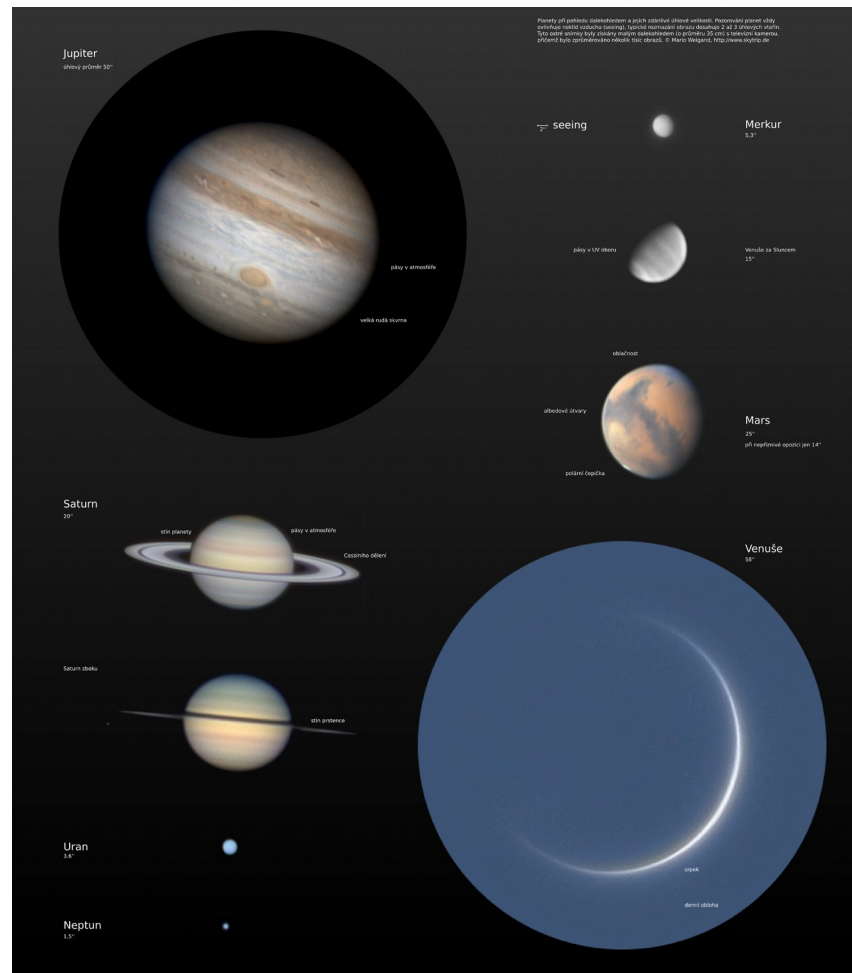


Hydrodynamika protoplanetárního disku

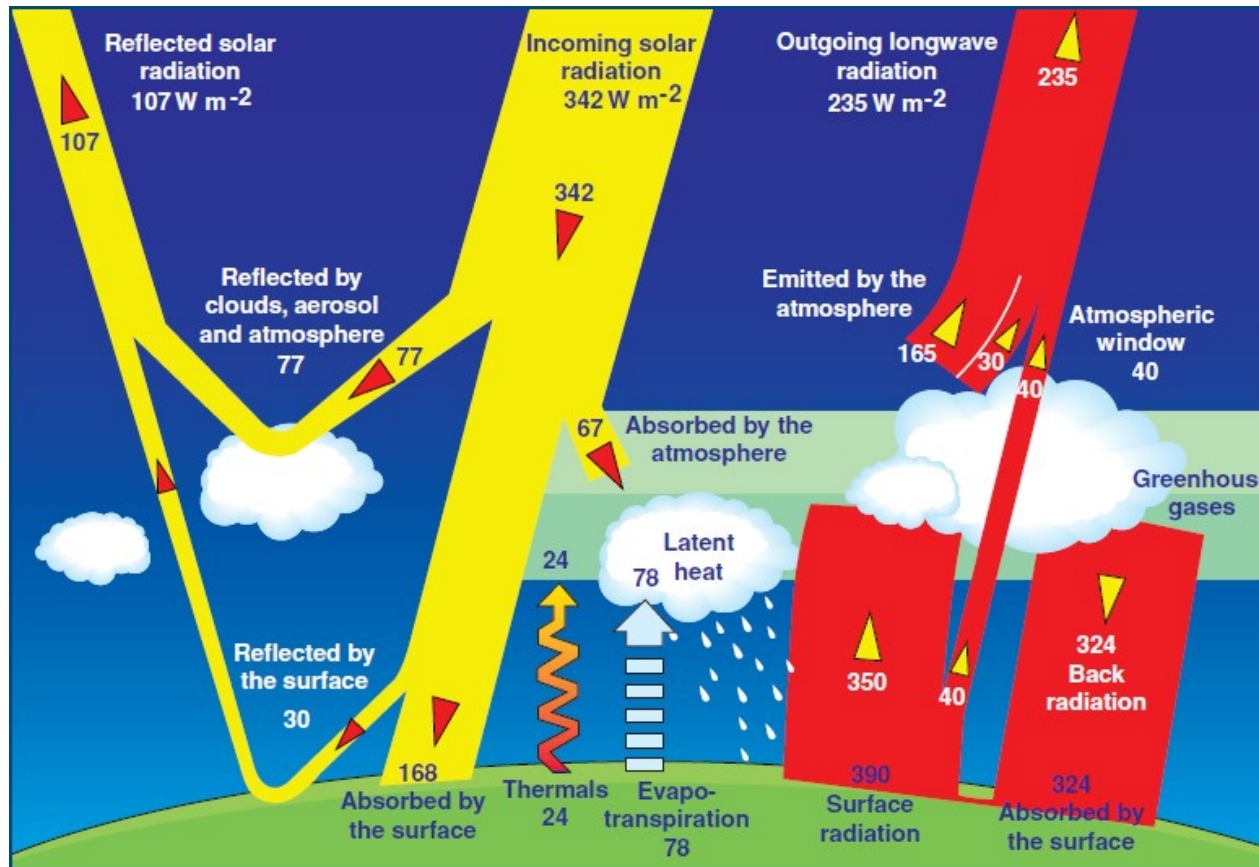


$$S = k_B \ln \Omega$$

Radiační bilance vs entropie

0,5°

360°



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

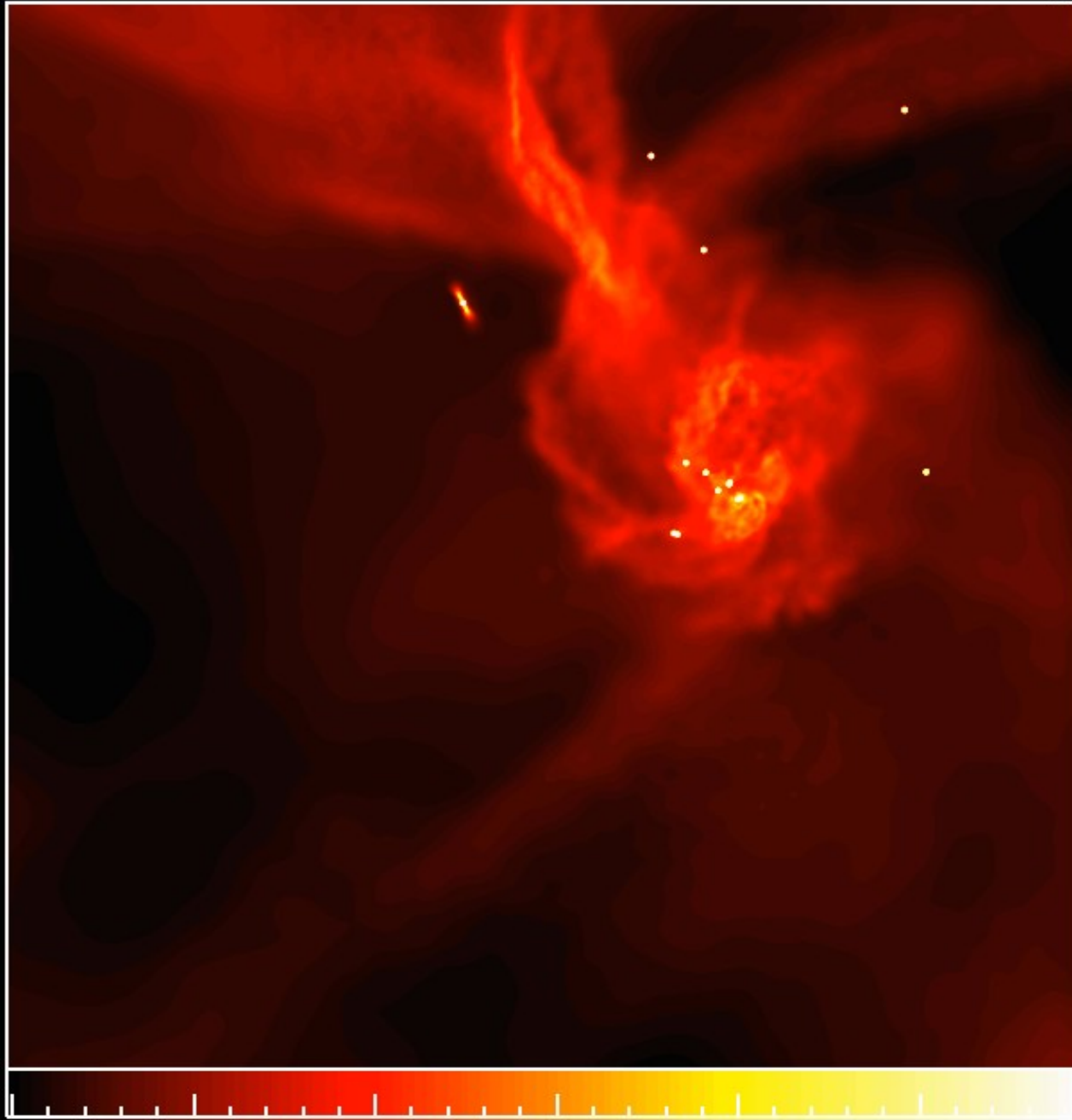
- Slunce “nic nedodává” ← jen udržuje rovnovážný stav
- skvrna na jinak temné obloze = zdroj nízké entropie (Penrose 2013)

9 základních fází

0. ochlazení ISM, gravitační kolaps GMC
1. TN reakce ve \odot → rovnovážný protoplanetární disk
2. akrece prachu: sněžení, sedimentace, spirálování, turbulence
3. akrece balvanů + tření, kolaps plynu → **obří planety** (~10 Myr)
4. migrace v plynném disku
5. srážky embryí → **terestrické planety**, Měsíc (~100 Myr)
6. migrace v disku planetesimál za Neptunem
7. blízká přiblížení planet, vymrštění „9.“ planety
8. přiblížení hvězd a galaktické slapy
9. Jarkovského jev, gravitační rezonance a srážky planetek

