



# ÓRIÁSBOLYGÓ-MAGOK ŐRANGYLAI PROTOPANETÁRIS ANTICIKLONOK

Regály Zsolt<sup>1,2</sup>

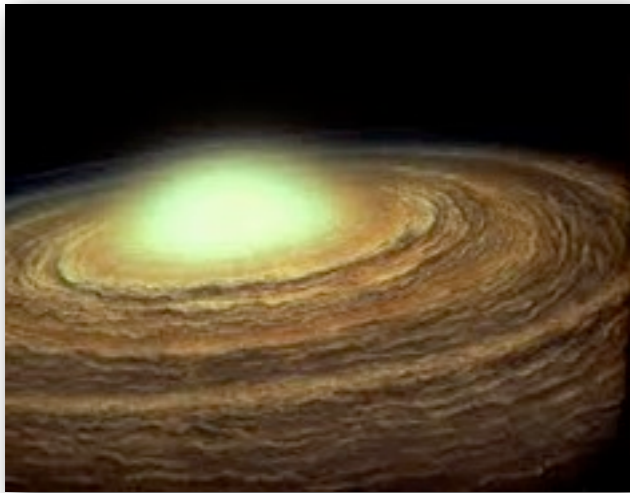
<sup>1</sup> MTA Konkoly Thege Miklós Csillagászati Kutatóintézet

<sup>2</sup> ELTE Gothard Obszervatórium

# 1. Bolygókeletkezés

- Bolygómag-akkréciós modell

1. agregáció: porszemcseméret növekedése ( $\mu\text{m} \rightarrow \text{cm}$ ), **mm-barrier**, (Zsom et al., 2010)
2. koaguláció: kialakulnak a planetezimálok ( $\text{m} \rightarrow \text{km}$ ), **m-barrier** (Brauer et al., 2008)
3. bolygómag-keletkezés: planetezimálok összeolvadnak  $\rightarrow$  földszerű bolygómagok
4. izoláció: elfogynak a planetezimálok ( $\sim 10M_{\oplus}$ ), **lassú mag-növekedés** (Pollack et al., 1996)
5. óriásbolygók: kritikus tömeg felett ( $\sim 15M_{\oplus}$ ) a gázakkréció megszalad
6. gázóriások: résnyitás a korongban ( $>M_{\text{sat}}$ )
7. bolygó-korong kölcsönhatás  $\rightarrow$  migráció

