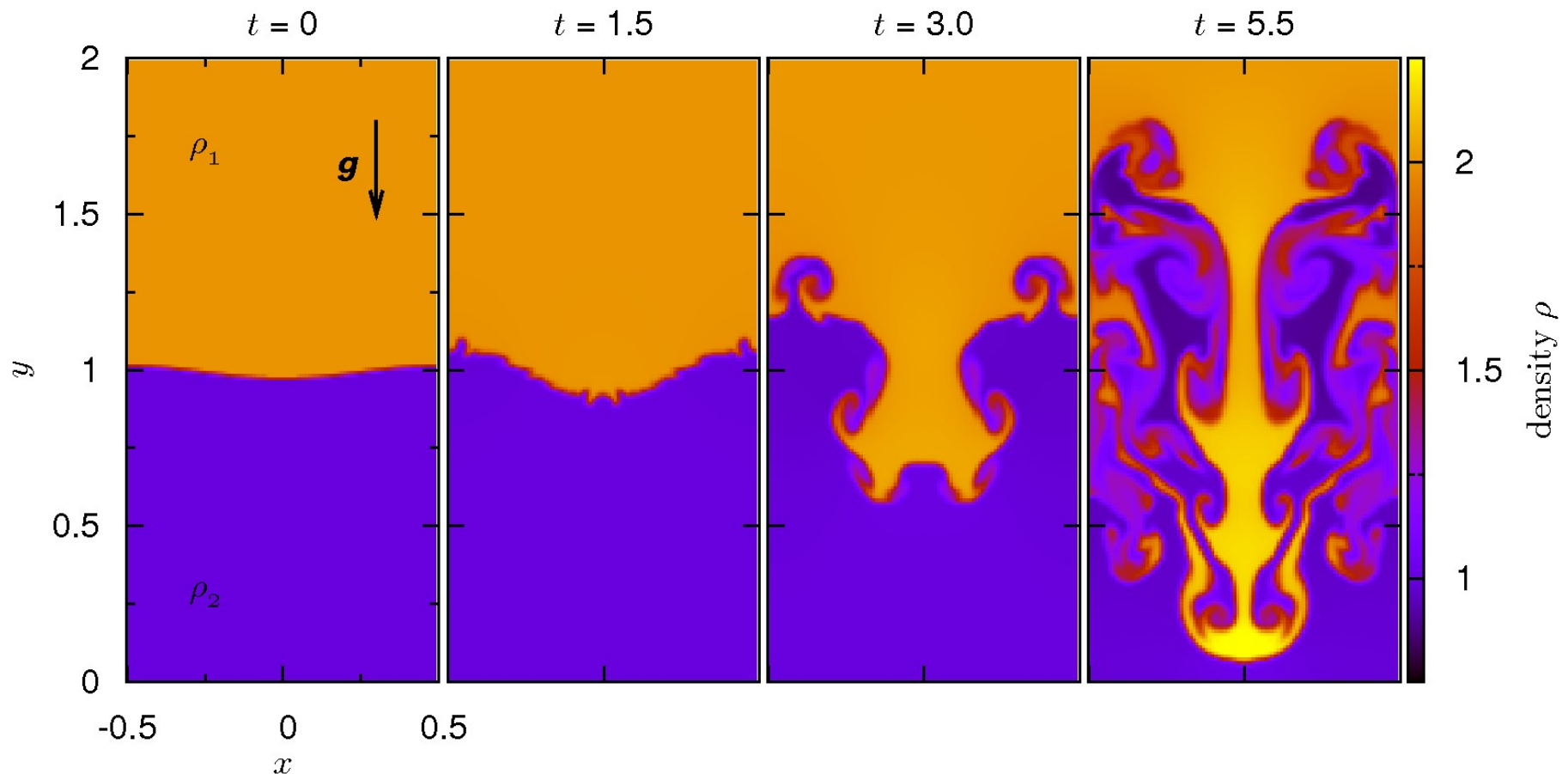


Kelvinova-Helmholtzova
nestabilita (základní)

Mignone et al. (2007)

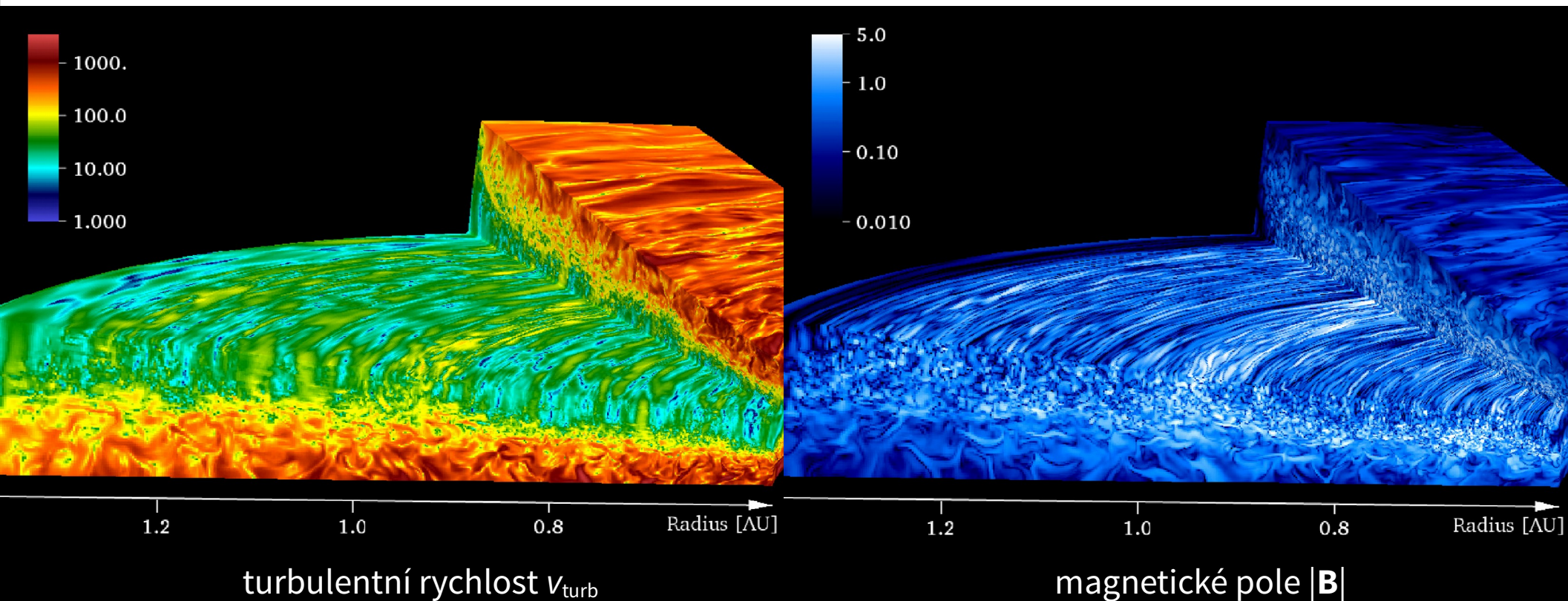
Rayleighova-Taylorova nestabilita

- vztlaková síla vs. gravitace \leftarrow např. konvekce ve \odot
- simulace metodou FVM, kód Pluto (Mignone et al. 2007)



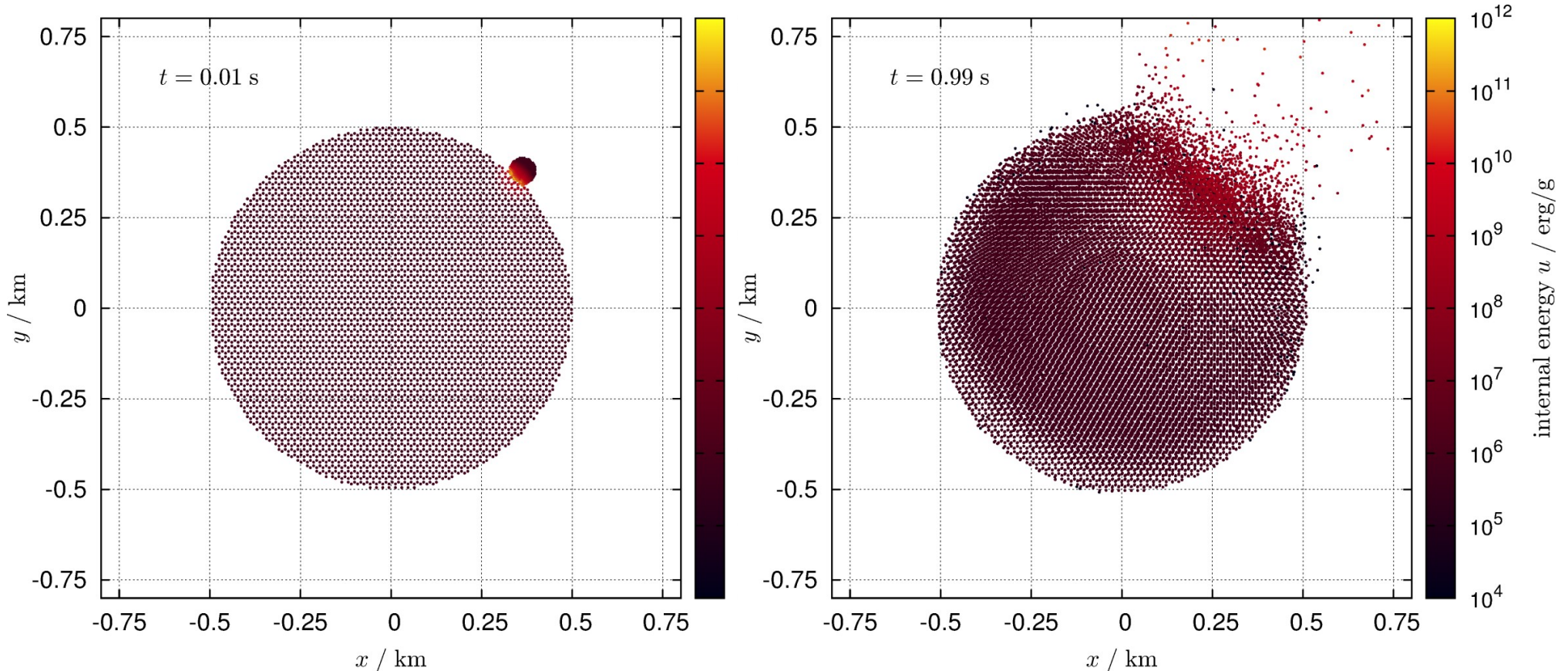
Magneto-rotační nestabilita

- zavíjení siločar v diferenciálně rotujícím disku, zesilování \mathbf{B} , růst efektivní viskozity ν a transportu (Flock et al. 2013)