Dimensions: 5156. AU

Time: 221779. yr



-0.5

0.0

0.5

1.0

1.5

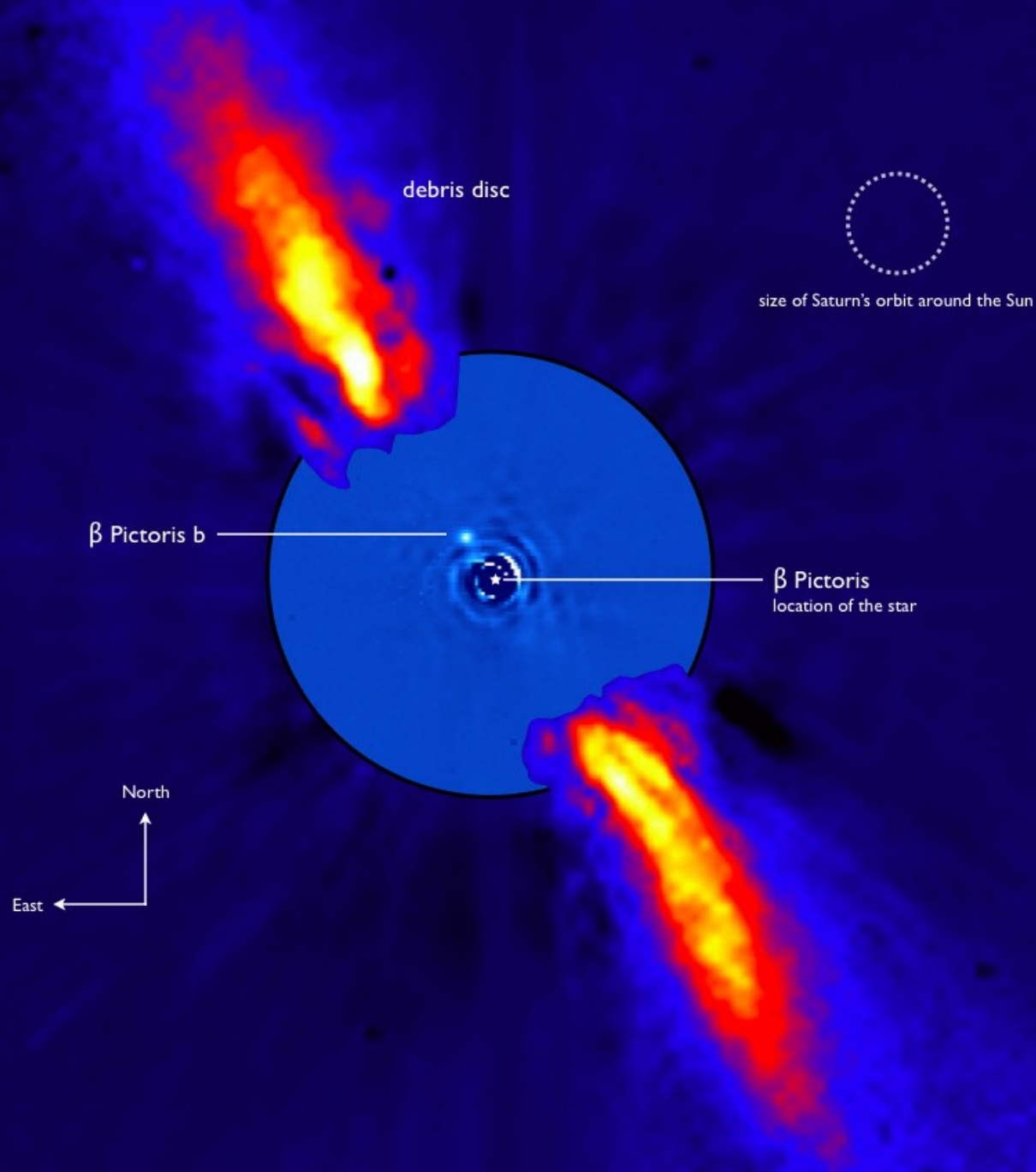
2.0

Log Column Density [g/cm^2]

Matthew Bate

simulace
kolapsu
GMC

Bate 2009



IR exces,
prachový
disk

beta Pictoris
© ESO

Lagrange
et al. 2009

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

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

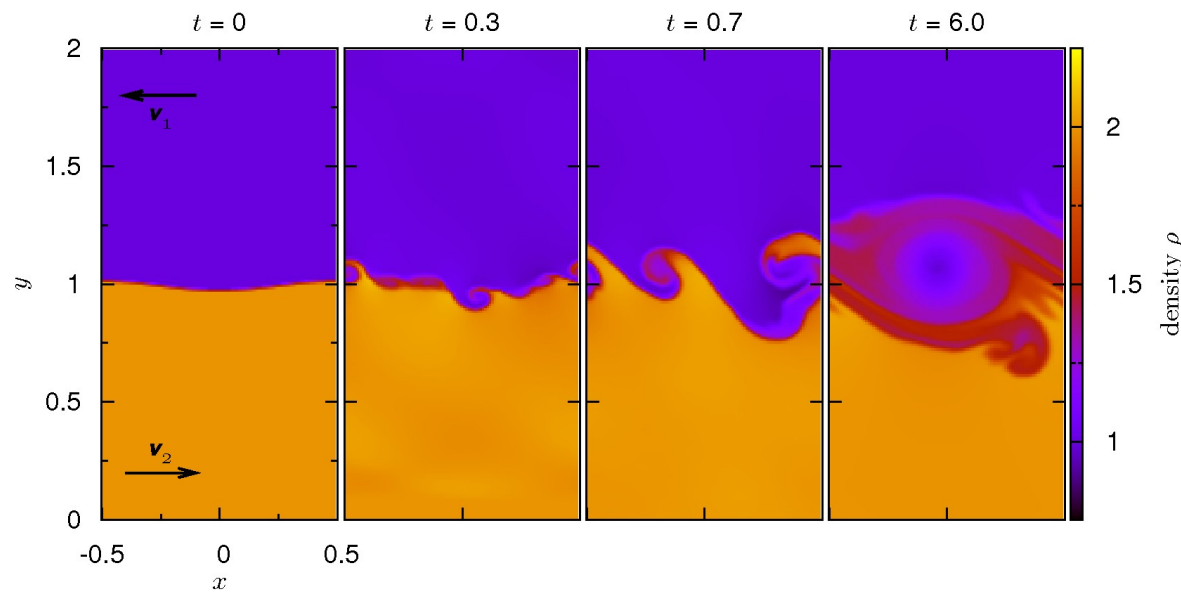
Poissonova rovnice ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$):

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

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**

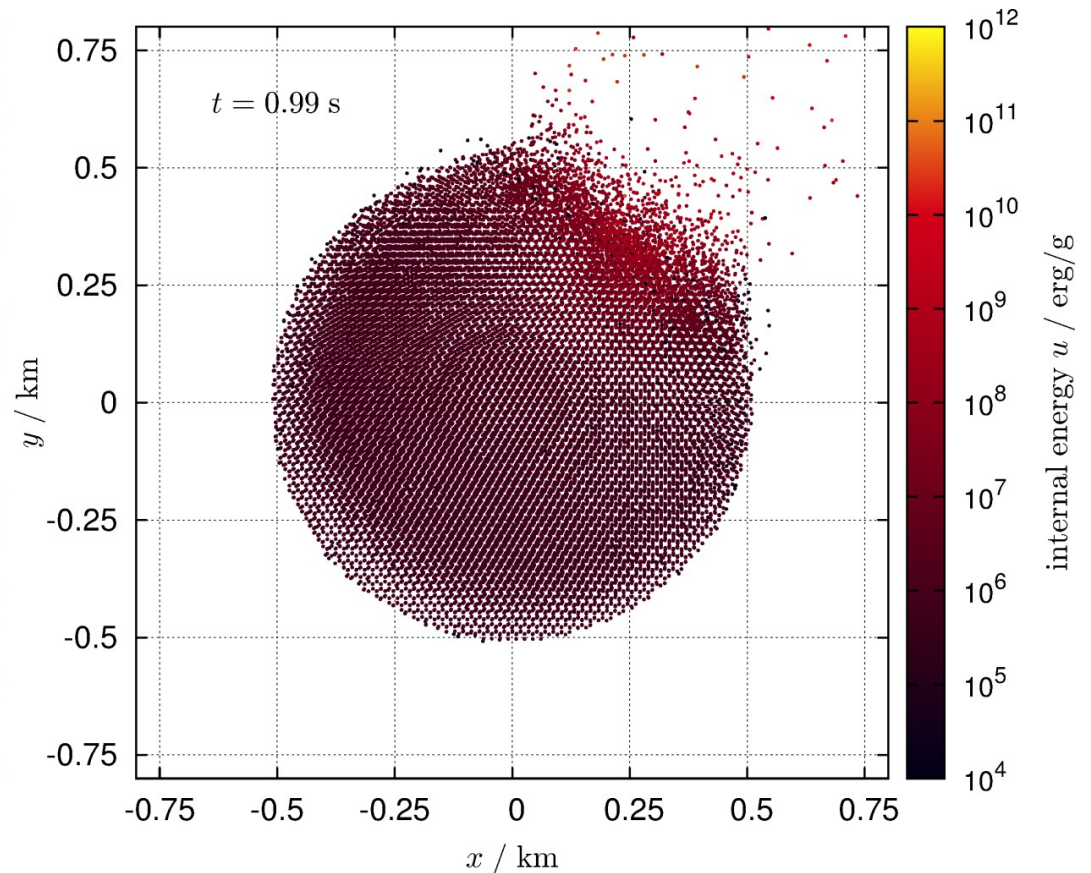
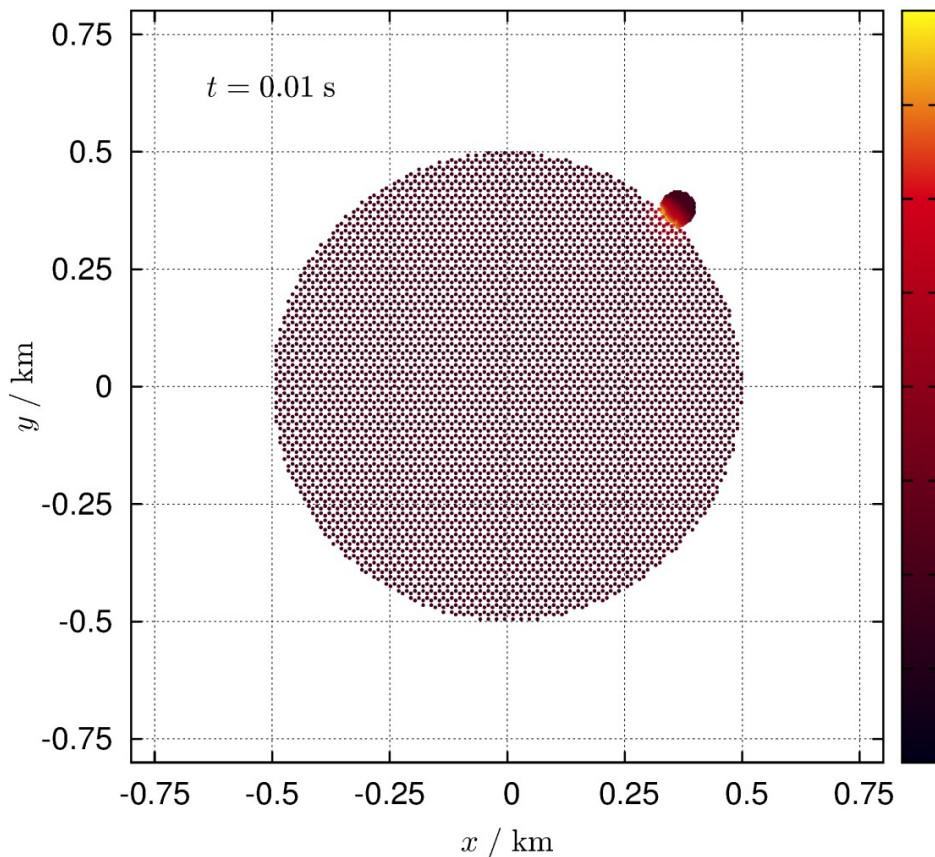


Kelvinova-Helmholtzova
nestabilita (základní)