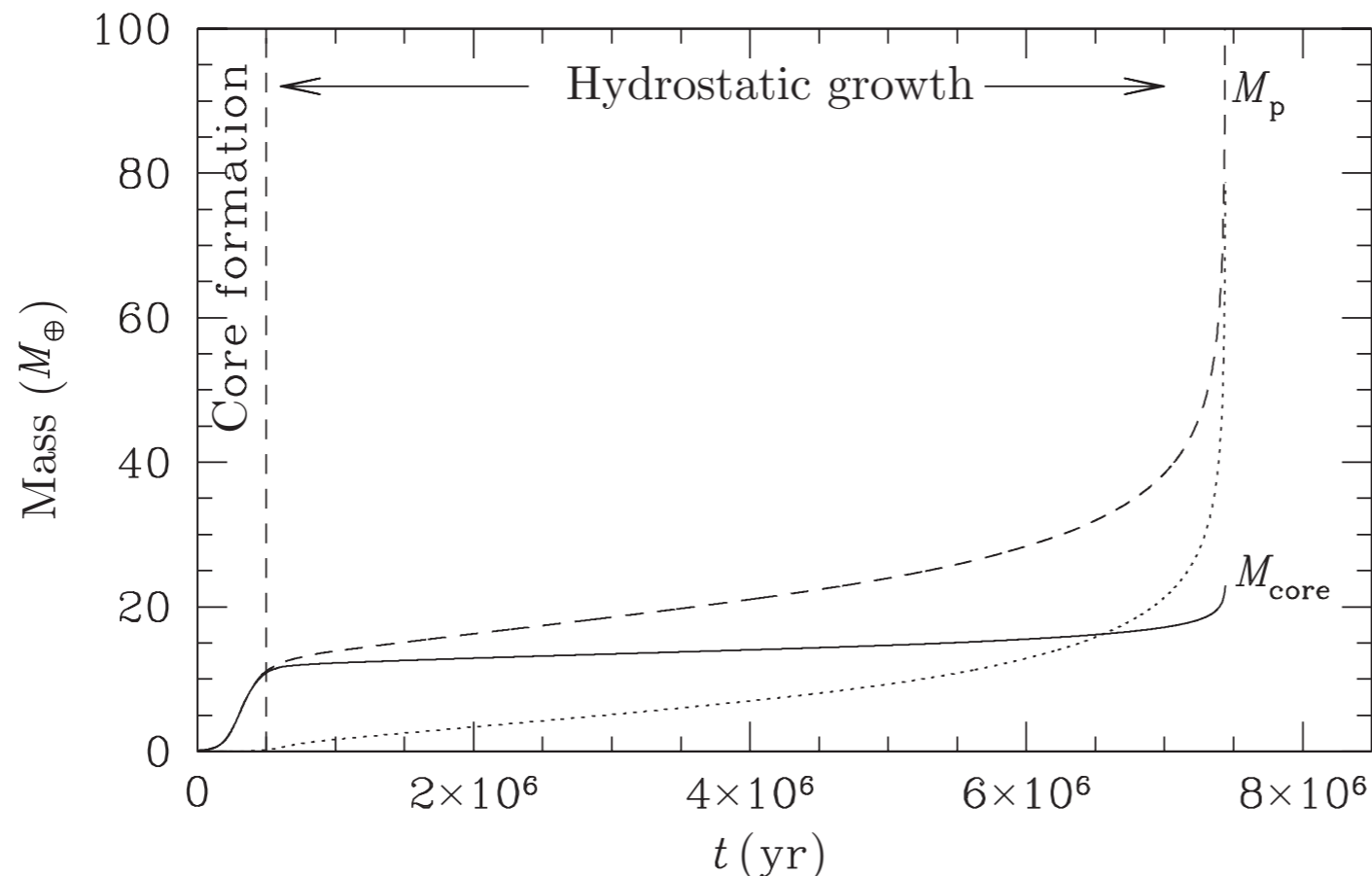


# 1. Bolygókeletkezés

## • Bolygómag-akkréciós modell

1. agregáció: porszemcseméret növekedése ( $\mu\text{m} \rightarrow \text{cm}$ ), **mm-barrier**, (Zsom et al., 2010)
2. koaguláció: kialakulnak a planetézimálok ( $\text{m} \rightarrow \text{km}$ ), **m-barrier** (Brauer et al., 2008)
3. bolygómag-keletkezés: planetézimálok összeolvadnak  $\rightarrow$  földszerű bolygómagok
4. izoláció: elfogynak a planetézimálok ( $\sim 10M_{\oplus}$ ), **lassú mag-növekedés** (Pollack et al., 1996)
5. óriásbolygók: kritikus tömeg felett ( $\sim 15M_{\oplus}$ ) a gázakkréció megszalad
6. gázóriások: résnyitás a korongban ( $>M_{\text{sat}}$ )
7. bolygó-korong kölcsönhatás  $\rightarrow$  migráció

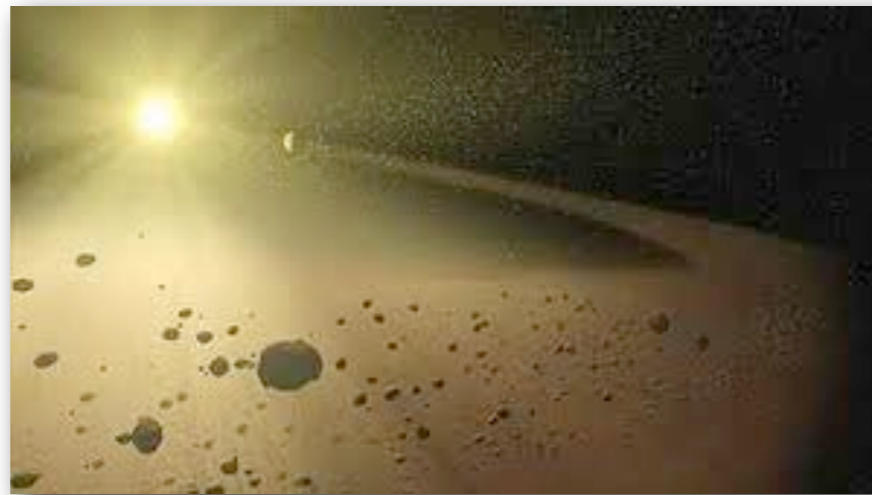
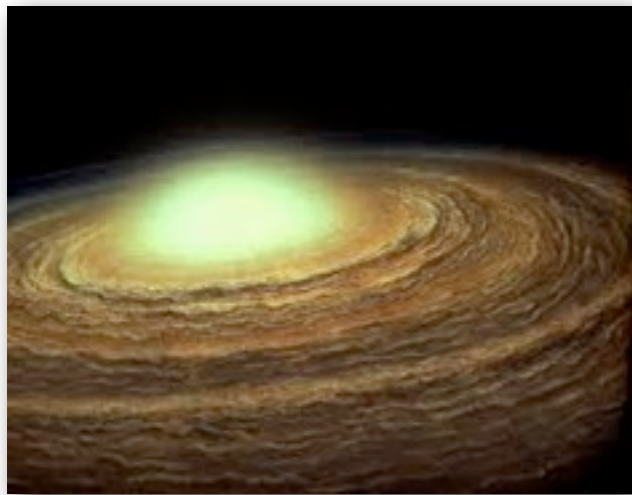
Óriásbolygó növekedése (Pollack et al., 1996)