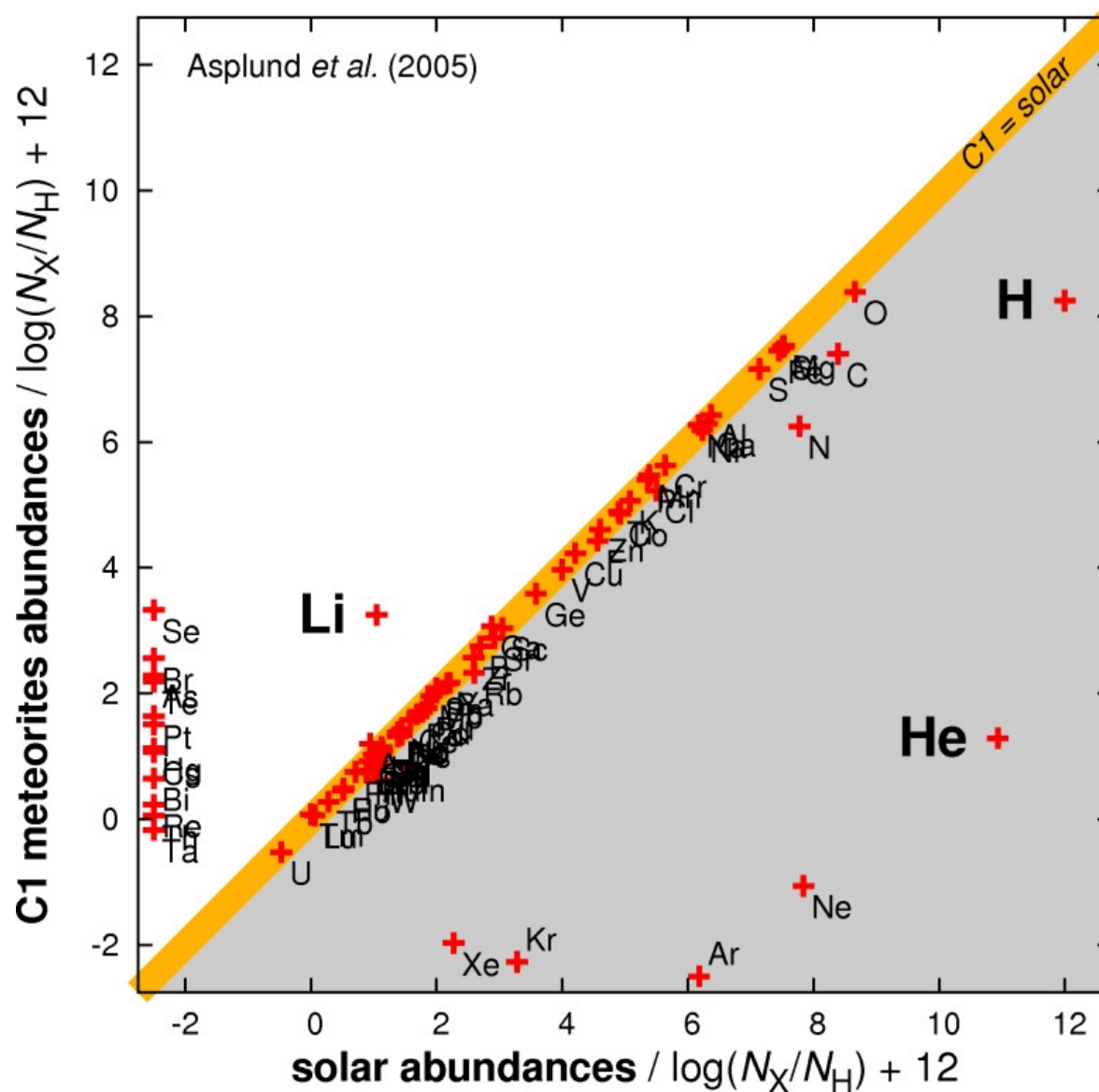


Nevratné srážky → prach, IR záření

- terč $D = 100$ km, projektil $d = 10$ km, $v_{\text{imp}} = 5$ km/s, $\varphi_{\text{imp}} = 45^\circ$
- simulace metodou SPH (Benz & Asphaug 1994)