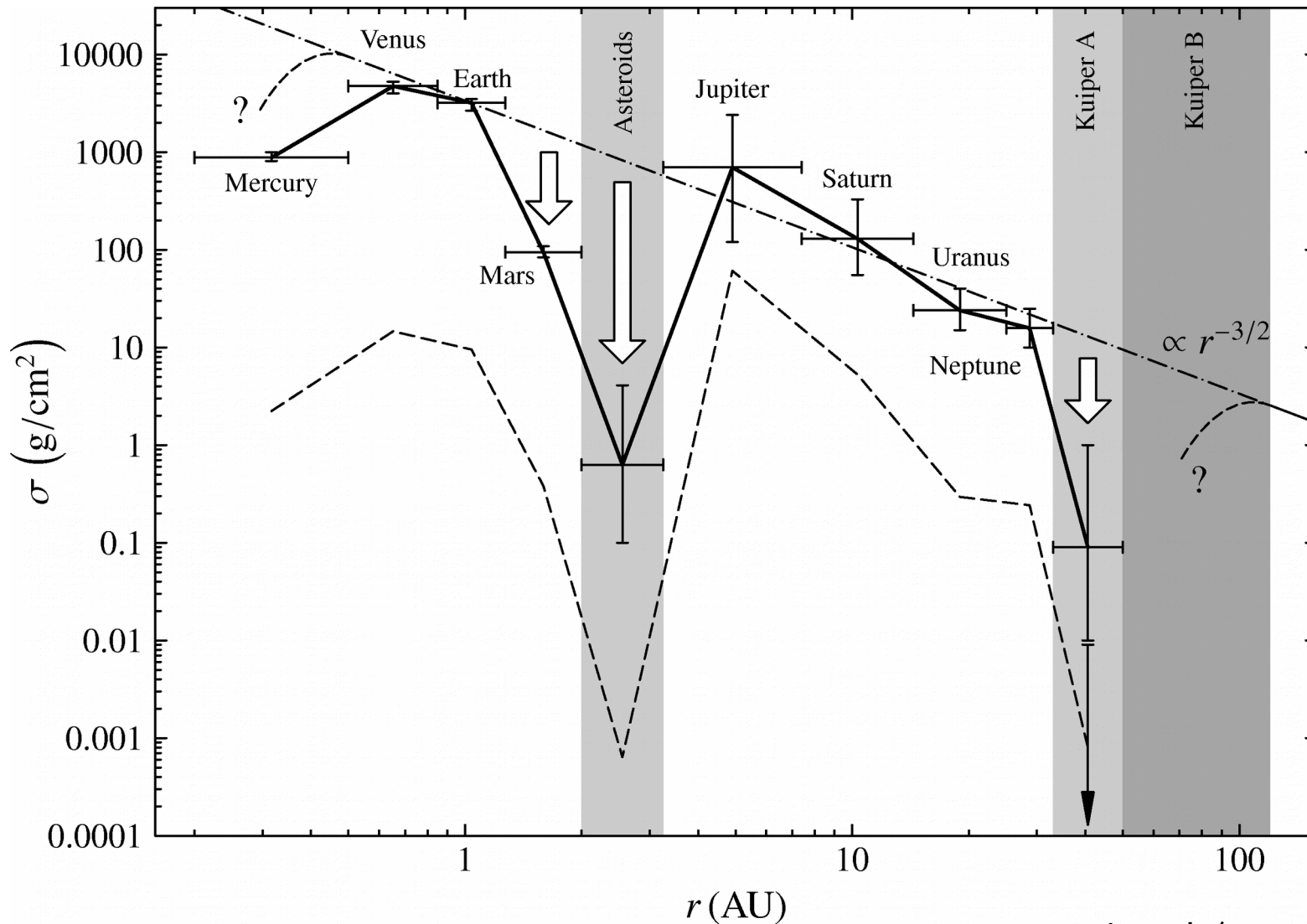
Mignone et al. (2007)

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)



I. Protoplanetární disk

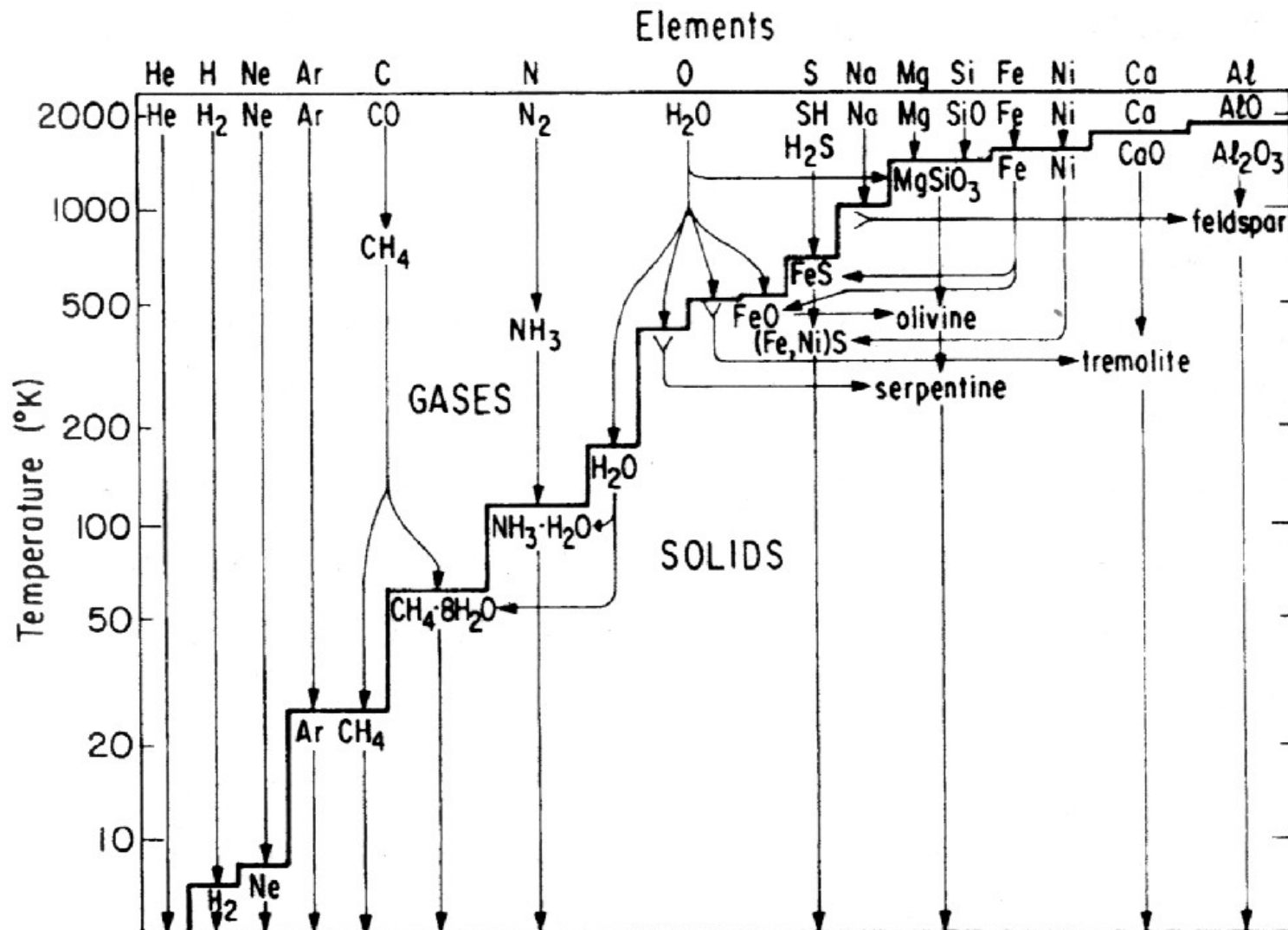


mlhovina
minimální
hmotnosti
(Hayashi 1971)

“rozprostření”
doplnění o H, He

Bertotti et al. (2003)

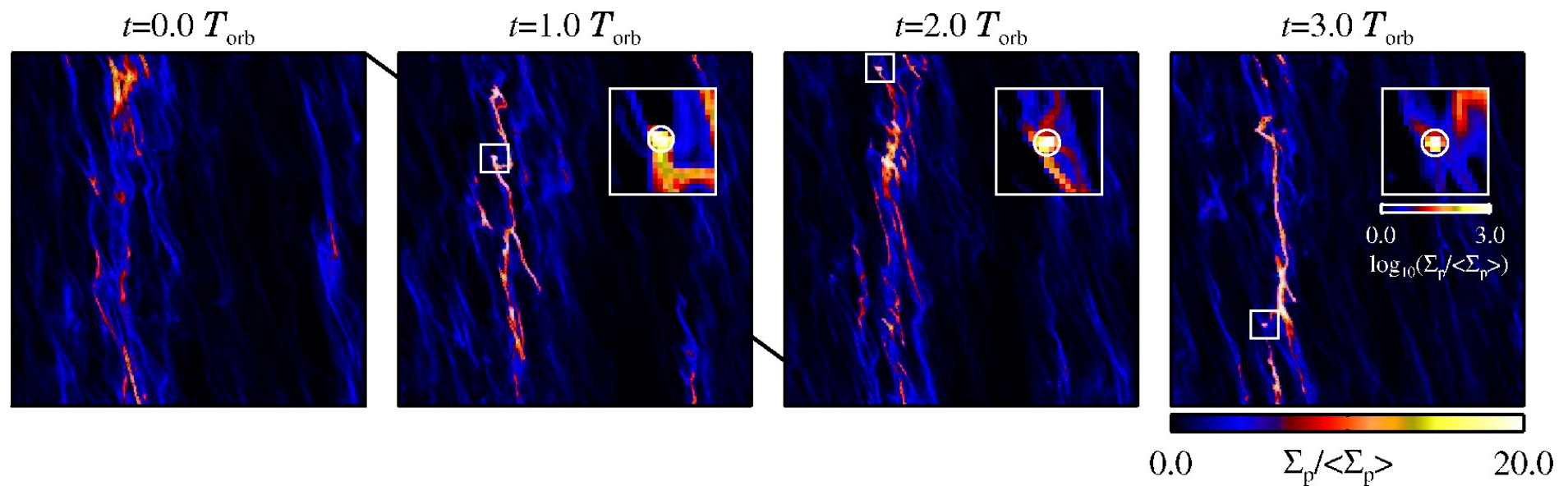
2. Sněžení prachu z plynu



Barshay & Lewis (1976), de Pater & Lissauer (2001)

2. Akrece prachu + turbulence

- klasická akrece + gravitační fokusování (Goldreich 2004) nefunguje! ← spirálování balvanů je rychlé
- nestabilita dvou proudění (angl. streaming instability)

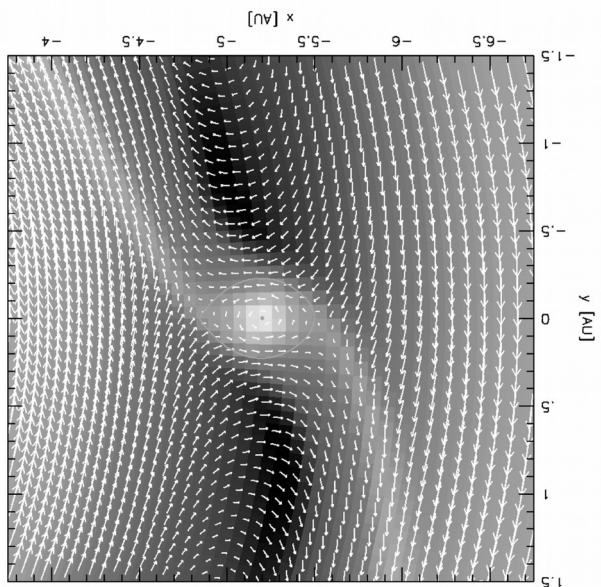


(Johansen et al. 2007)

3. Obří planety

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

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



Kley (2006)

Lambrechts & Johansen (2012)

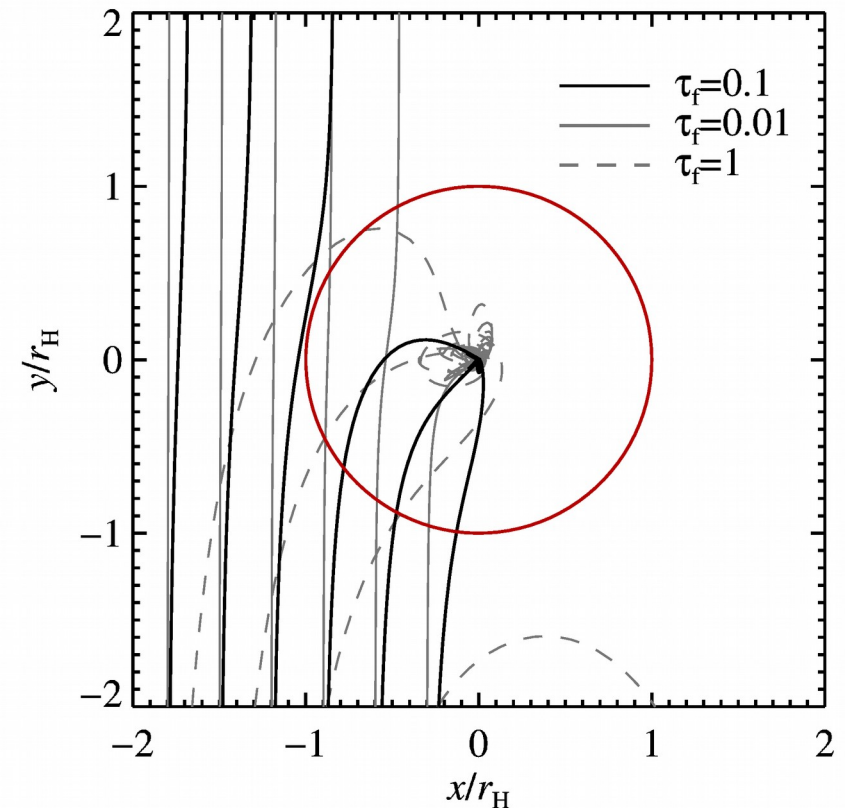


Fig. 7. Trajectories for particles with dimensionless friction time $\tau_f = 0.01, 0.1, 1$ obtained from the 2D Hill equations including gas drag. Pebbles with $\tau_f = 0.1$ and impact parameters below a Hill radius efficiently get accreted. Larger particles of $\tau_f = 1$ are pulled in from wider 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.