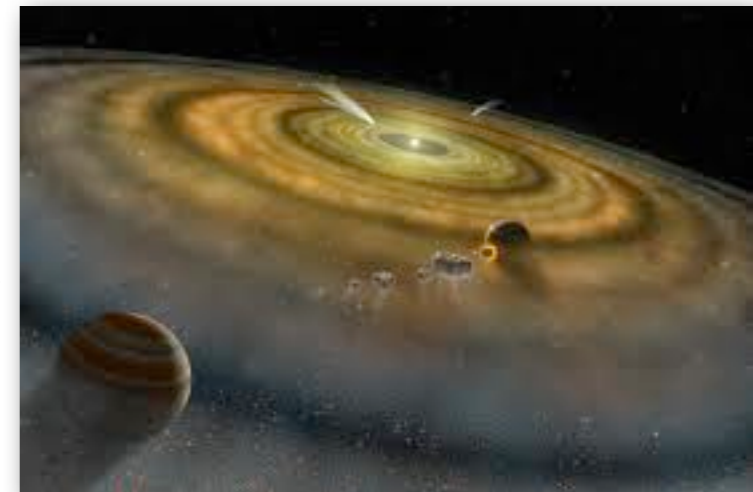
# 1. BOLYGÓKELETKEZÉS


- Bolygómag-akkréciós modell

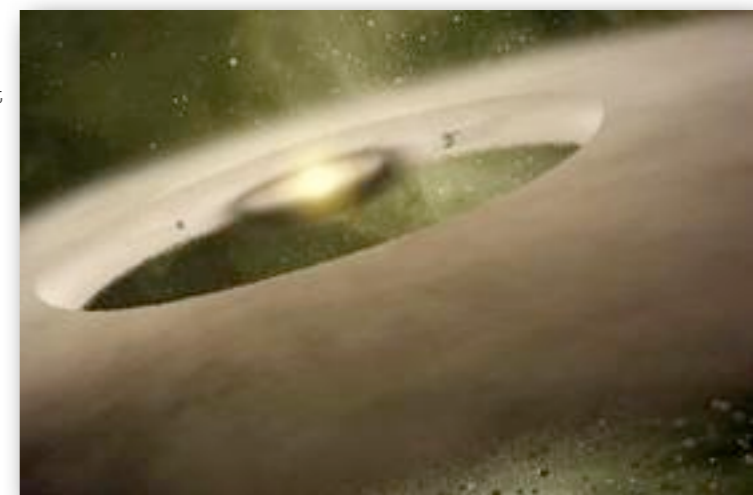
1. agregáció: porszemcseméret növekedése ( $\mu\text{m} \rightarrow \text{cm}$ ), **mm-barrier**, (Zsom et al., 2010)
2. koaguláció: kialakulnak a planetezimálok (m  $\rightarrow$  km), **m-barrier** (Brauer et al., 2008)
3. bolygómag-keletkezés: planetezimálok összeolvadnak  $\rightarrow$  földszerű bolygómagok
4. izoláció: elfogynak a planetezimálok ( $\sim 10M_{\oplus}$ ), **lassú mag-növekedés** (Pollack et al., 1996)
5. óriásbolygók: kritikus tömeg felett ( $\sim 15M_{\oplus}$ ) a gázakkréció megszalad
6. **gázóriások: résnyitás a korongban ( $>M_{\text{Sat}}$ )**
7. bolygó-korong kölcsönhatás  $\rightarrow$  migráció