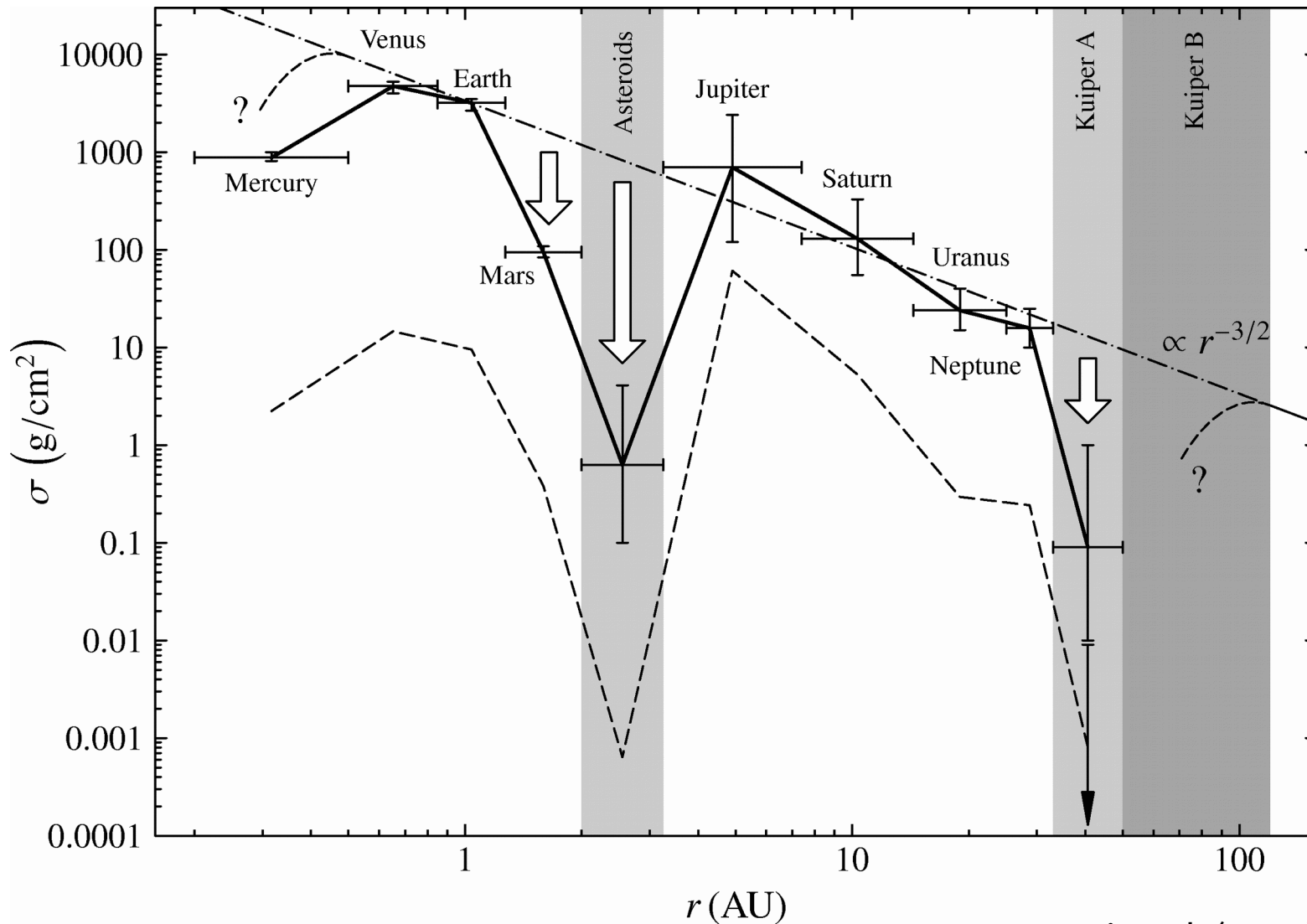
Chemické složení meteoritů a Slunce



totožné až na
těkavé prvky
a inertní plyny

radiometrie
meteoritů
→ časová škála
($4,56 \pm 0,01$) Myr

I. Protoplanetární disk



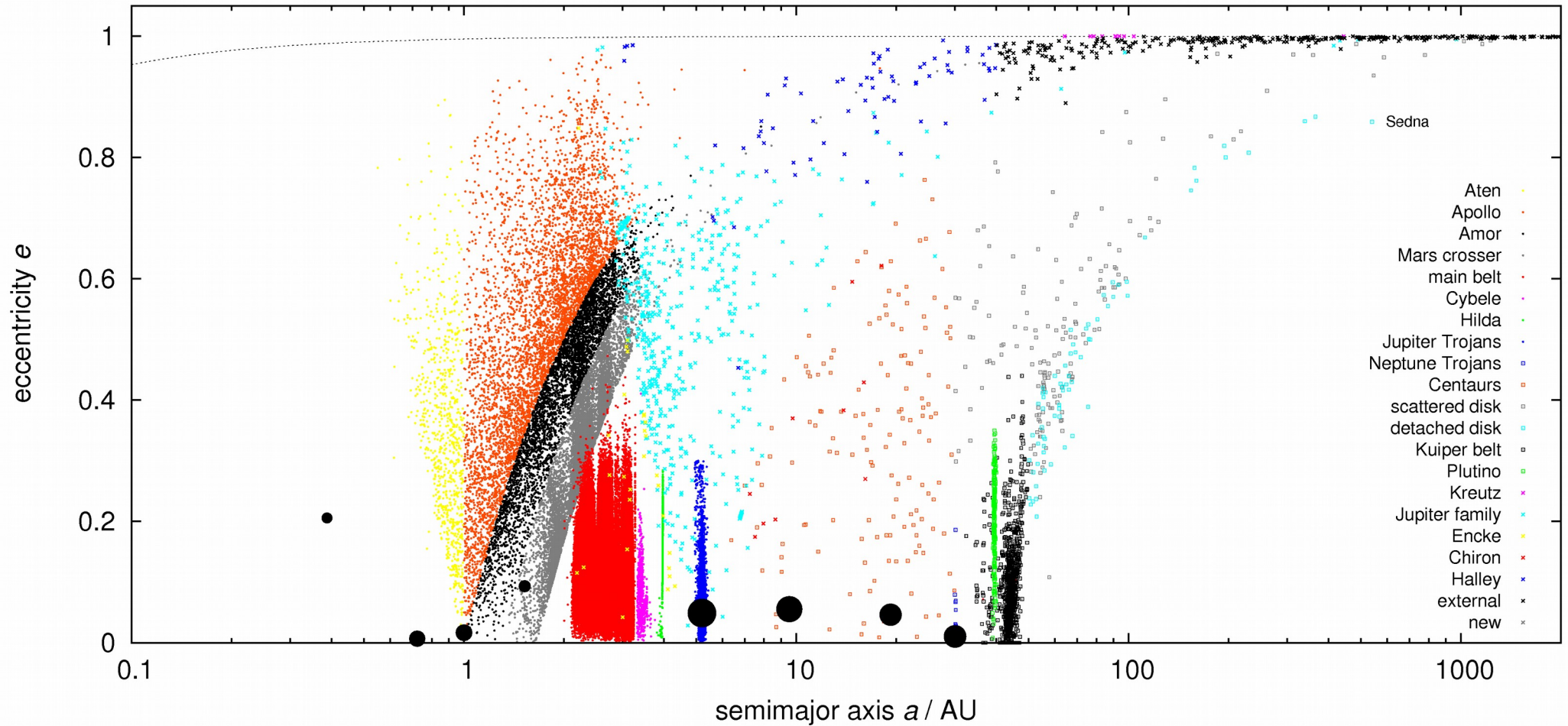
mlhovina
minimální
hmotnosti
(Hayashi 1971)

“rozprostření”
doplnění o H, He

Bertotti et al. (2003)

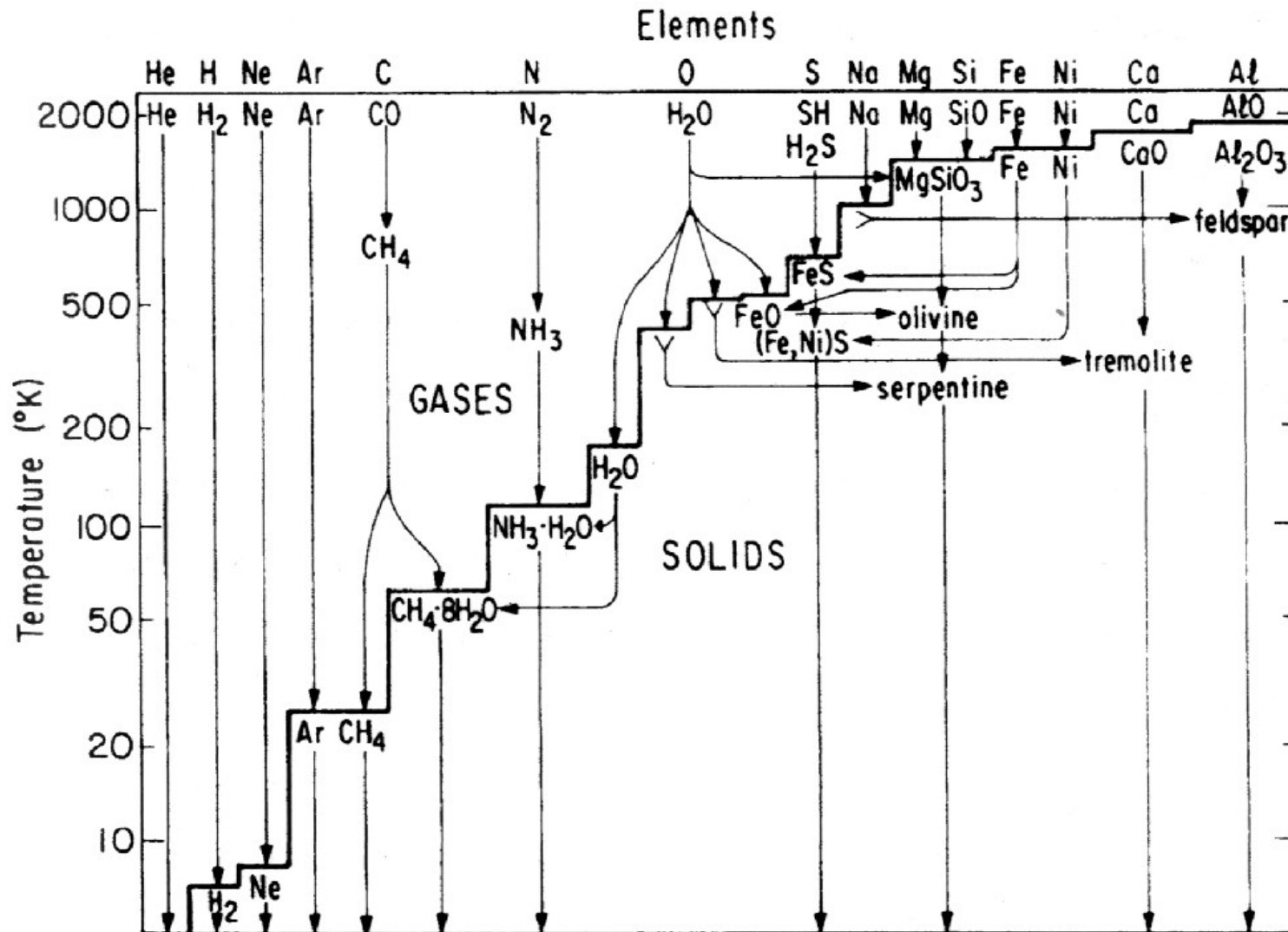
Dráhy planet, asteroidů a komet

současné

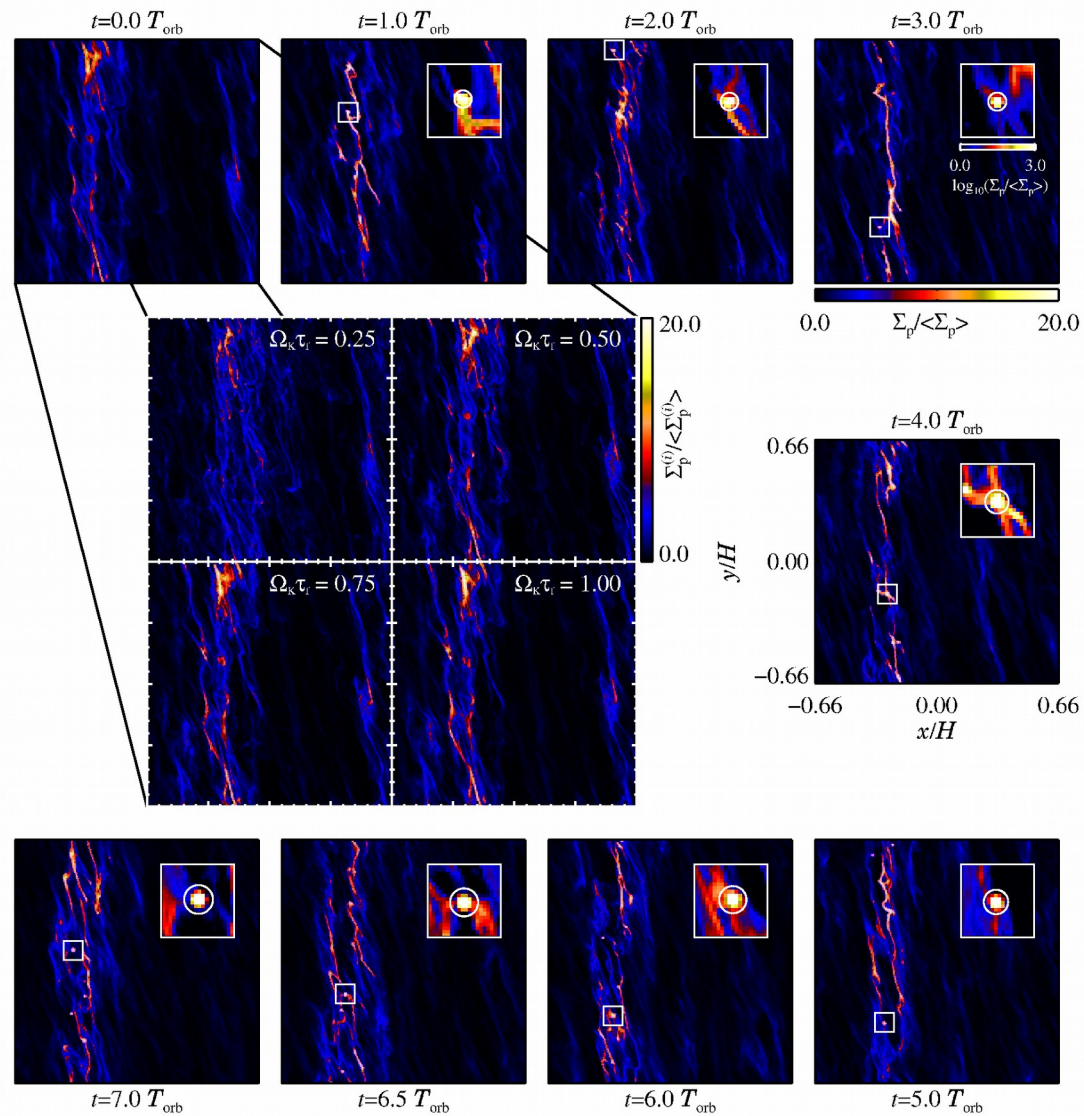


data Minor Planet Center

2. Kondenzace prachu z plynu



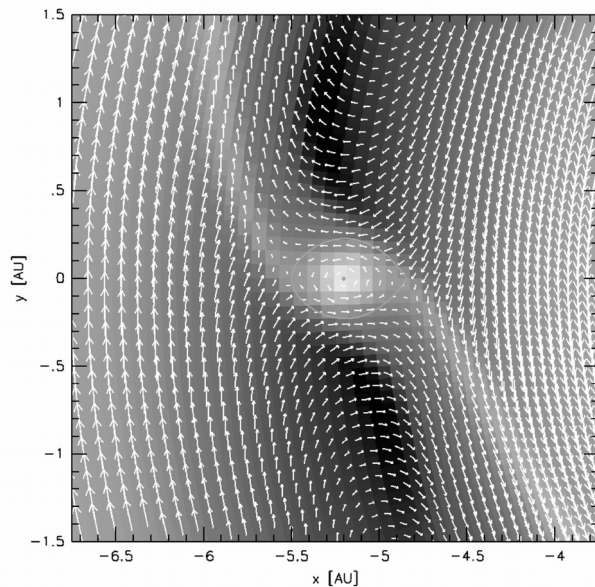
2. Akrece prachu + turbulence



nestabilita
dvou proudění
(Johansen et al. 2007)