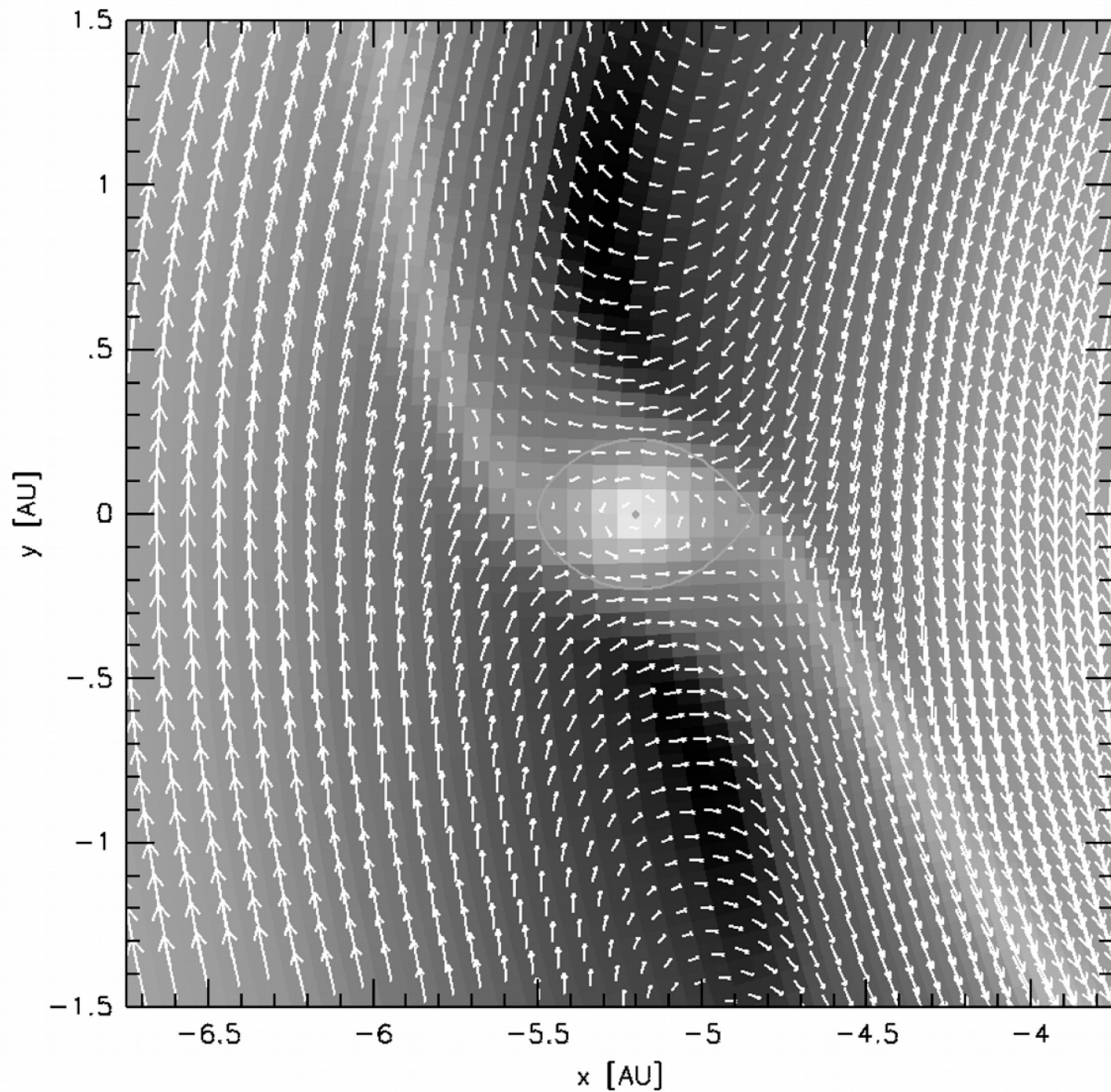
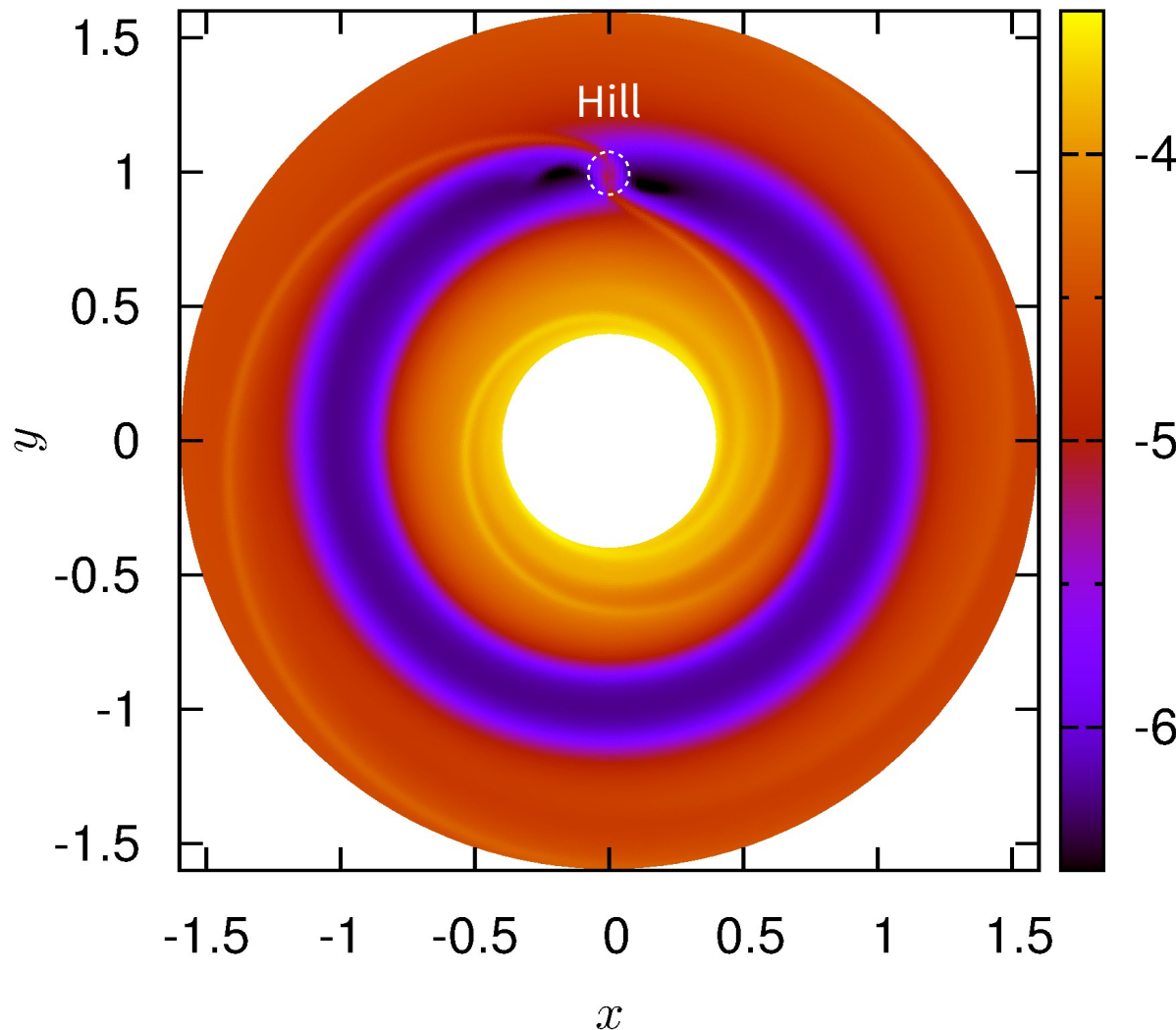


Figure 4: Flow field in the vicinity of a Jupiter mass planet (after Kley (1999)).

↓ samozřejmě obřích, terestrické nejsou

4. Migrace planet v plynném disku

$t = 3141.6 = 500 P_{\text{orb}}$



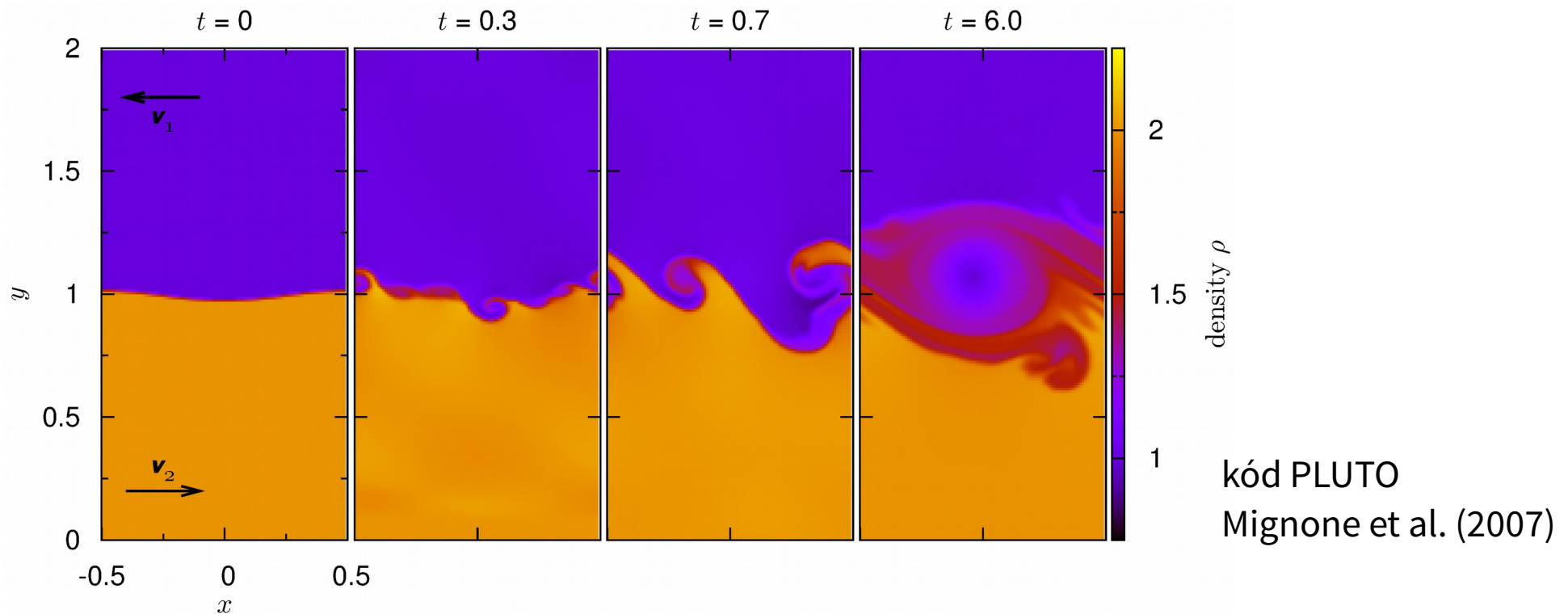
- gravitační interakce disk ↔ planeta
- Hillova sféra, spirální ramena, korotační oblast

předepsaná viskozita ν ,
migrace směrem dovnitř

kód FARGO
Masset (2000)