$$M_p \leq M_{\text{Sat}}$$




$$M_p > M_{\text{Sat}}$$




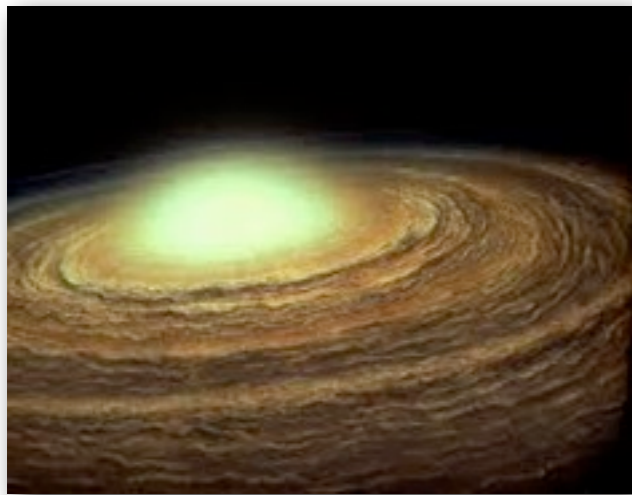
# 1. BOLYGÓKELETKEZÉS

- Bolygómag-akkréciós modell

1. agregáció: porszemcseméret növekedése ( $\mu\text{m} \rightarrow \text{cm}$ ), **mm-barrier**, (Zsom et al., 2010)
2. koaguláció: kialakulnak a planetézimálok ( $\text{m} \rightarrow \text{km}$ ), **m-barrier** (Brauer et al., 2008)
3. bolygómag-keletkezés: planetézimálok összeolvadnak  $\rightarrow$  földszerű bolygómagok
4. izoláció: elfogynak a planetézimálok ( $\sim 10M_{\oplus}$ ), **lassú mag-növekedés** (Pollack et al., 1996)
5. óriásbolygók: kritikus tömeg felett ( $\sim 15M_{\oplus}$ ) a gázakkréció megszalad
6. gázóriások: résnyitás a korongban ( $>M_{\text{sat}}$ )
7. **bolygó-korong kölcsönhatás  $\rightarrow$  migráció**

- Bolygók migrációja

1. migrációs időskála közelítőleg 1 millió év, elnyeli a csillag mielőtt a korng eltűnne!



## 2. NUMERIKUS MODELLEZÉS

### • Bolygó és protoplanetáris korong kölcsönhatása

1. tömeg 99%-a gáz, a maradék 1% por → hidrodinamikailig vizsgálható

2. kontinuitási egyenlet:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{u}) = \mathbf{0}$$

3. Navier–Stokes egyenlet:

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla(\mathbf{u}) = \frac{1}{\rho} \mathbf{P} - \nabla \Phi + \nu \left[ \nabla^2 \mathbf{u} + \frac{1}{3} \nabla(\nabla \cdot \mathbf{u}) \right]$$

4. protoplanetáris korong nagyon vékony (flat disk approx.):  $H(R) = hR$ ,  $h \simeq 0.05$

5. 2D közelítés:  $\rho(R, \phi, z) \rightarrow \Sigma(R, \phi)$

6. gravitációs potenciál (központi csillag + bolygó):

$$\Phi(R) = -\frac{GM_*}{R} - \frac{GM_p}{\sqrt{(x_{i,j} - x_p)^2 + (y_{i,j} - y_p)^2 + (\epsilon H(a))^2}}$$

7. lokálisan izoterm korong:

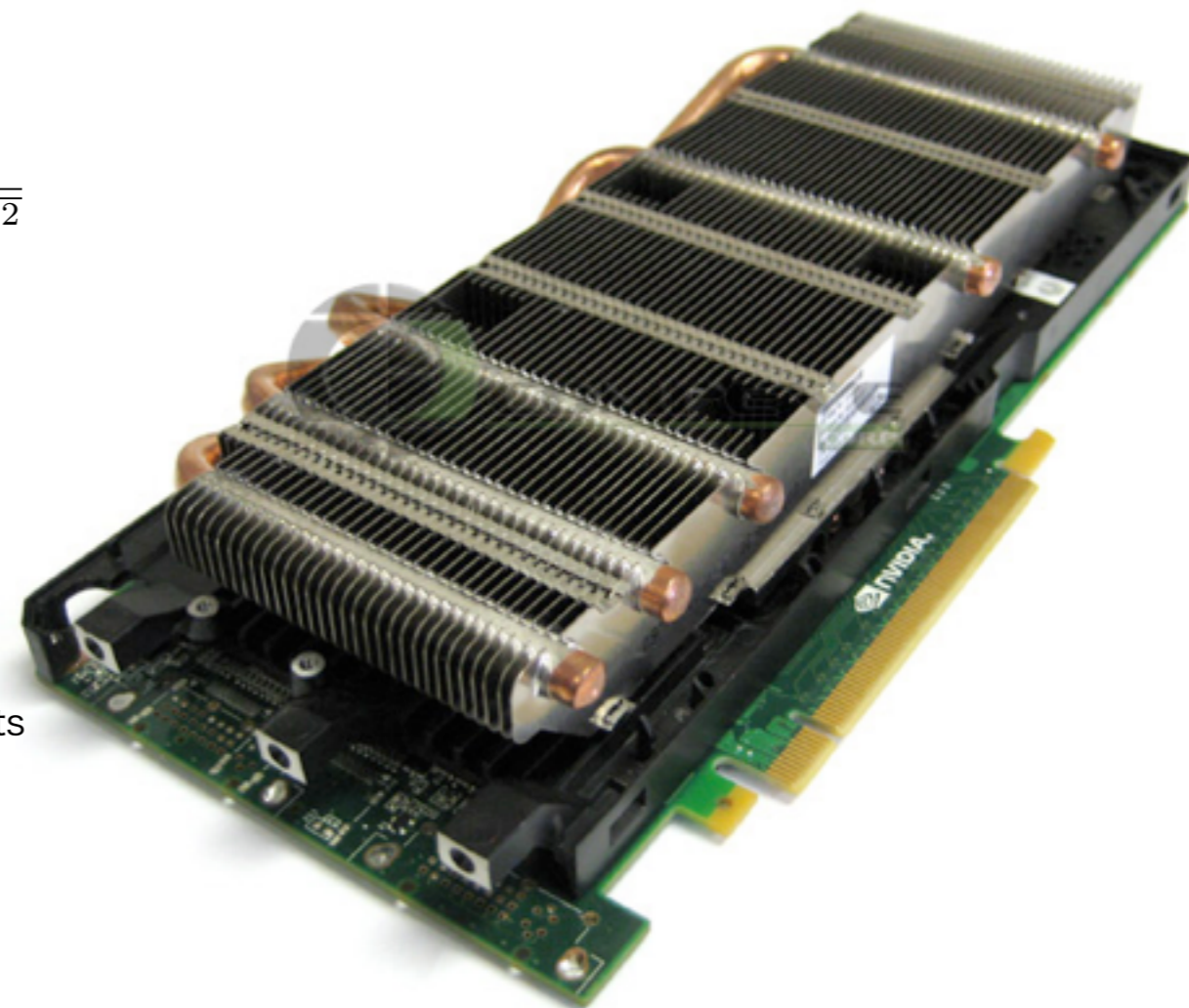
$$P(R, \phi) = c_s(R)^2 \Sigma(R, \phi)$$