3. Obří planety (za sněžnou linií)

- aerodynamické tření balvanů v prvotních atmosférách
- překročení kritické hmotnosti asi $20 M_{\oplus}$ → gravitační kolaps okolního plynu



Kley (2006)

Figure 4: Flow field in the vicinity of a Jupiter mass planet (after Kley (1999)).

Lambrechts & Johansen (2012)

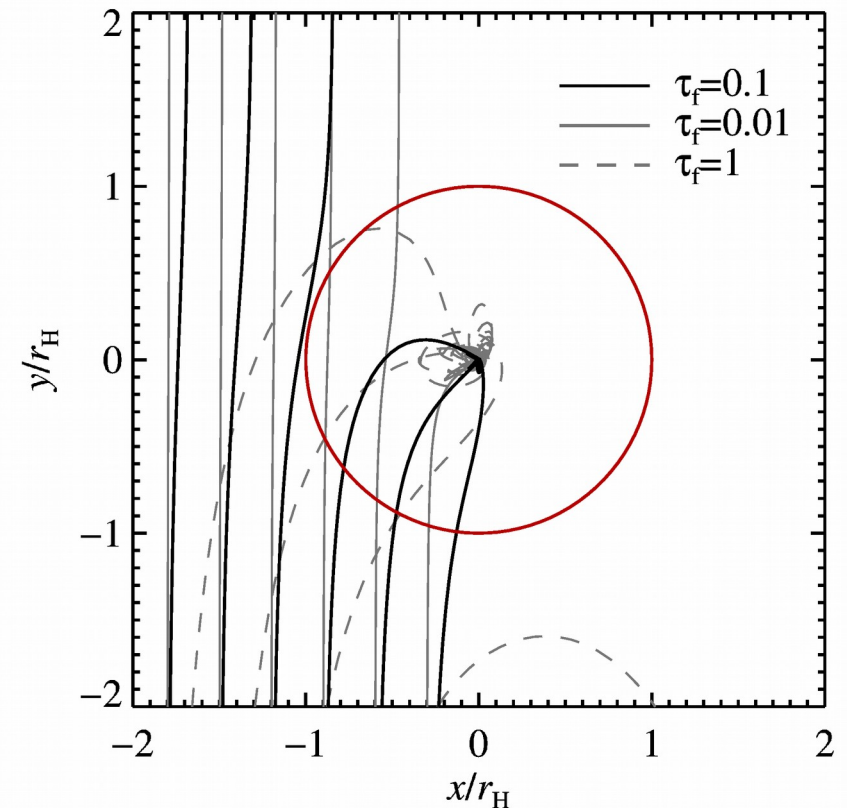


Fig. 7. Trajectories for particles with dimensionless friction time $\tau_f = 0.01, 0.1, 1$ obtained from the 2D Hill equations including gas drag. Pebbles with $\tau_f = 0.1$ and impact parameters below a Hill radius efficiently get accreted. Larger particles of $\tau_f = 1$ are pulled in from wider separations, but cores lose particles on horseshoe orbits. Particles strongly coupled to the gas, with $\tau_f = 0.01$, need close encounters well within the Hill sphere in order to fall onto the core.

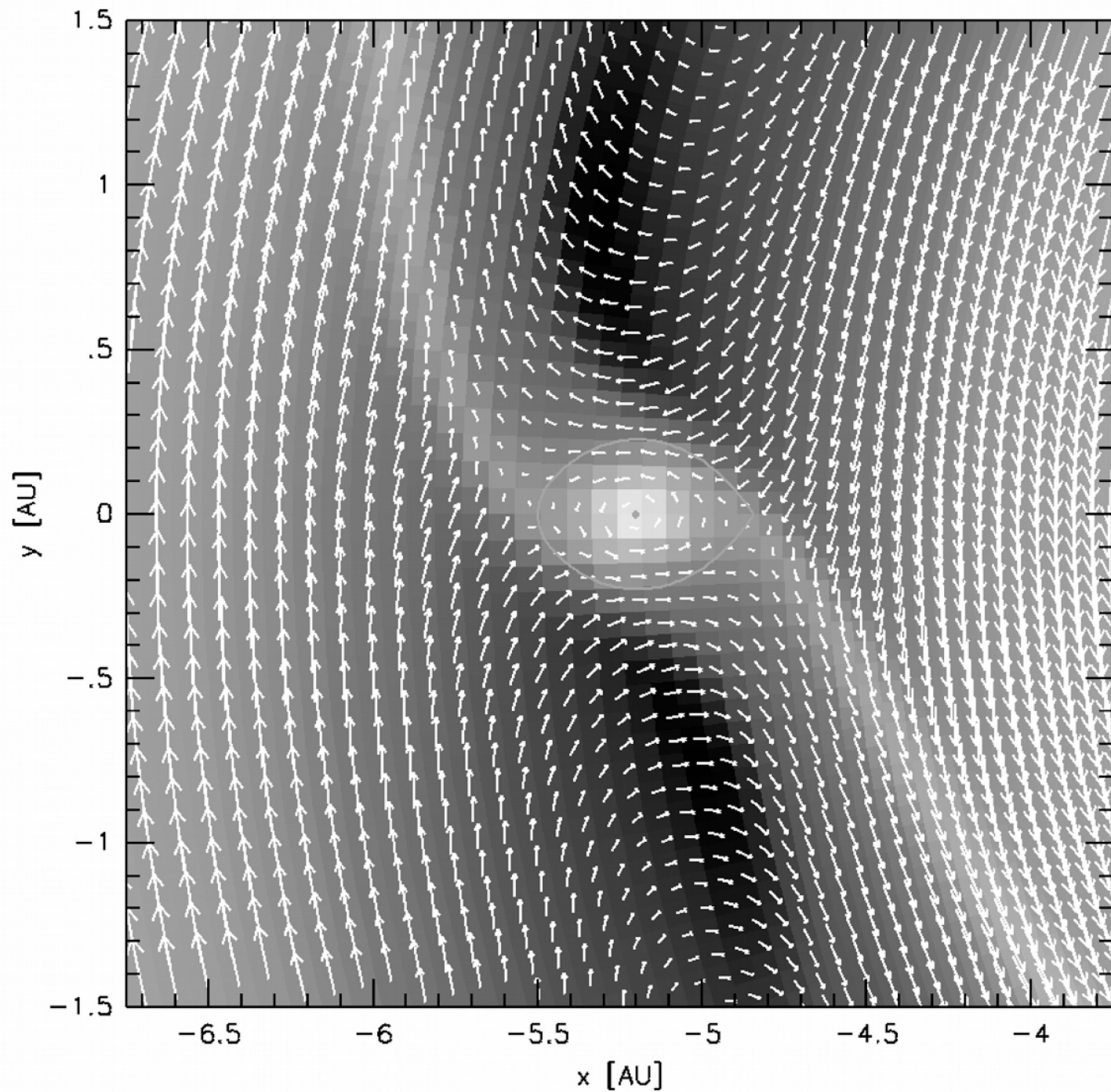
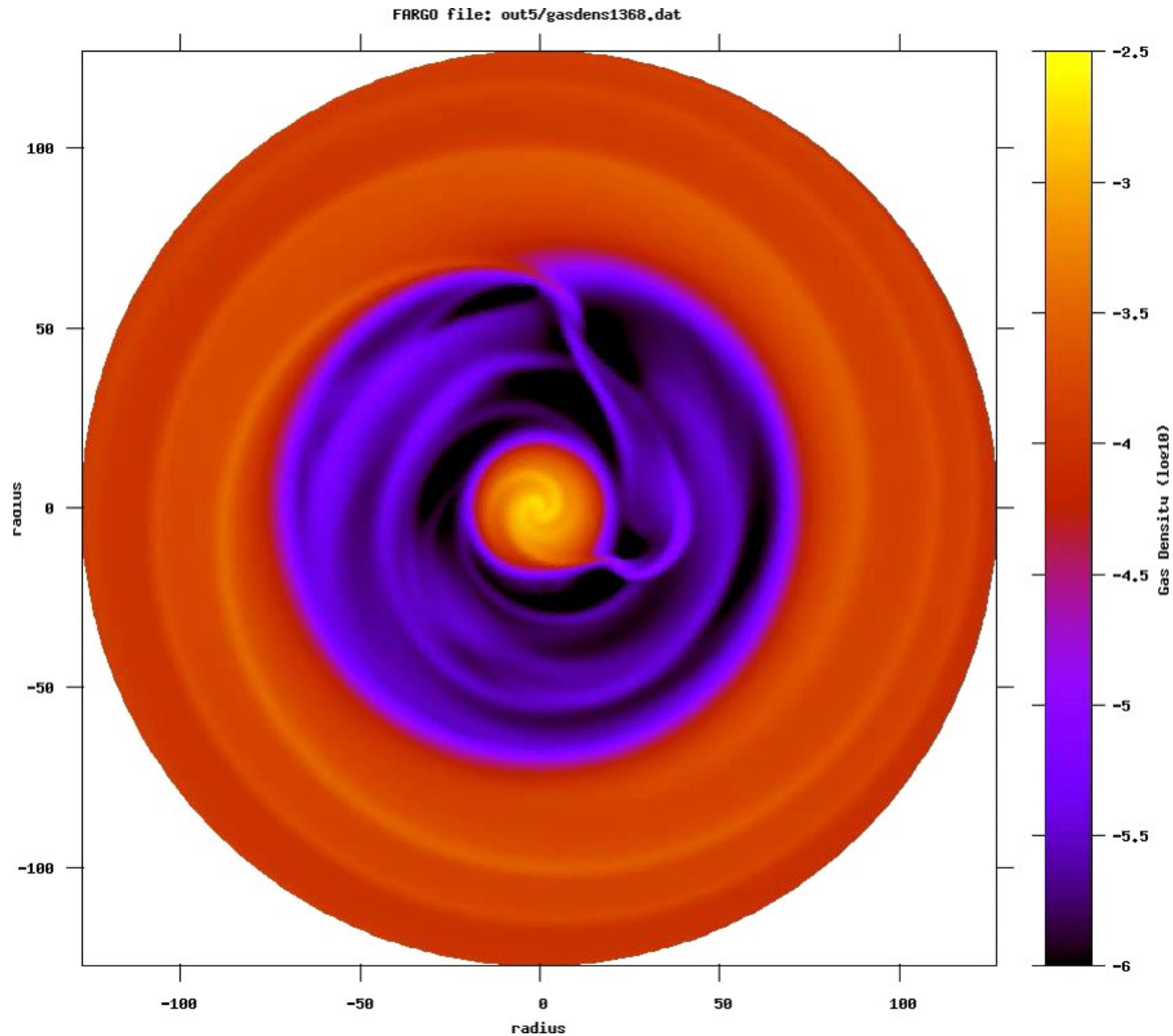