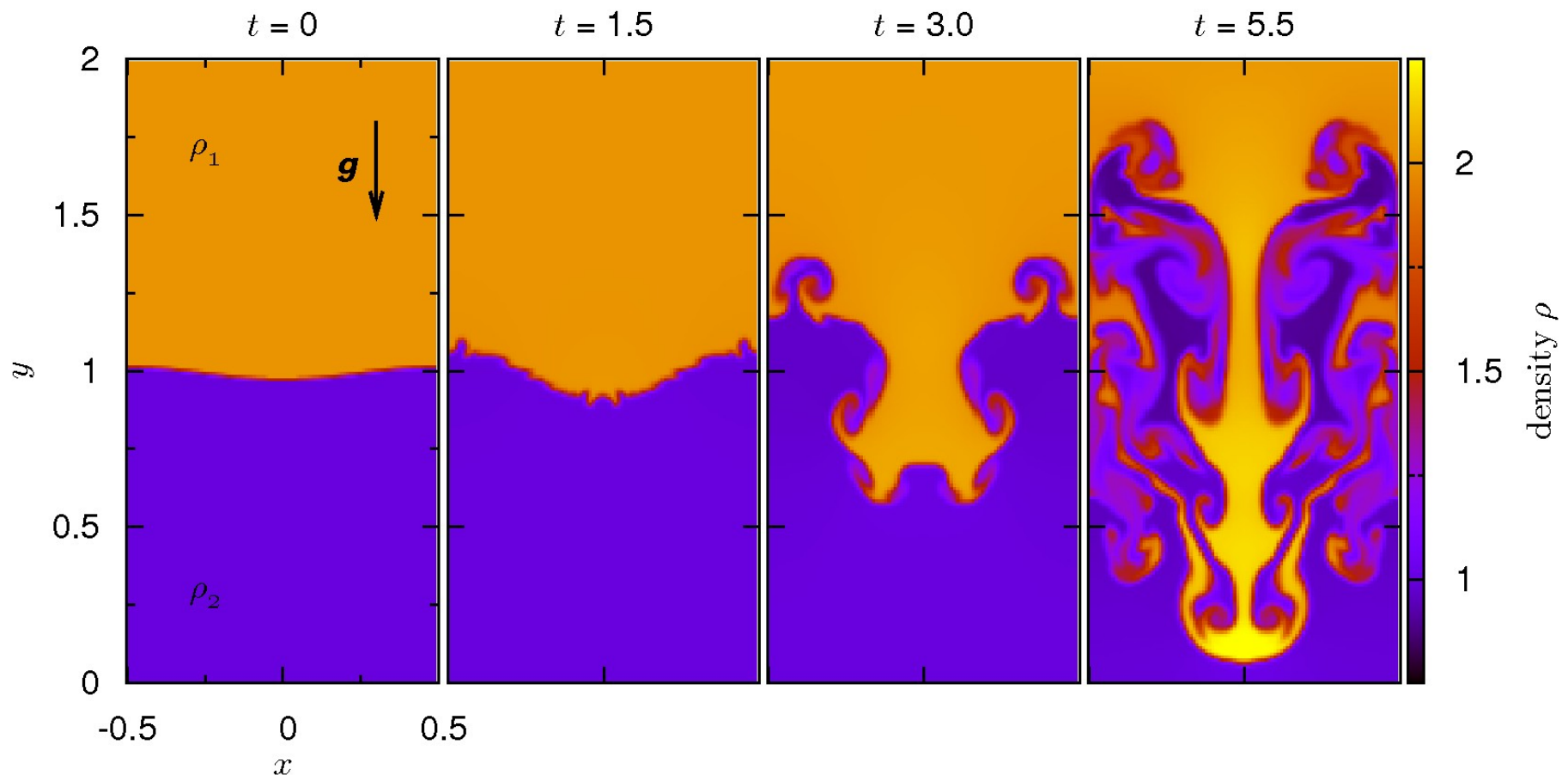
Zdroje viskozity ν ?

- vertikální stříhová nestabilita (VSI \sim KH)
- baroklinická nestabilita (SBI \sim RT, Klahr & Bodenheimer 2003)
- magneto-rotační nestabilita (MRI, Balbus & Hawley 1973)



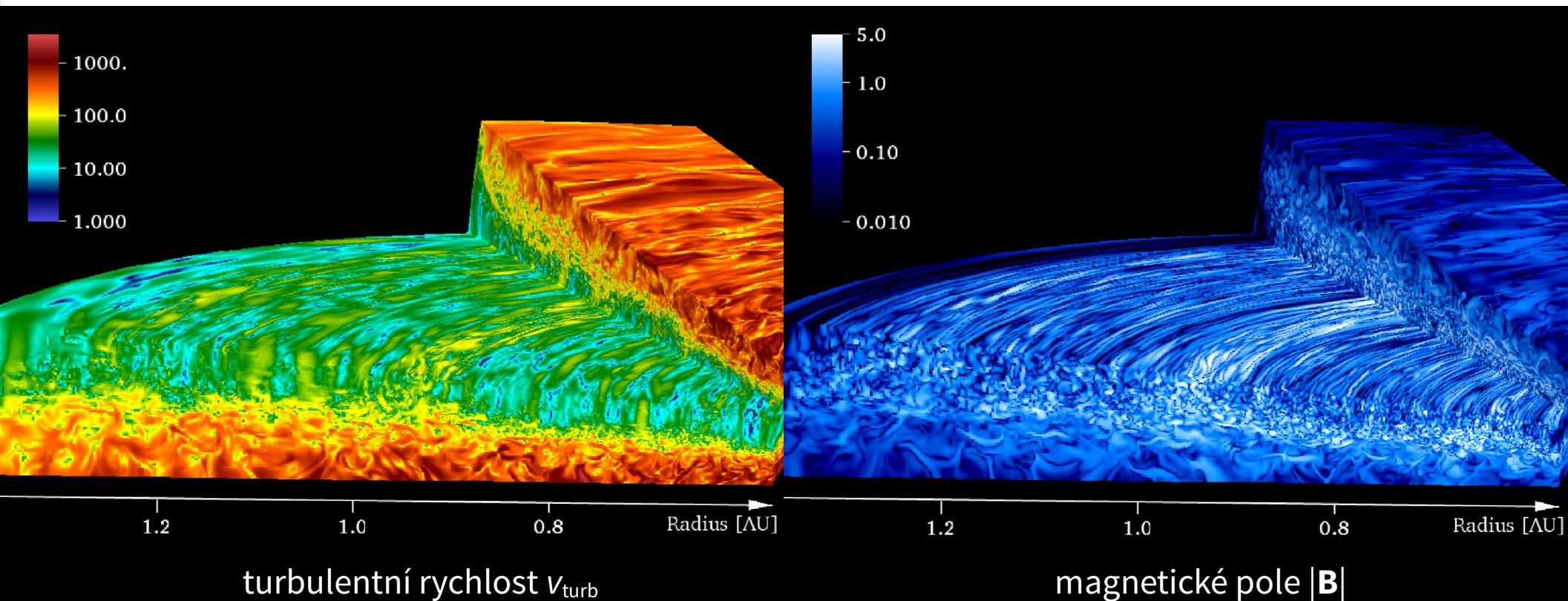
Rayleighova-Taylorova nestabilita

- 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)

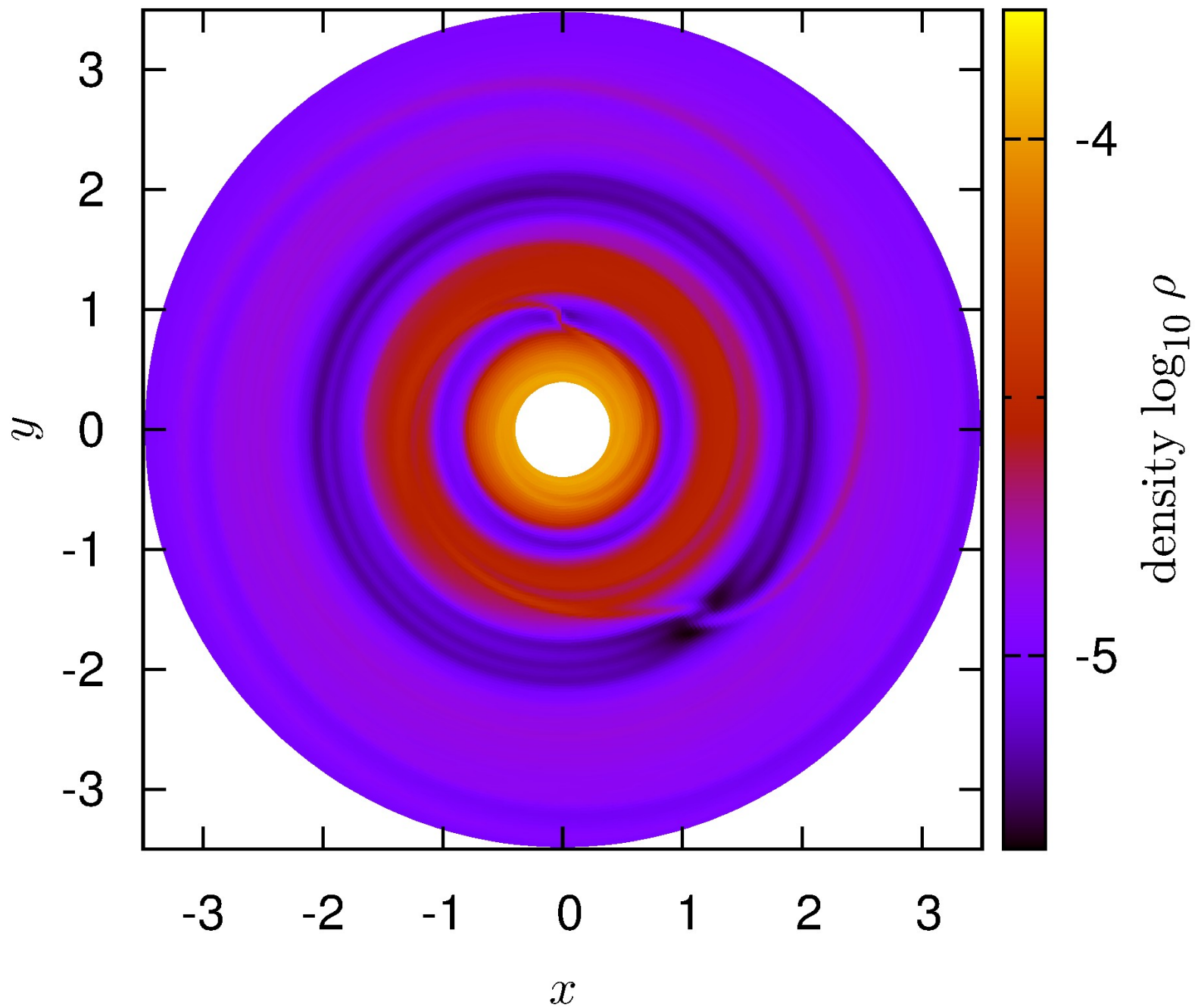


Typy migrace \leftarrow v plynu!

- **Typ I:** bez mezery, malé M , Lindbladovy rezonance
 \rightarrow spirální vlny, $da/dt \propto -M \Sigma v_{\text{kepl}}/H^2$
- **Typ II:** s mezerou, velké M , spirální ramena, $da/dt = -3\nu/(2a)$,
- **Typ III:** s částečnou mezerou, střední M , exponenciální da/dt
- **stochastická:** turbulence, náhodná chůze