8. Shakura & Sunyaev  $\alpha$ -viszkozitás:

$$\nu(R) = \alpha \frac{c_s(R)^2}{\Omega(R)}, \quad c_s = \Omega(R)H(R)$$

9. numerikus megoldás: Fast Advection in Rotating Gaseous Objects for GPU, GFARGO (Masset 2001)

10. GPU: NVIDIA Tesla M2070



### 3. MIGRÁCIÓ A PROTOPLANETÁRIS KORONGBAN

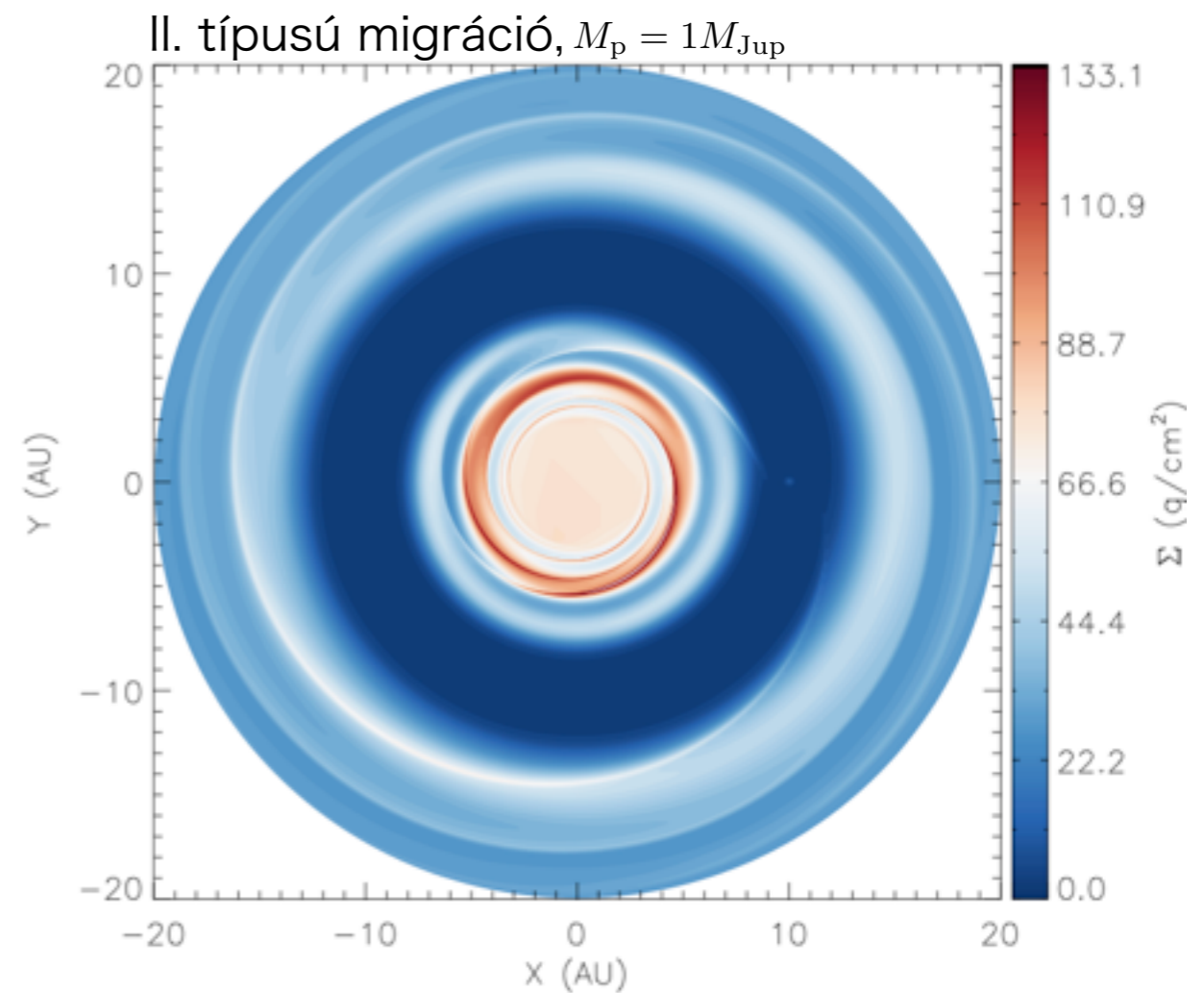