Figure 4: Flow field in the vicinity of a Jupiter mass planet (after Kley (1999)).

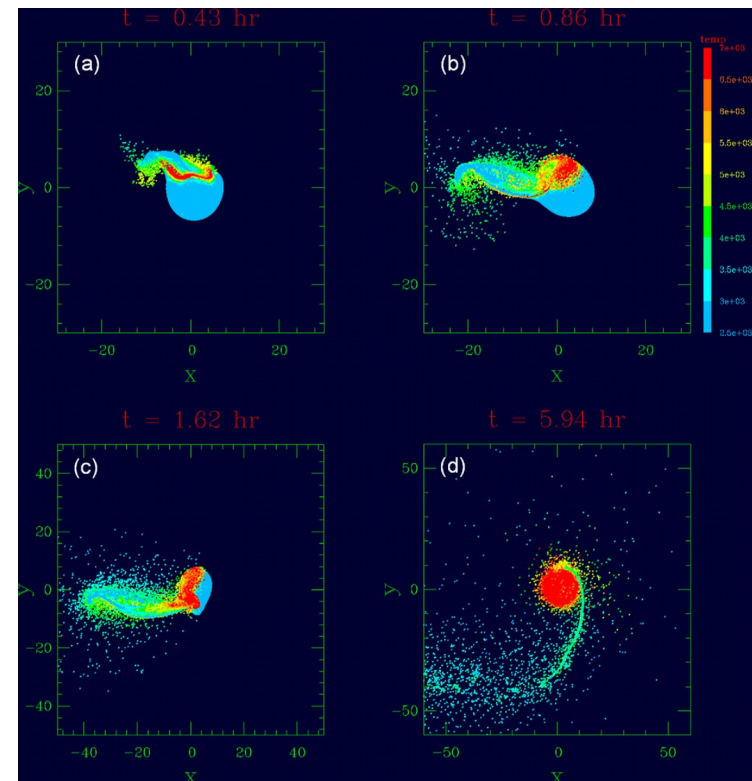
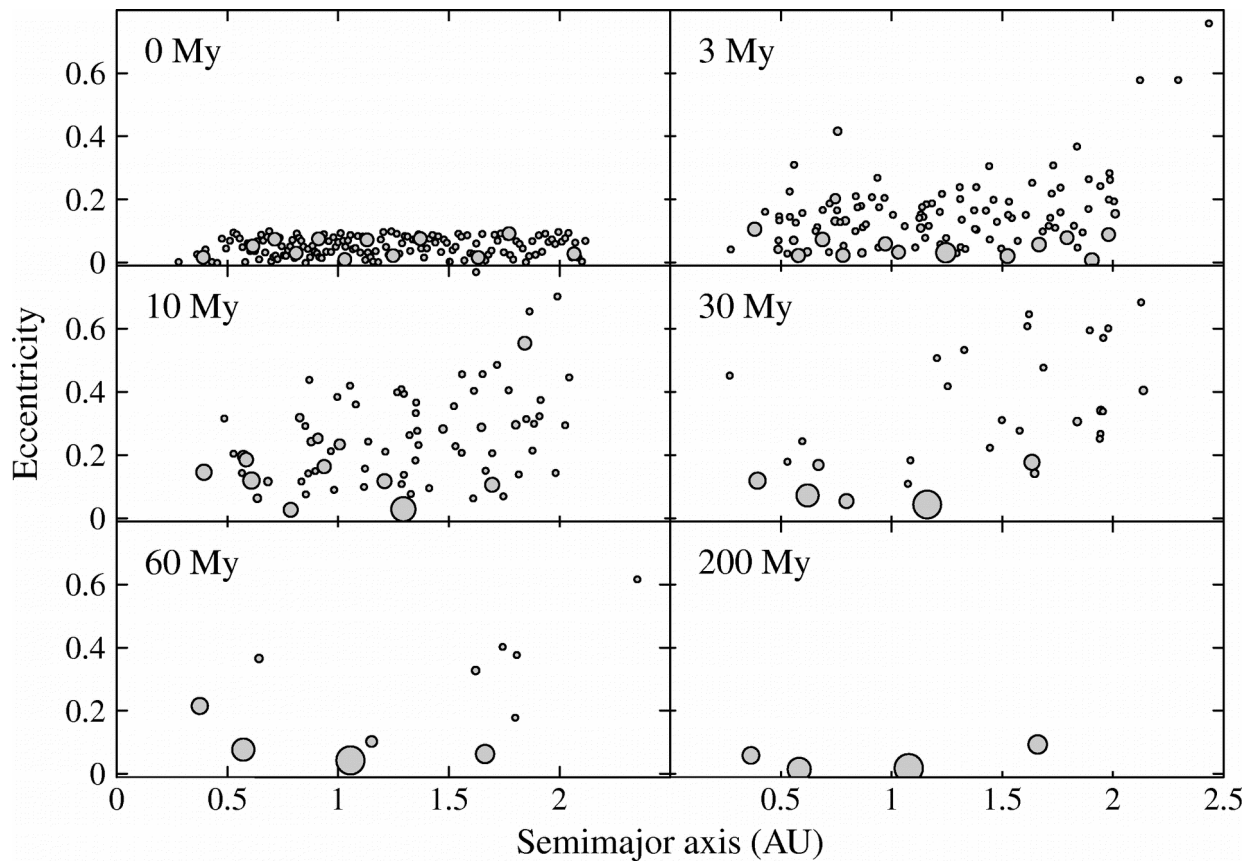
4. Migrace planet v plynném disku



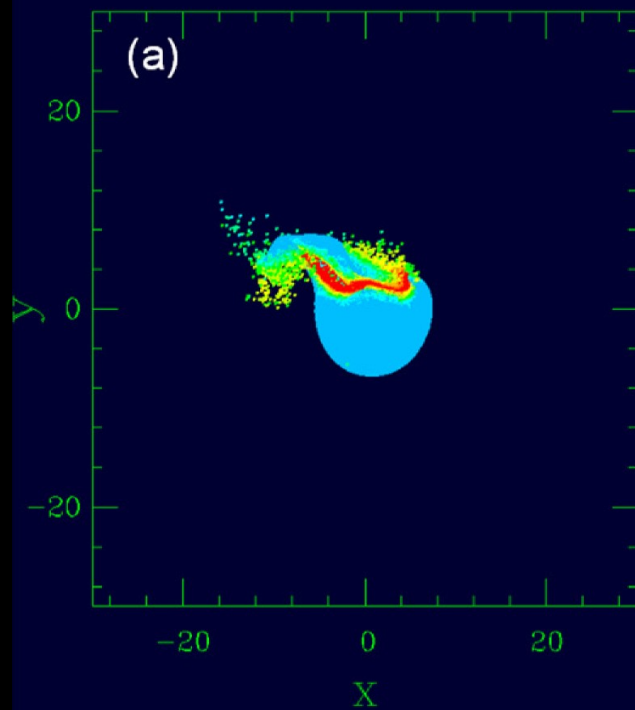
Masset (2000)

5. Terestrické planety

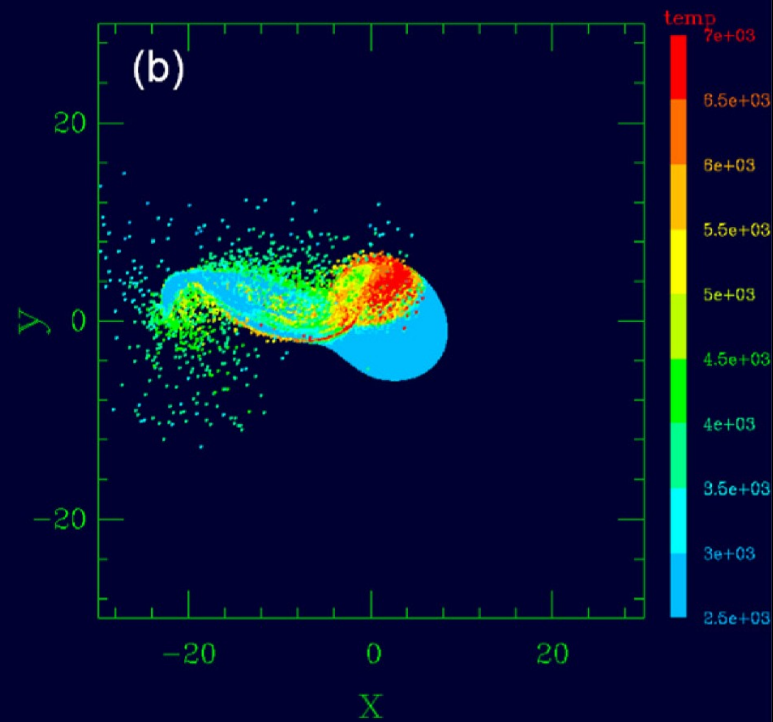
- srážky embryí v terestrické zóně (Chambers 2001)
- vznik Měsíce velkým necentrálním impaktem (Canup 2009)