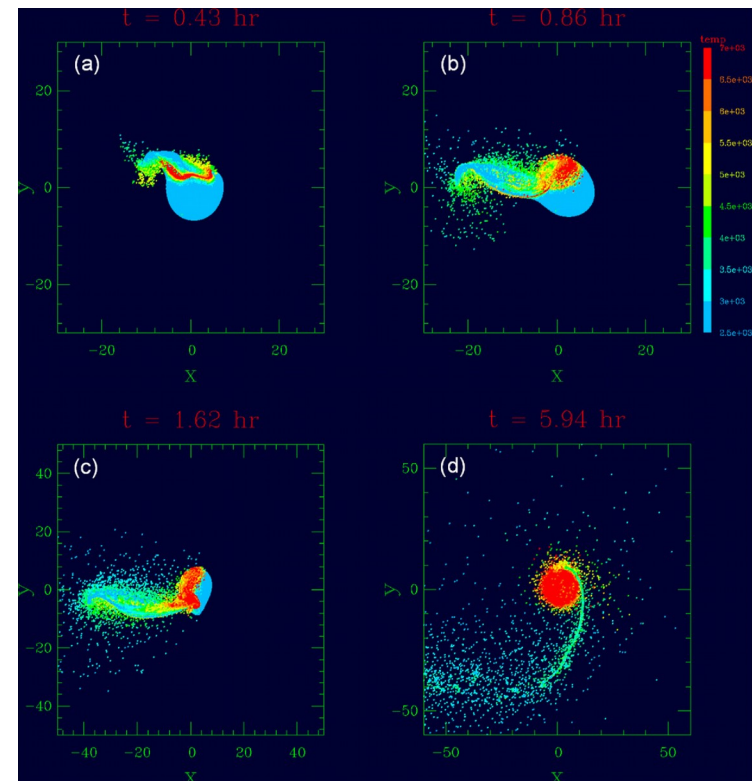
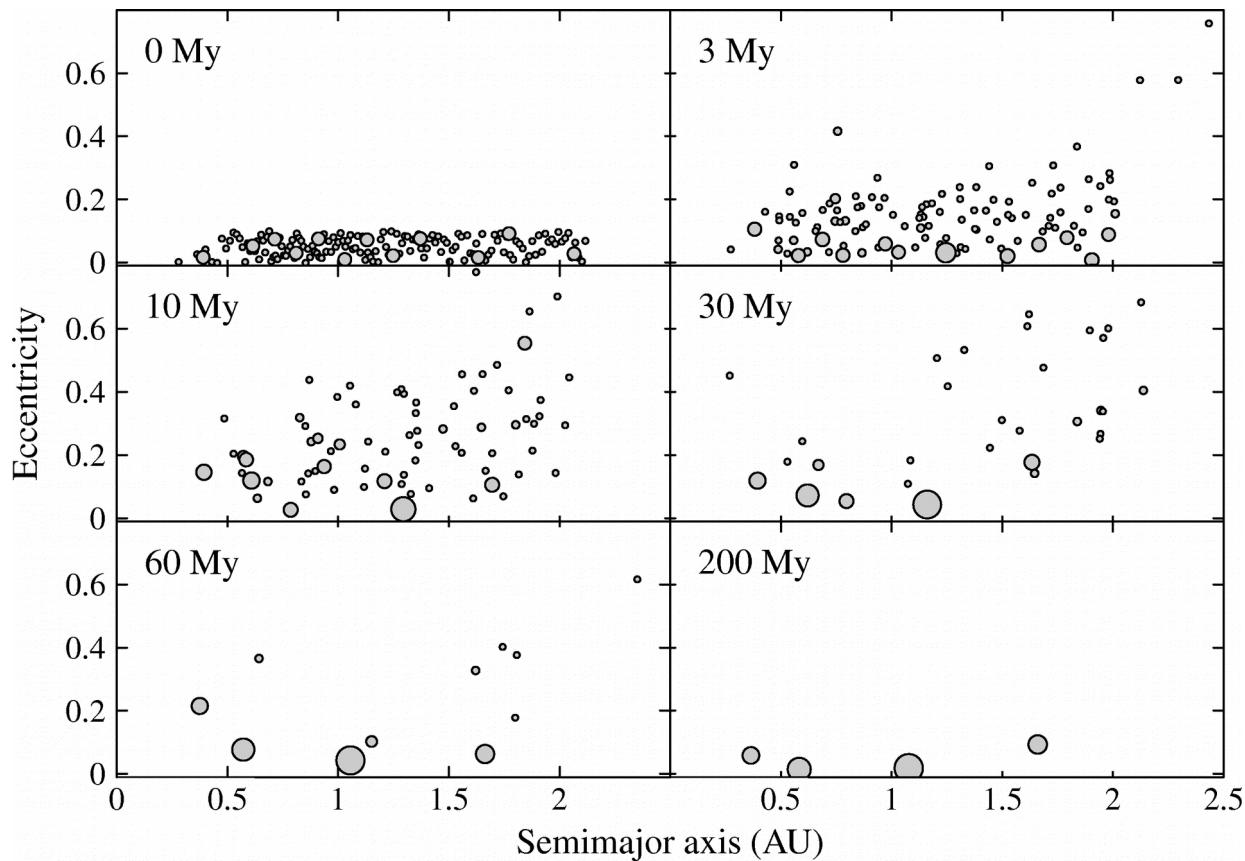
- překryv mezer, zachycení J & S v rezonanci 3:2, společná migrace *ven* (Morbidelli & Crida 2007)

$t = 3142.0 = 500 P_{\text{orb}}$

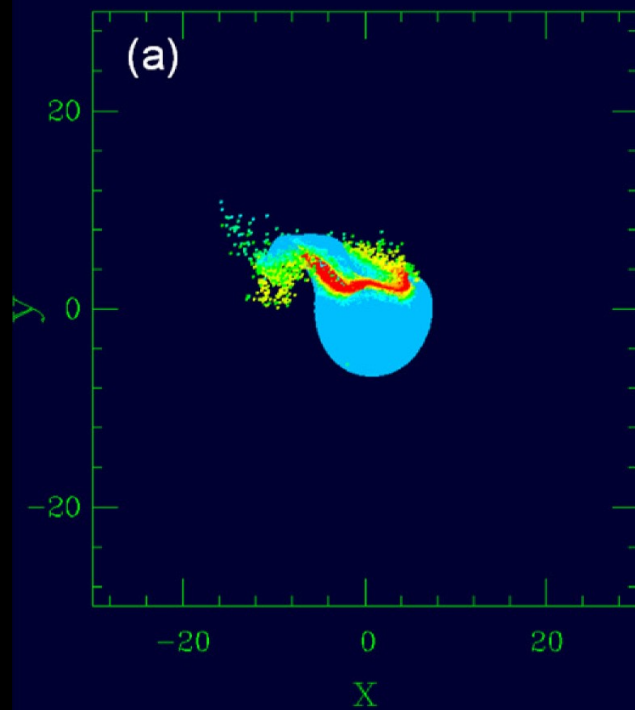


5. Terestrické planety

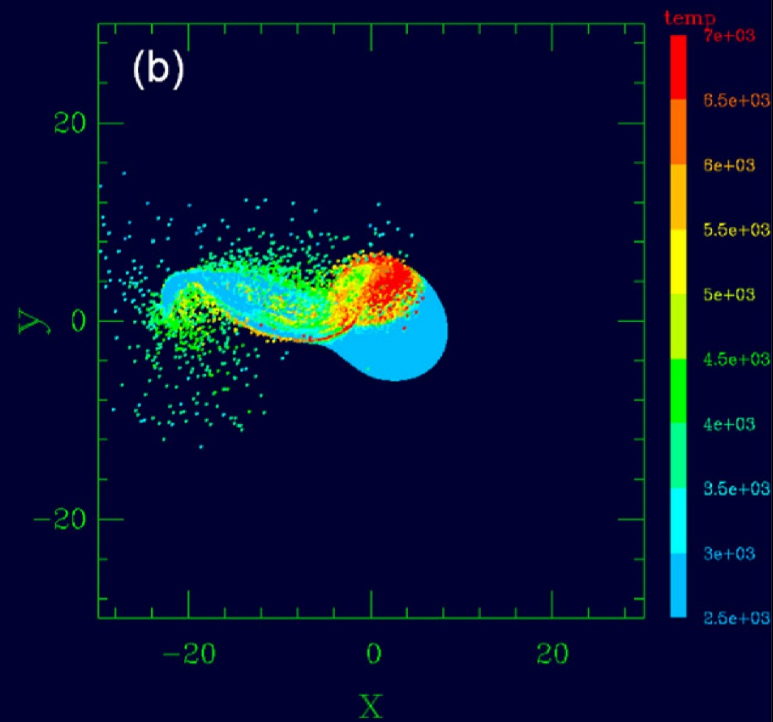
- srážky embryí v terestrické zóně (Chambers 2001)
- vznik Měsíce velkým necentrálním impaktem (Canup 2009)



$t = 0.43$ hr

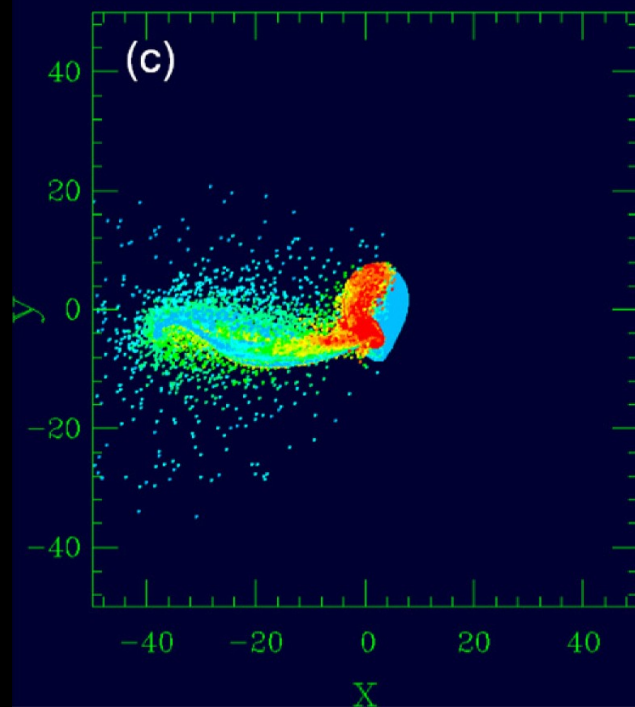


$t = 0.86$ hr

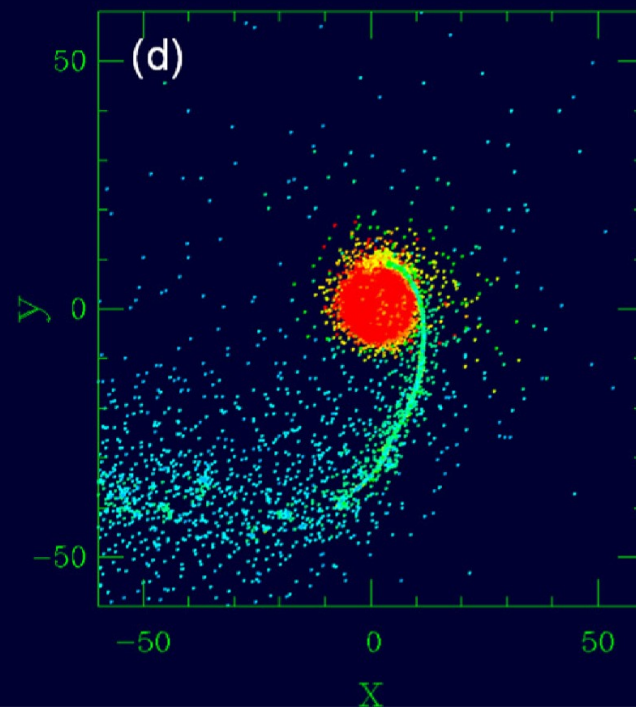


Canup
(2009)

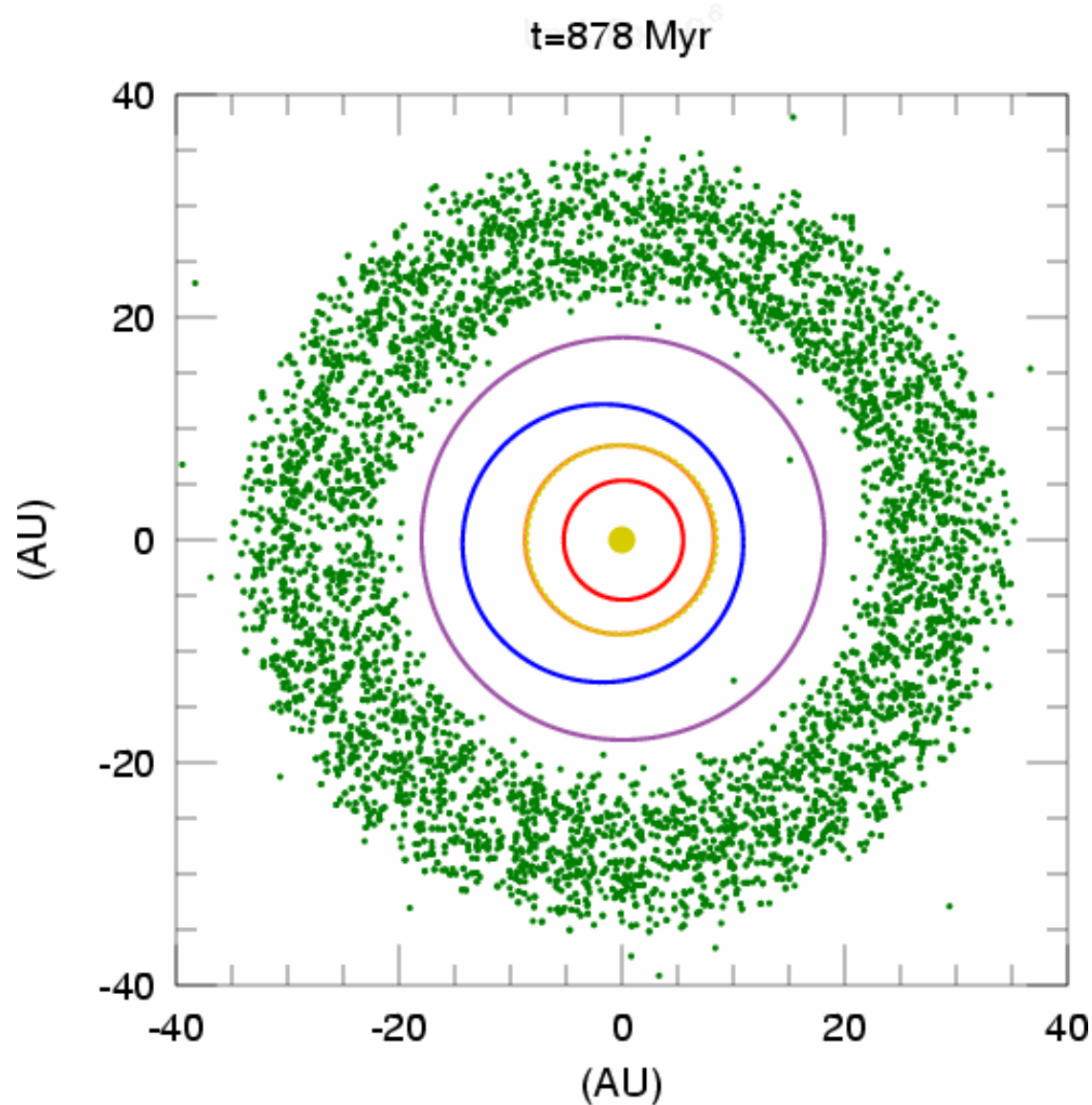
$t = 1.62$ hr



$t = 5.94$ hr



6. Migrace planet v disku planetesimál



model z Nice:
Gomez et al. (2005)
Tsiganis et al. (2005)
Morbidelli et al. (2005)

kompaktní systém
stabilizace diskem, ale
divergentní migrace
sekulární perturbace
rezonance J & S 2:1
nebo jiné