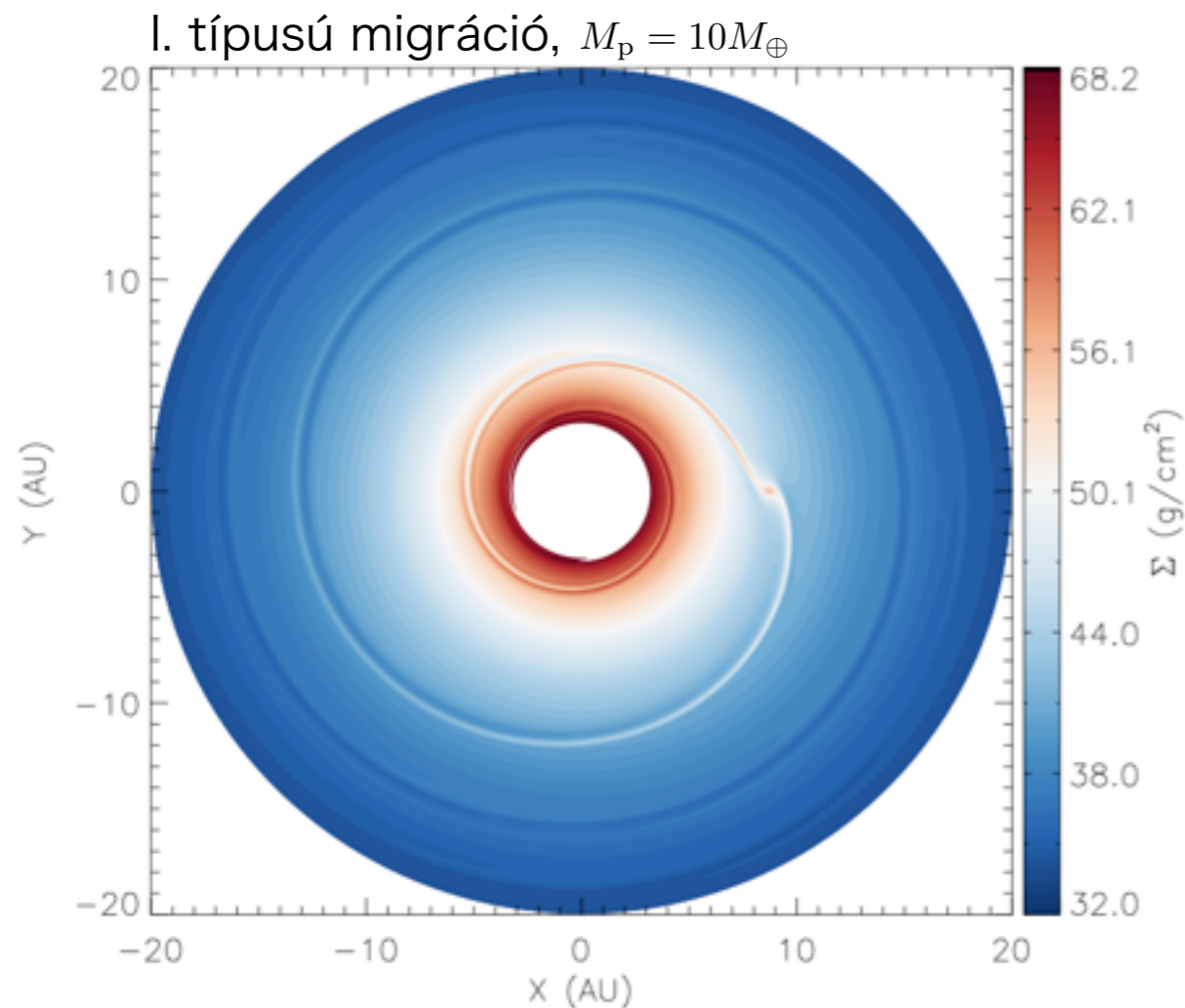
- Migráció protoplanetáris korongban

- I. típusú migráció,  $M_p \leq M_{\text{Sat}}$

- 1. gyenge perturbáció, spirál alakú hullámok gerjesztése a korongban
    - 2. függ a bolygótömegtől ( $\sim q$ )
    - 3. nem függ a viszkozitástól