$t = 0.43$ hr

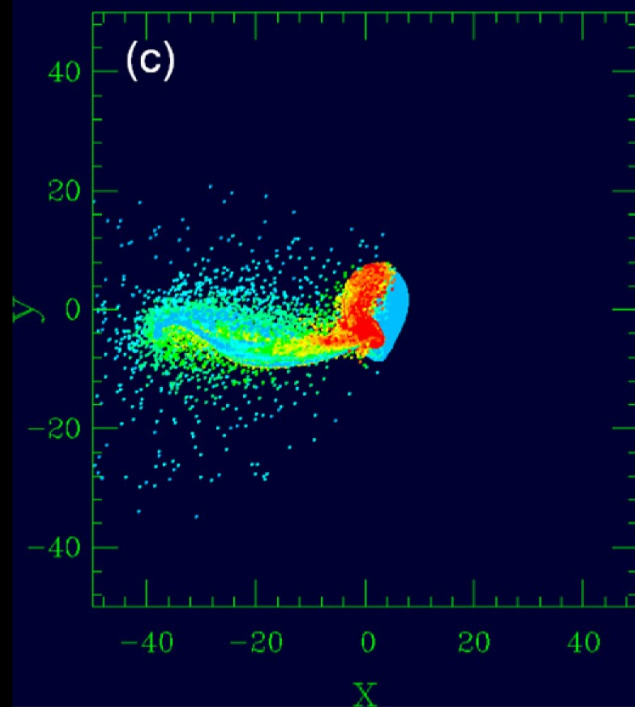


$t = 0.86$ hr

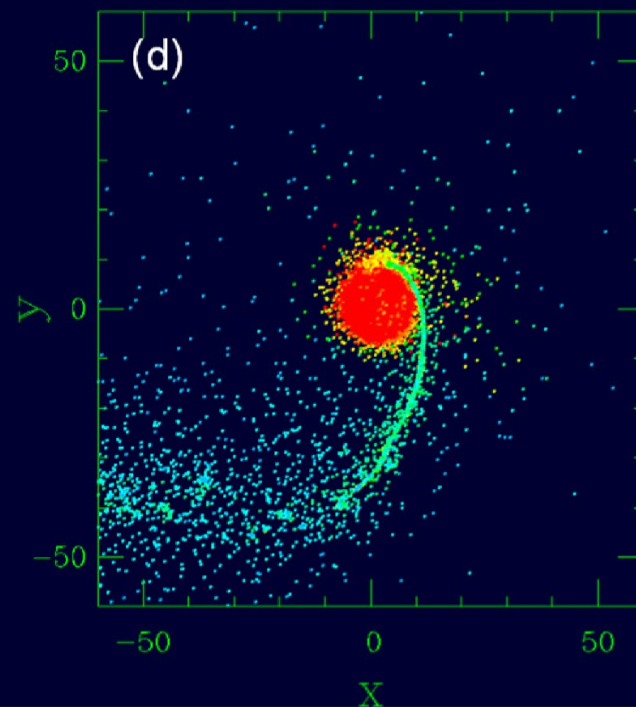


Canup
(2009)