Levison et al. (2009)

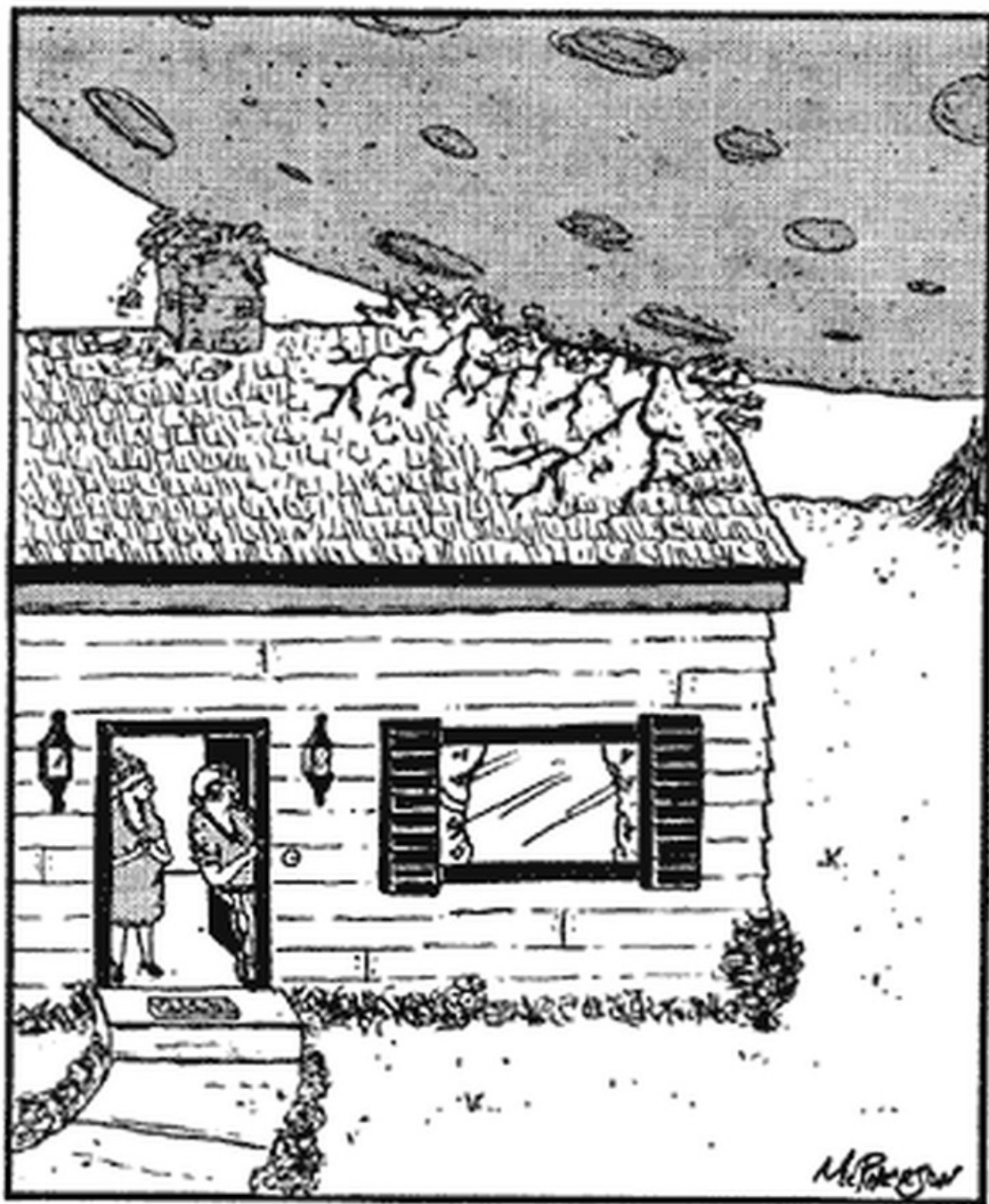
Typy migrace (cont.) ← v planetesimálách!

- **tlumená:** $dM_d/dt \propto -M_d$, da/dt exponenciálně klesá
- **podporovaná překotná:** $dM_d/dt \propto M_d$ kvůli nabírání „nových“ planetesimál při migraci samotné
- **podporovaná nucená:** přísun planetesimál kvůli přítomnosti další planety

osamocený Jupiter migruje dovnitř, ale...

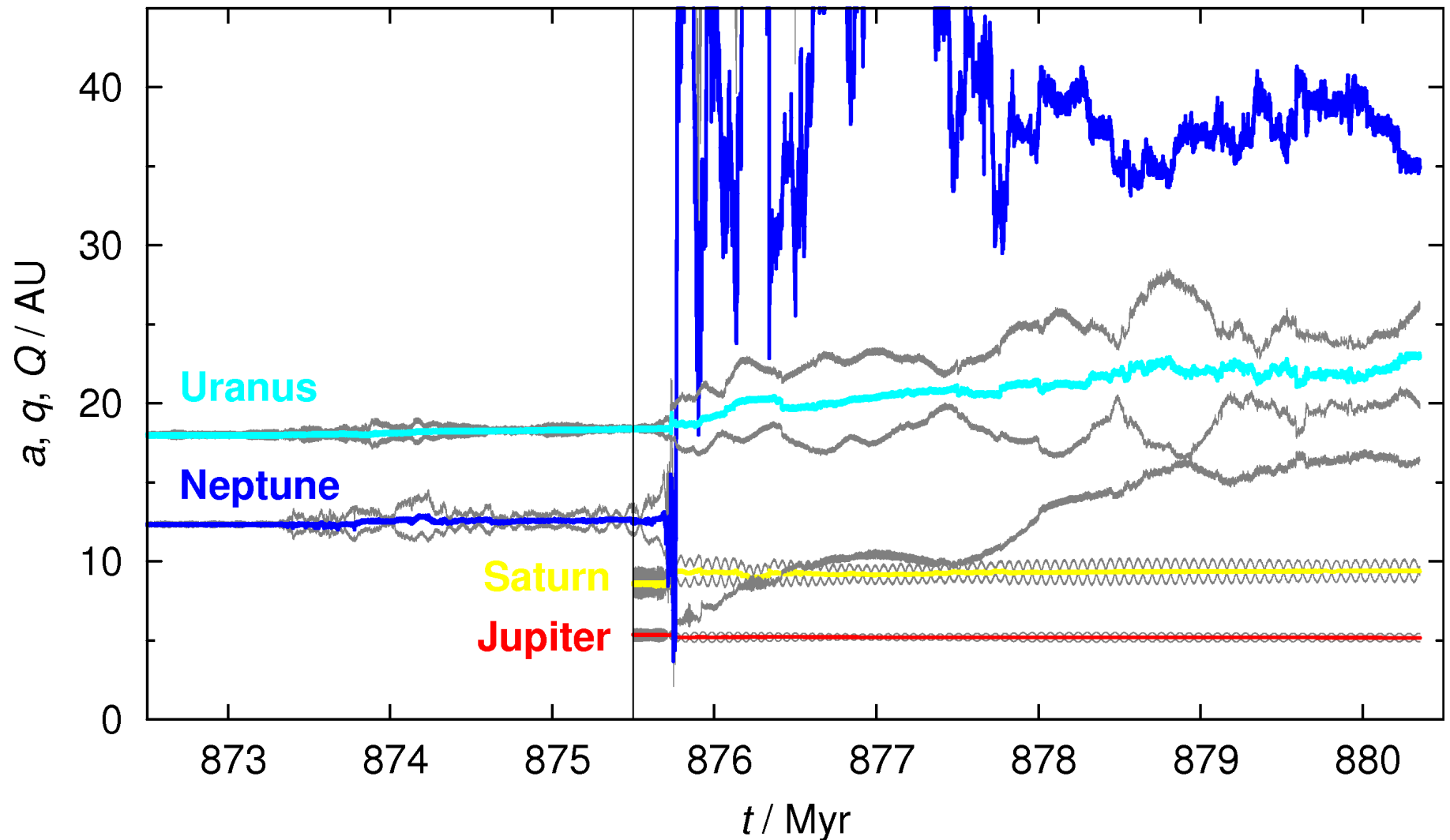
Jupiter dovnitř a Saturn, Uran, Neptun ven!

- **chaotická:** nestabilita systému, blízká přiblížení planet



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

7. Blízka přiblížení planet

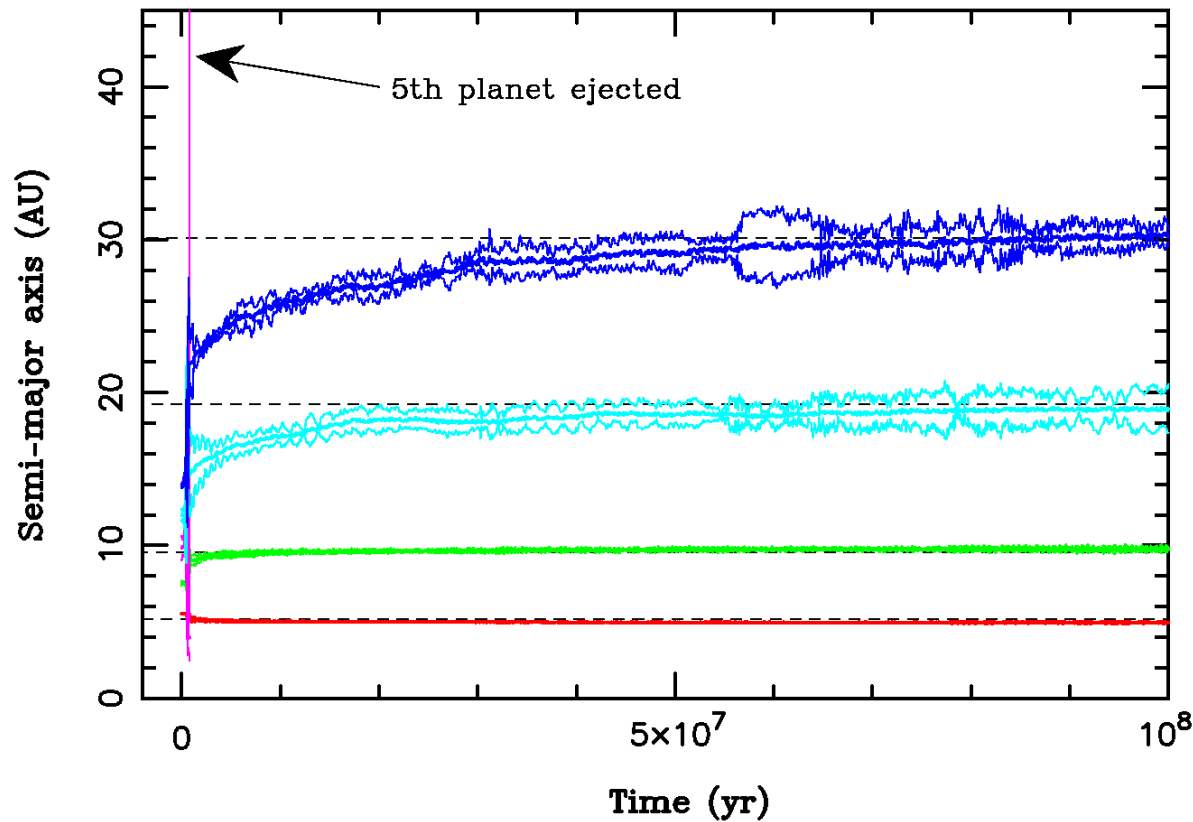


iregulární měsíce, planetky hlavního pásu s $i > 17^\circ$,
frekvence a amplitudy drah terestrických planet, ...