- II. típusú migráció,  $M_p > M_{\text{Sat}}$

- 1. résnyitás a korongban
    - 2. nem függ a bolygótömegtől
    - 3. függ a viszkozitástól ( $\sim \nu$ )



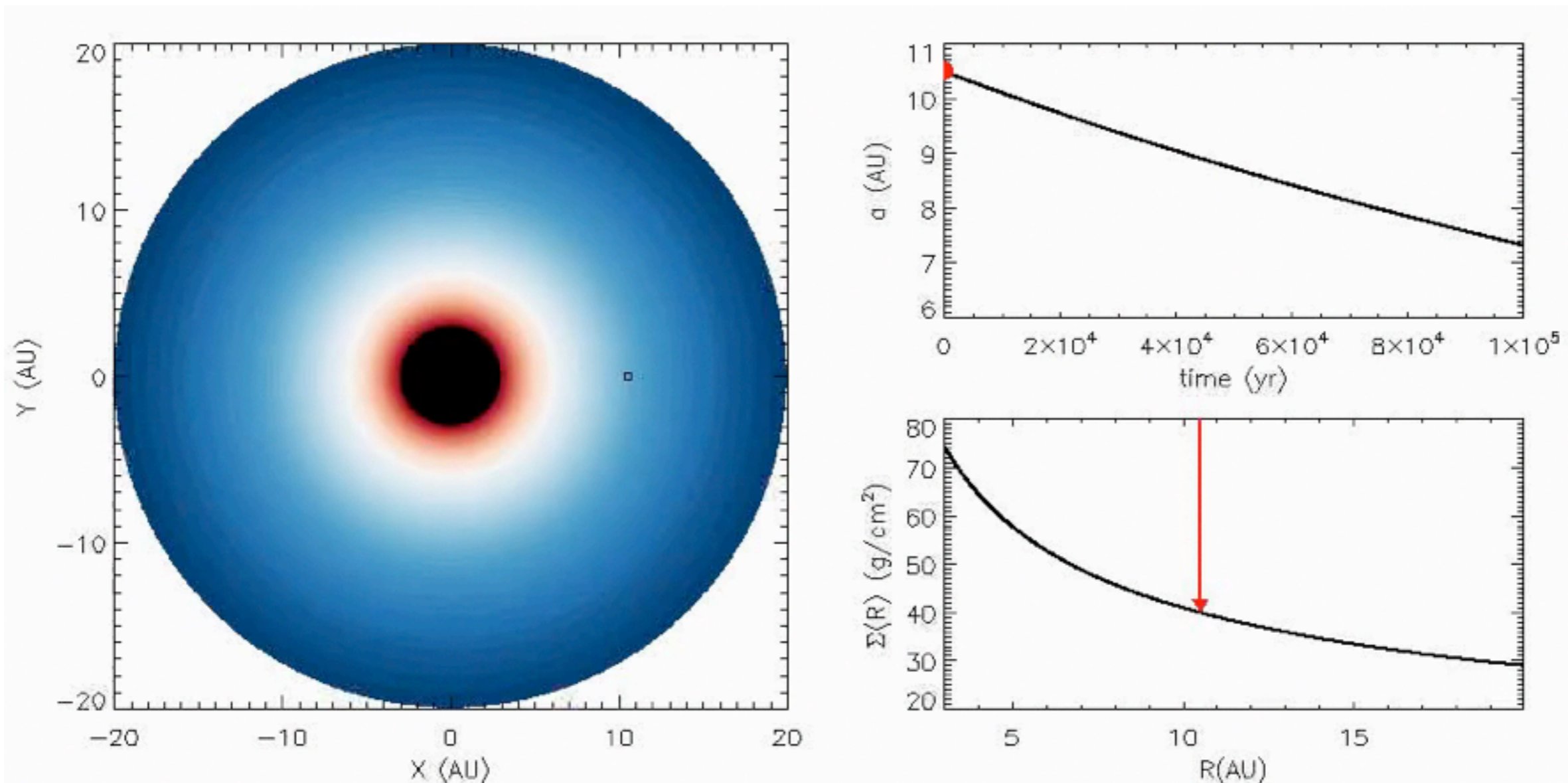
### 3. MIGRÁCIÓ A PROTOPLANETÁRIS KORONGBAN

- Migráció protoplanetáris korongban

I. típusú migráció (Paardekooper et al. 2010)

$$\frac{da}{dt} = \frac{2\Gamma}{qa\Omega(a)}, \quad \frac{\Gamma}{\Gamma_0} = -(2.5 - 0.5\beta_p - 0.1\sigma_p) \left(\frac{0.4}{\epsilon}\right)^{0.71} - 1.4\beta_p \left(\frac{0.4}{\epsilon}\right)^{1.26} + 1.1 \left(\frac{3}{2} - \sigma_p\right) \frac{0.4}{\epsilon}$$

$$\Gamma_0 = \left(\frac{q}{h}\right)^2 \Sigma(a)a^4\Omega(a)^2, \quad \sigma_p = -\frac{R}{\Sigma(R)} \frac{d\Sigma(R)}{dR} \Big|_{R=a}, \quad \beta_p = -\frac{R}{T(R)} \frac{dT(R)}{dR} \Big|_{R=a}$$