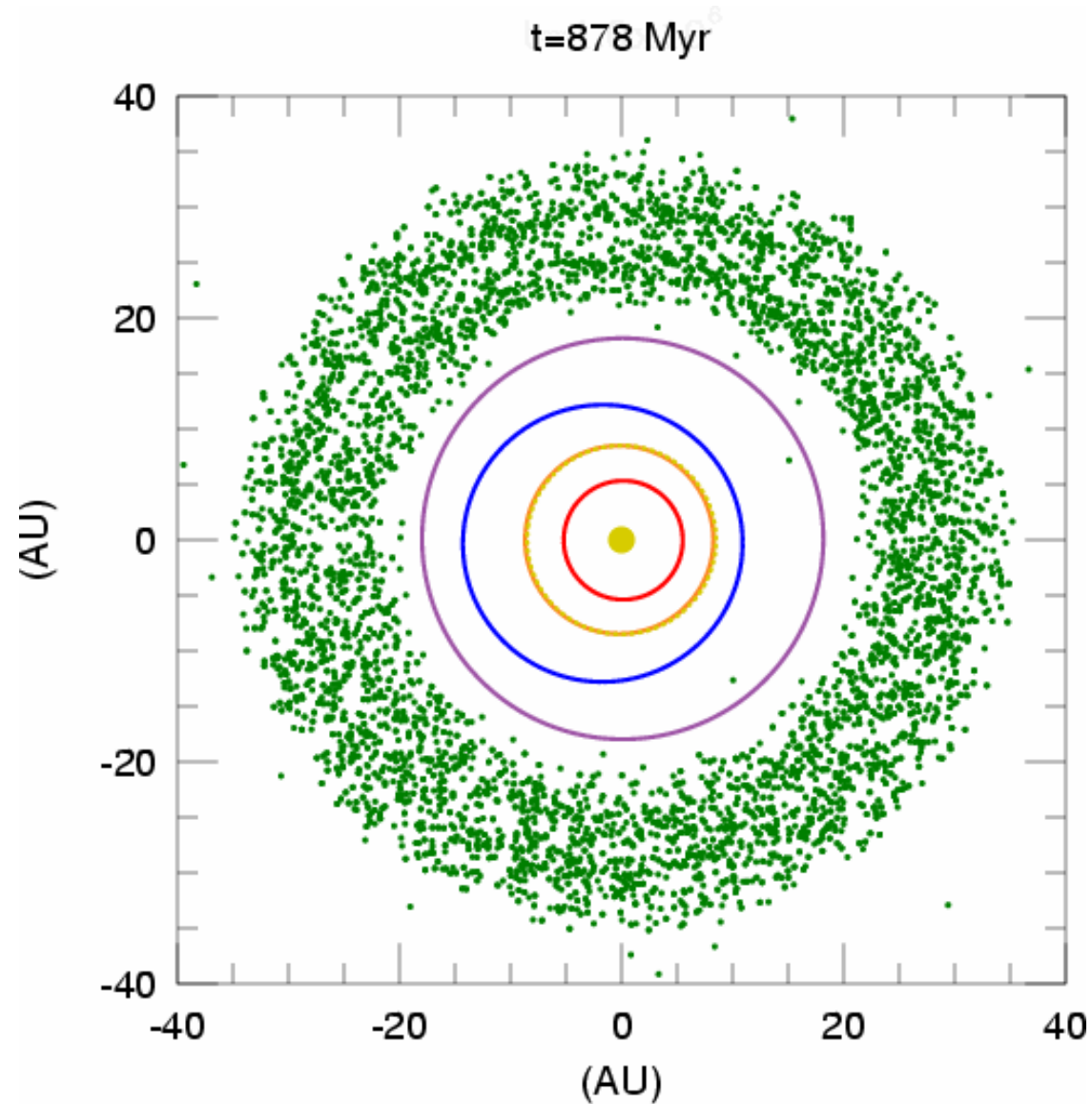
$t = 1.62$ hr



$t = 5.94$ hr

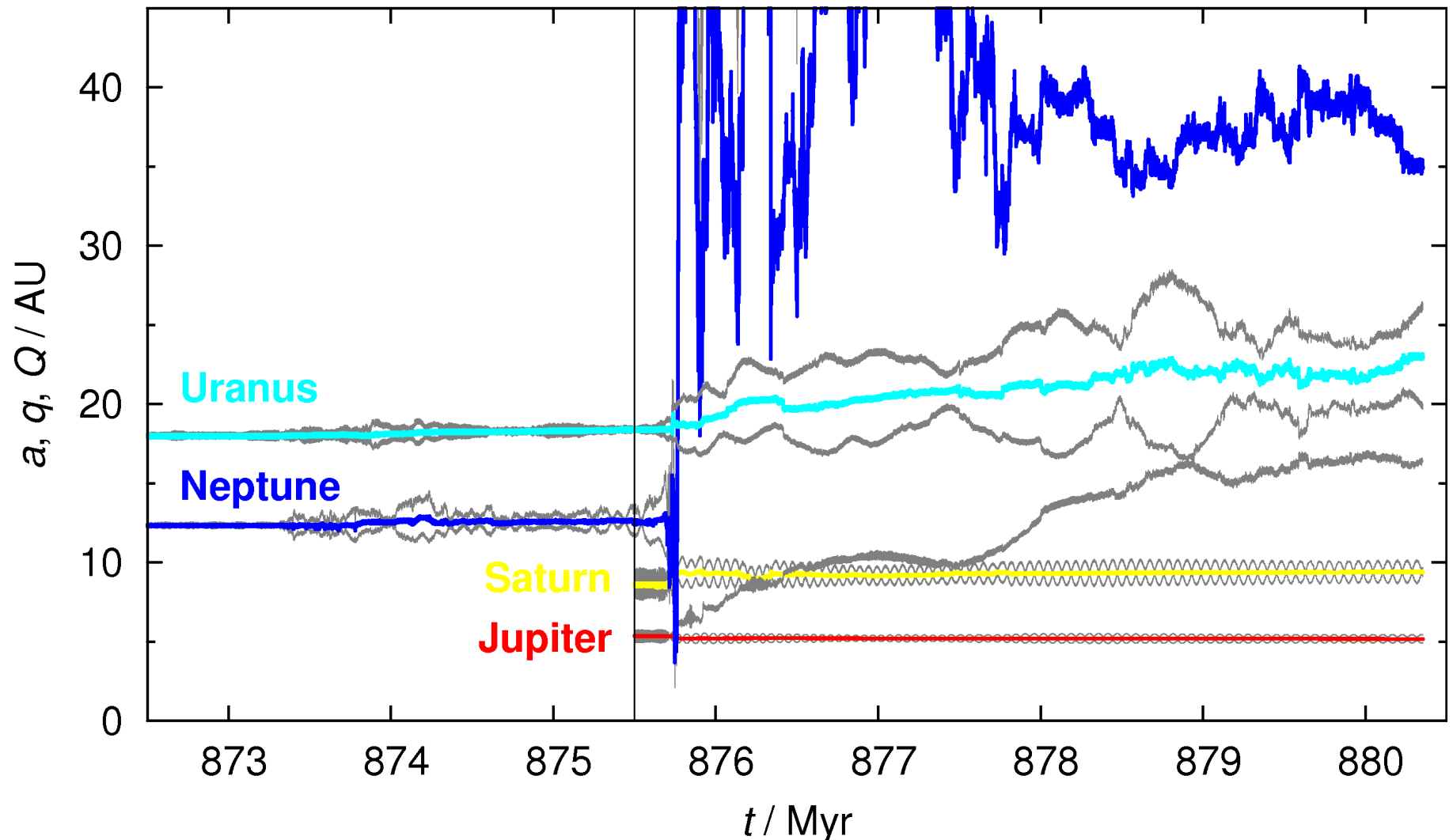


6. Migrace planet v disku planetesimál



Levison et al. (2009)

7. Blízka přiblížení planet

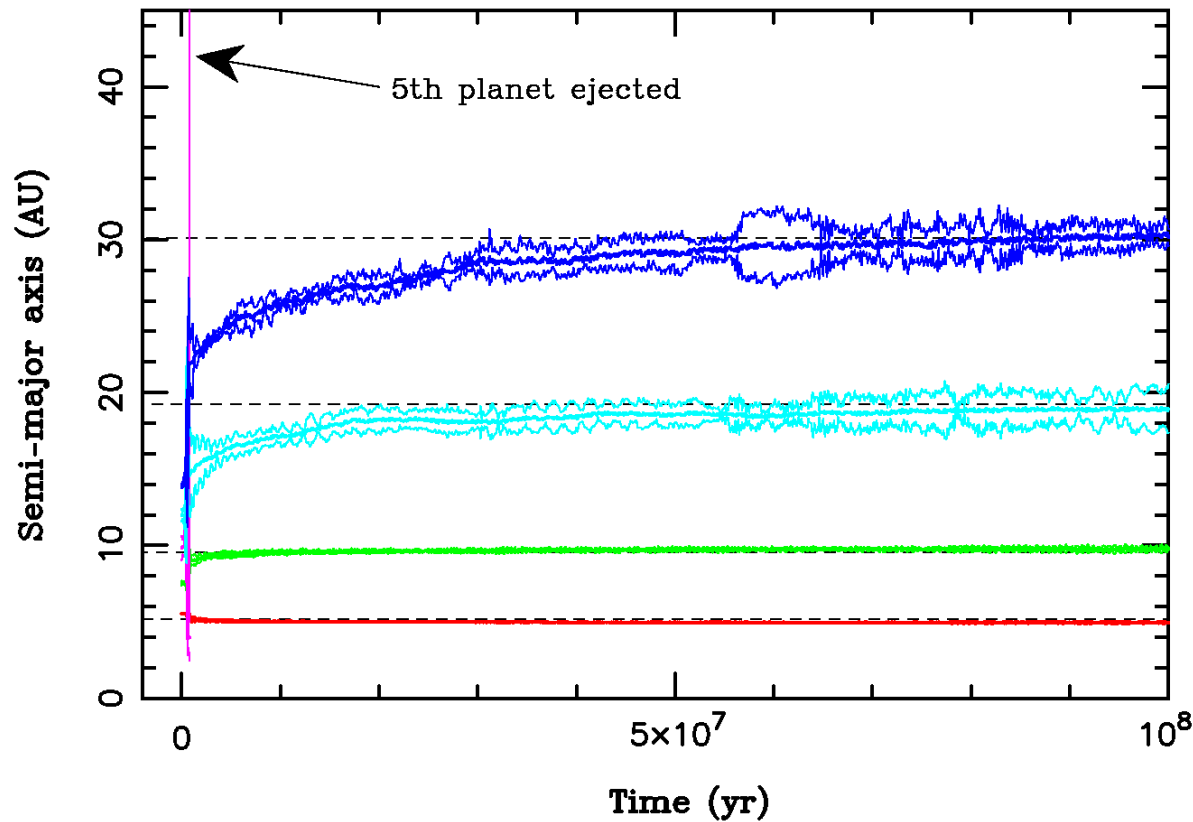


iregulární měsíce, planetky hlavního pásu s $i > 17^\circ$,
frekvence a amplitudy drah terestrických planet, ...

Morbidelli et al. (2010)

7. Vymrštění “9.” planety

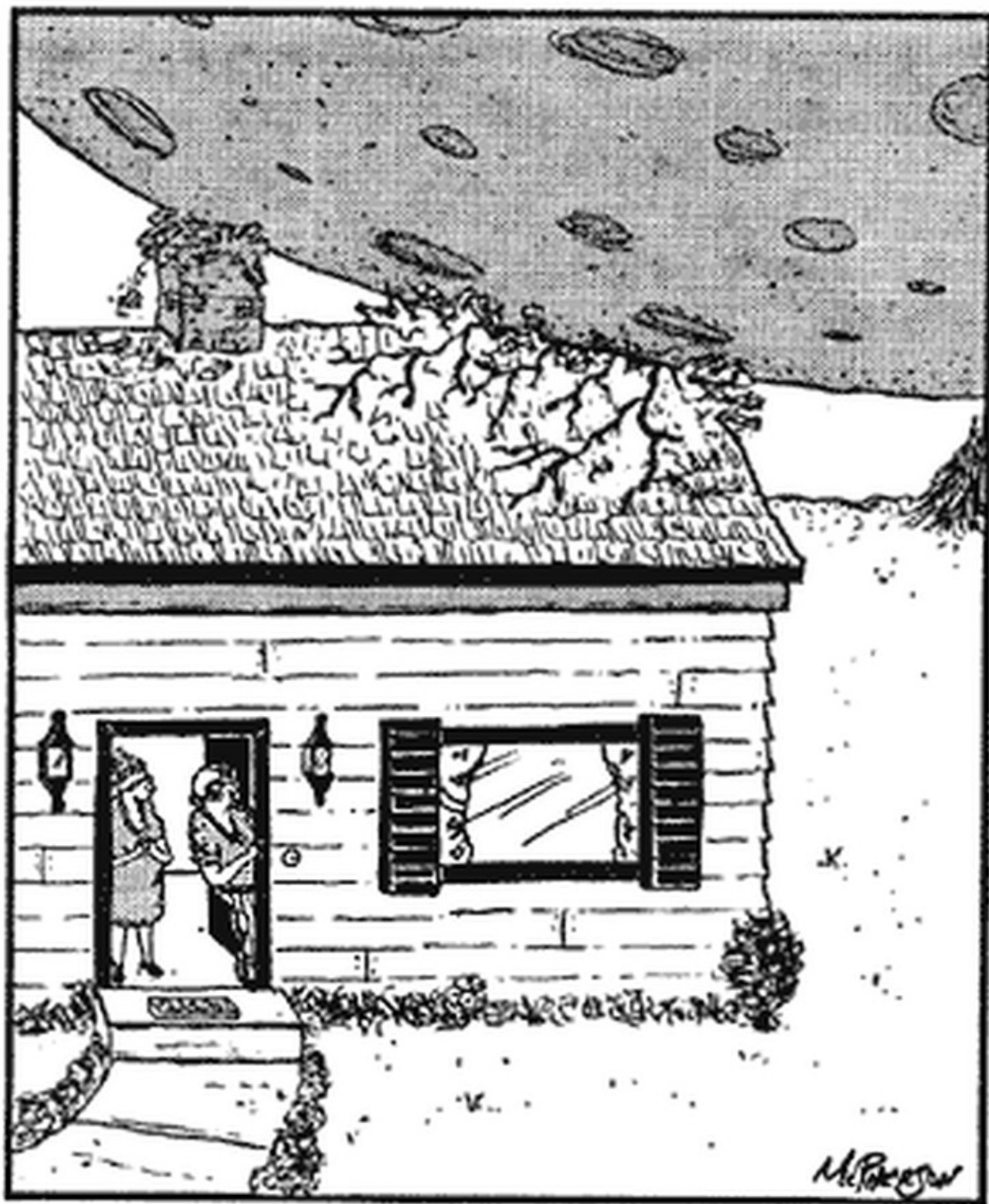
(ne Pluto)



stabilizace
zbývajících
planet

Figure 2. Orbit histories of giant planets in a simulation with five initial planets. The five planets were started in the (3:2,3:2,4:3,5:4) resonances, $M_{\text{disk}} = 50 M_{\text{Earth}}$, and $r_{\text{in}} = 15$ AU. After a series of encounters with Jupiter the inner ice giant was ejected from the solar system at 8.2×10^5 yr (purple path). The remaining planets were stabilized by the planetesimal disk and migrated to orbits that very closely match those of the outer planets (dashed lines).