Minton & Malhotra (2009)
Morbidelli et al. (2010)

7. Vymrštění „9.“ planety

(ne Pluto)



stabilizace
zbývajících
planet

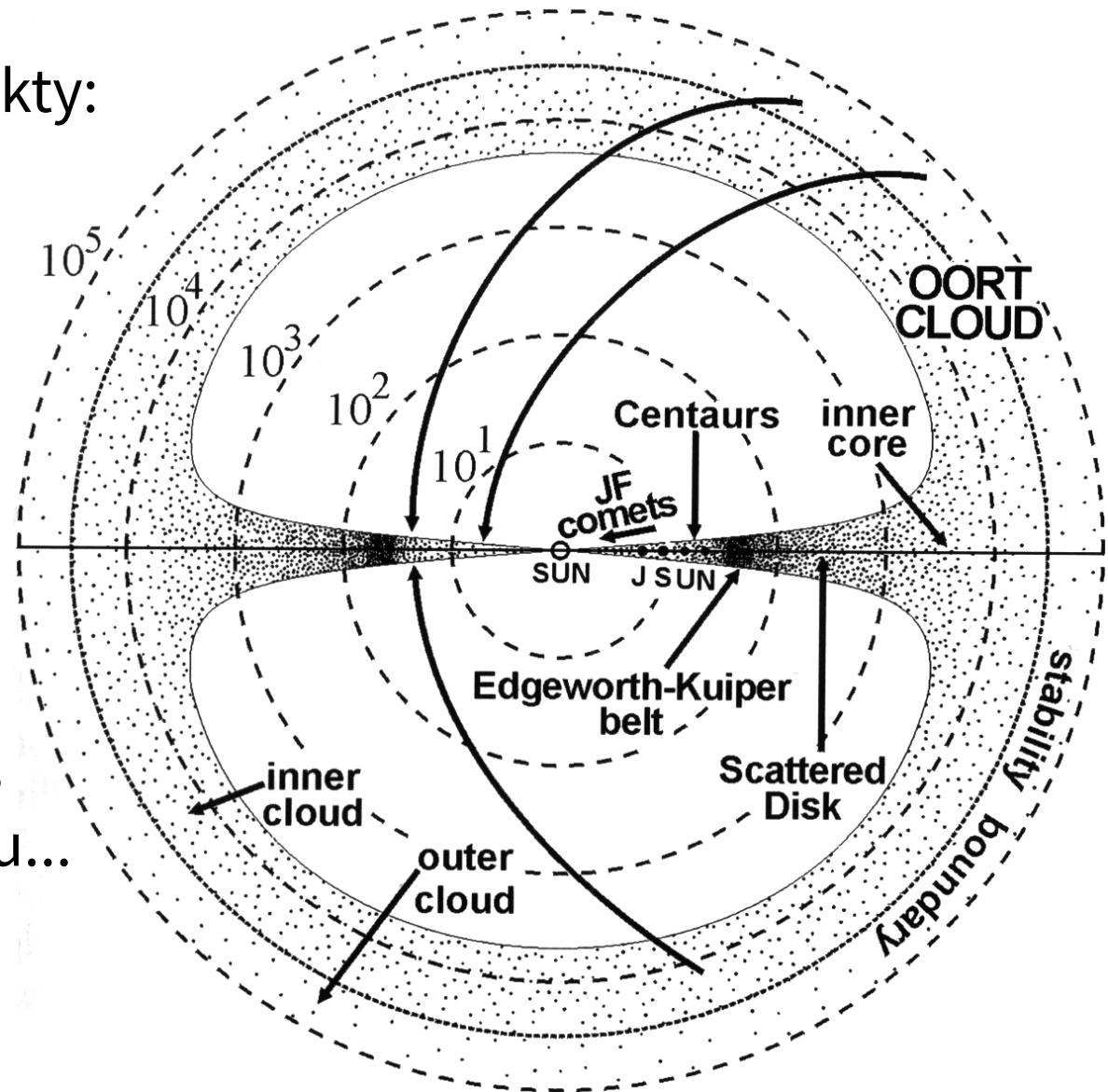
Figure 2. Orbit histories of giant planets in a simulation with five initial planets. The five planets were started in the (3:2,3:2,4:3,5:4) resonances, $M_{\text{disk}} = 50 M_{\text{Earth}}$, and $r_{\text{in}} = 15$ AU. After a series of encounters with Jupiter the inner ice giant was ejected from 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)

Nesvorný & Morbidelli (2012)

8. přiblížení * a galaktické slapy

- trans-neptunické objekty:
klasický Kuiperův pás,
Plutina (3:2), 2:1,
rozptýlený disk,
oddělený disk,
Oortův oblak
- transport z TNO:
Kentaury, komety
Jupiterovy rodiny (JFC),
komety Halleyova typu...

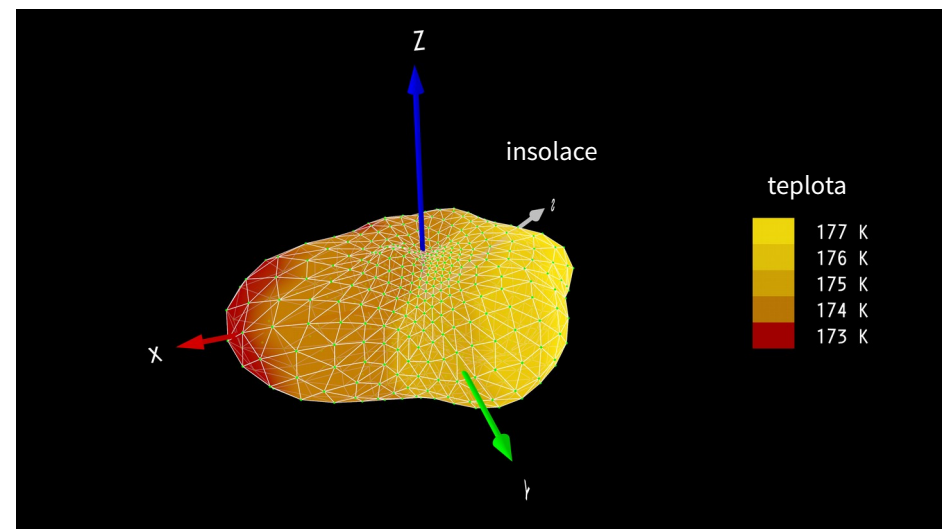
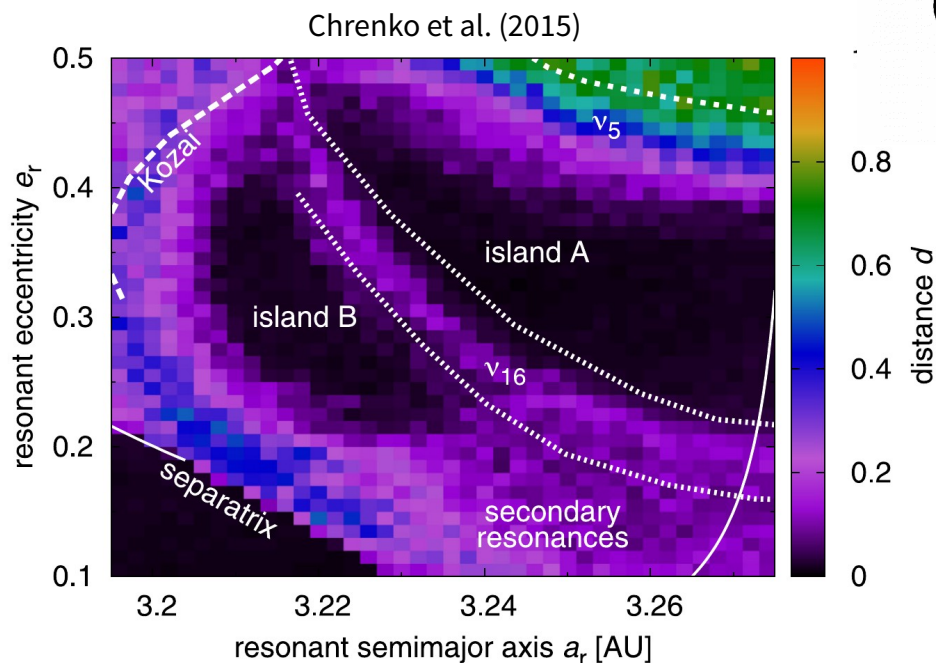
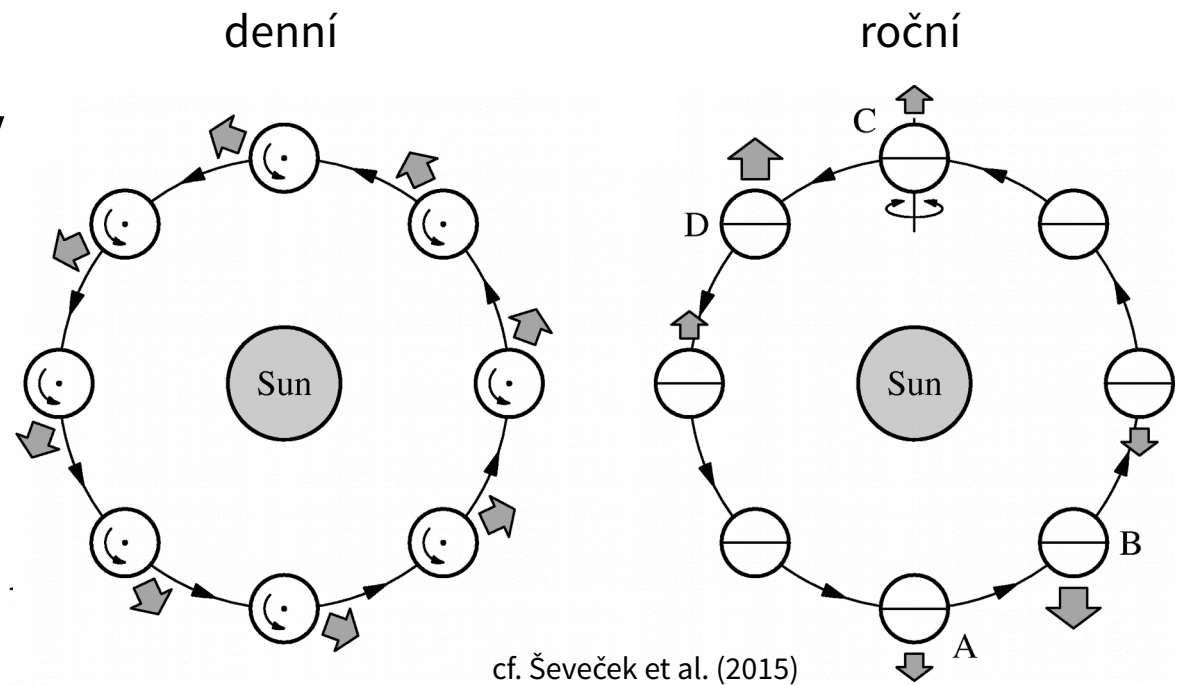


Fernández (2005)

Nesvorný et al. (2013)

9. Dlouhodobý vývoj planetek

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



Proxima Centauri b

← nejbližší
exoplaneta

- spektrograf HARPS @ ESO 3,6 m, $\sigma_{RV} = 0,3$ m/s, UVES @ VLT
- M5.5V, $M = 0,120 M_{\odot}$, $R = 0,141 R_{\odot}$, $L = 0,00155 L_{\odot}$, $T_{\text{eff}} = 3050$ K
- $P = 11,186$ dne, $RV = 1,38$ m/s, $e < 0,35$; λ , ω

Anglada-Escudé et al. (2016)