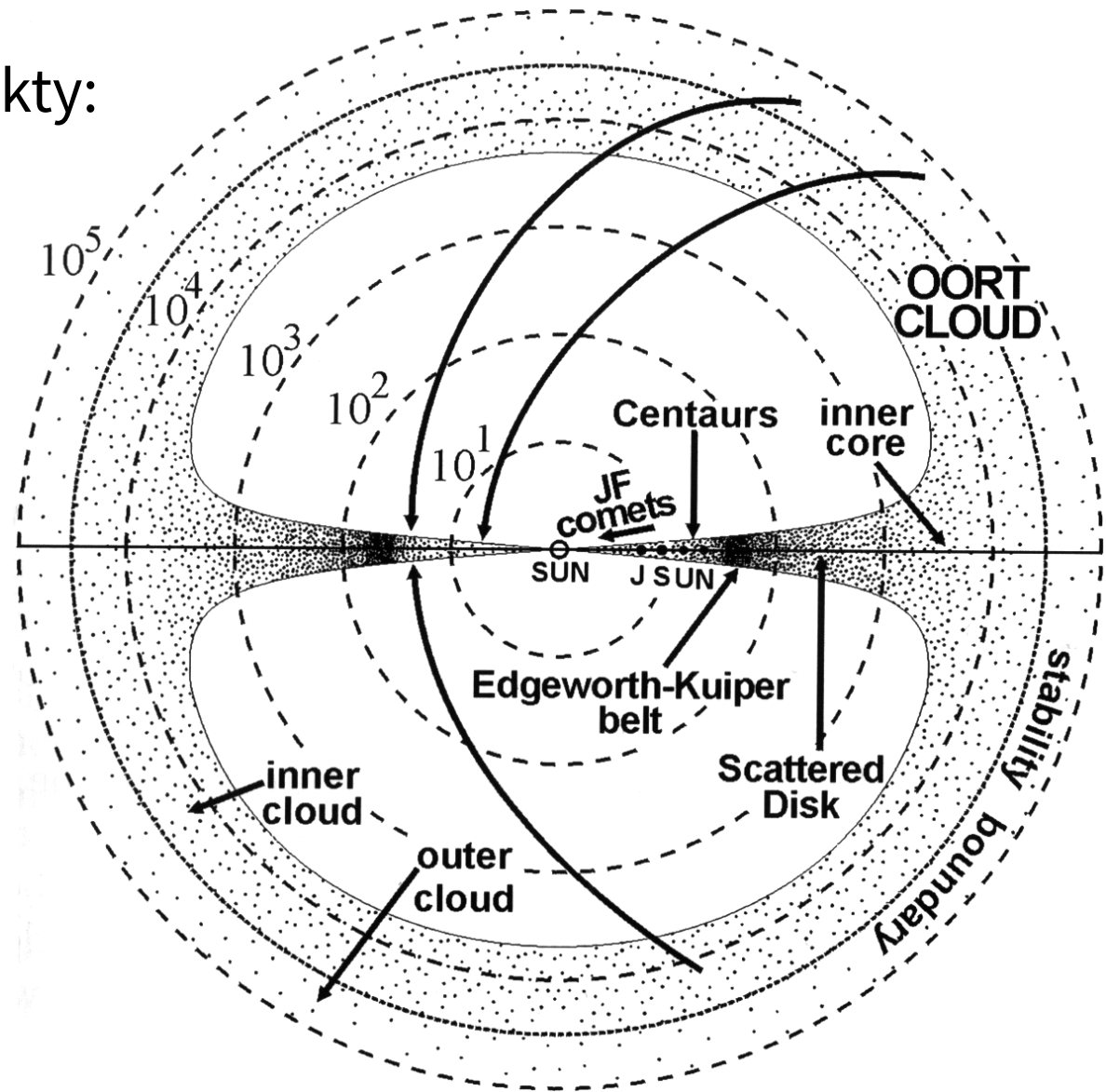
Nesvorný (2011)



"They say this is the closest Mars has been to Earth in 60,000 years."

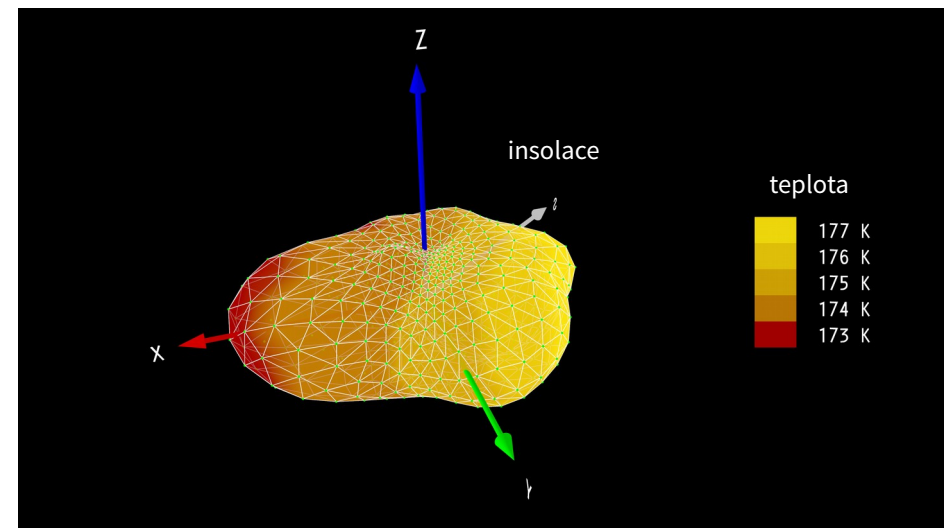
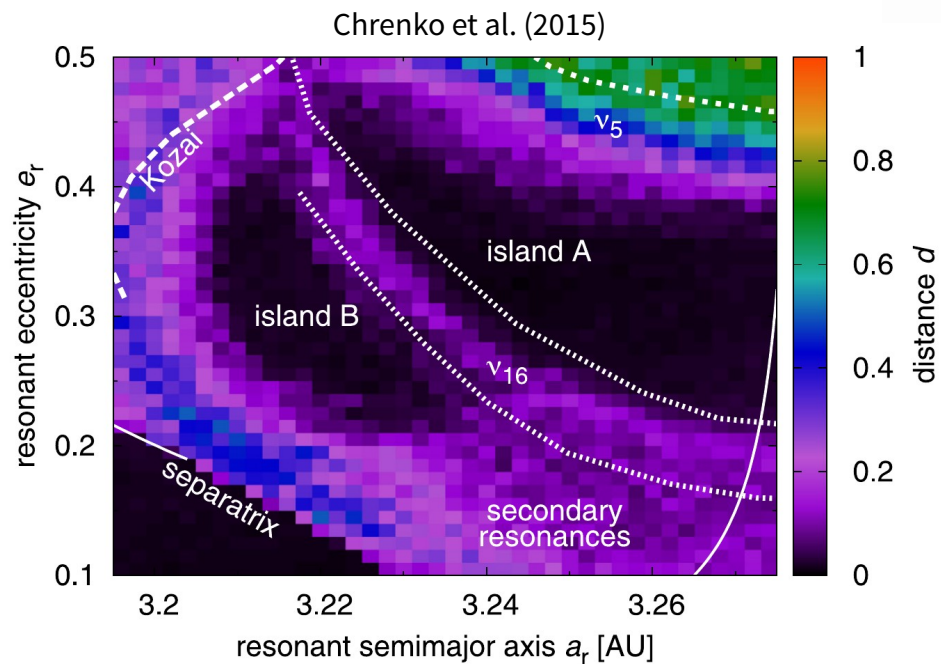
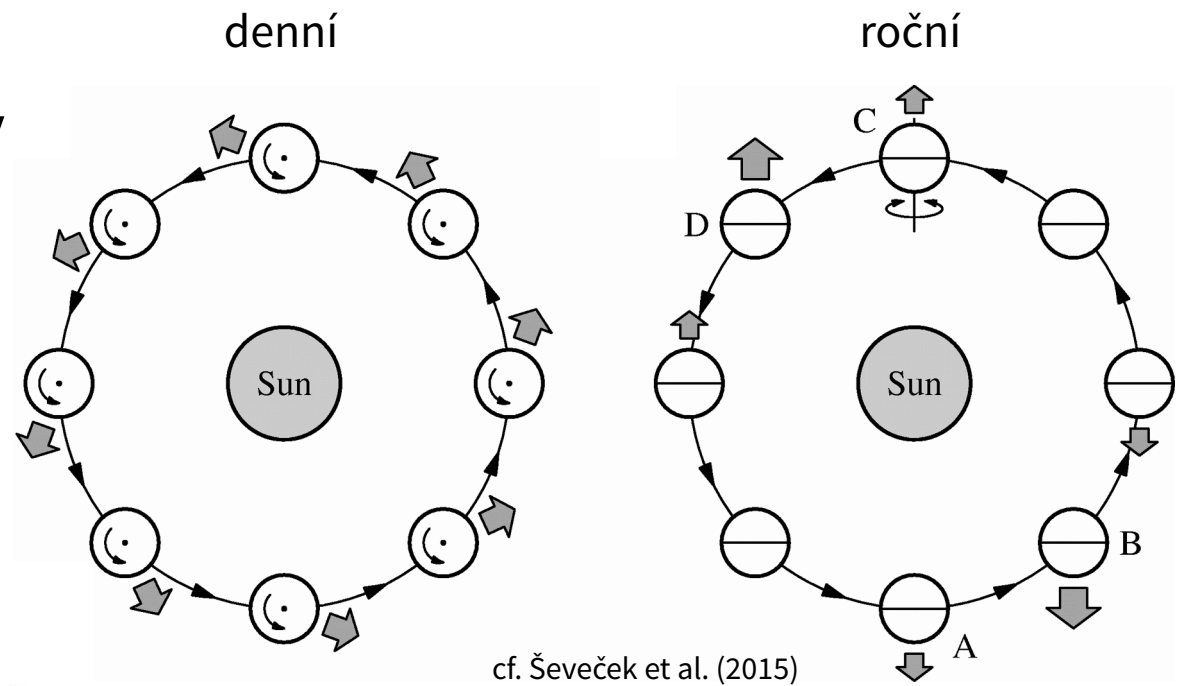
8. přiblížení * a galaktické slapy

- trans-neptunické objekty:
klasický Kuiperův pás,
Plutina (3:1), 2:1,
rozptýlený disk,
oddělený disk,
Oortův oblak
- Kentauři, komety
Jupiterovy rodiny, ...



9. Dlouhodobý vývoj planetek

- Jarkovského/YORP jev
- chaotická difuze
- vzájemné srážky
- přiblížení k \oplus aj.



9. Vývoj rodin planetek

- rodina Eos (Brož & Morbidelli 2013), taxonomický typ K, jádro vs. halo, Jarkovského drift da/dt vs. rezonance