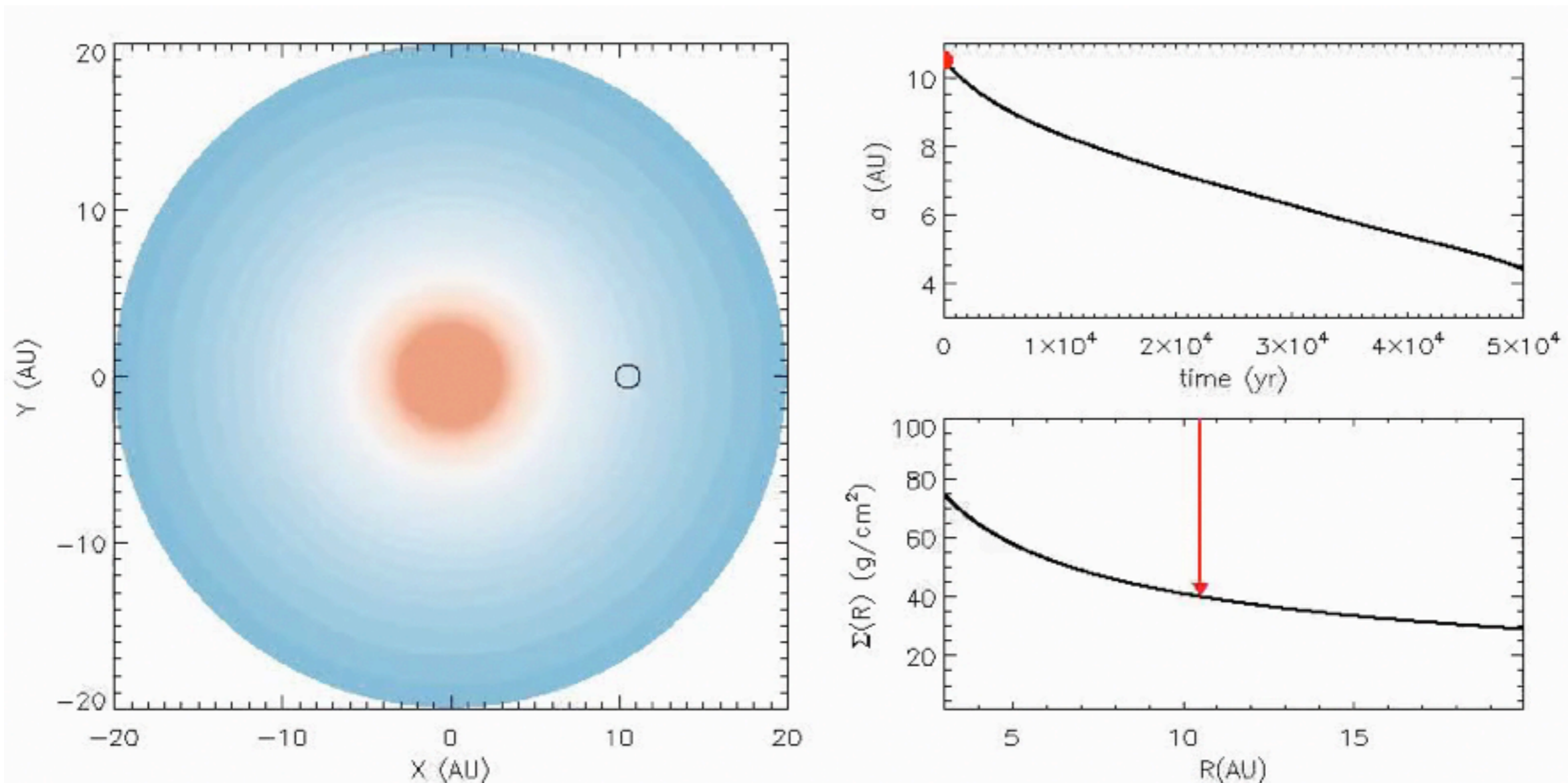


### 3. MIGRÁCIÓ A PROTOPLANETÁRIS KORONGBAN

- Migráció protoplanetáris korongban

II. típusú migráció

$$\frac{da}{dt} = -\frac{3\nu(R)}{2a}, \quad \nu(R) = \alpha \frac{c_s^2(R)}{\Omega(R)}, \quad c_s(R) = \Omega(R)H(R)$$



## 4. DEAD ZONE A KORONGBAN → ÖRVÉNYKÉPZŐDÉS

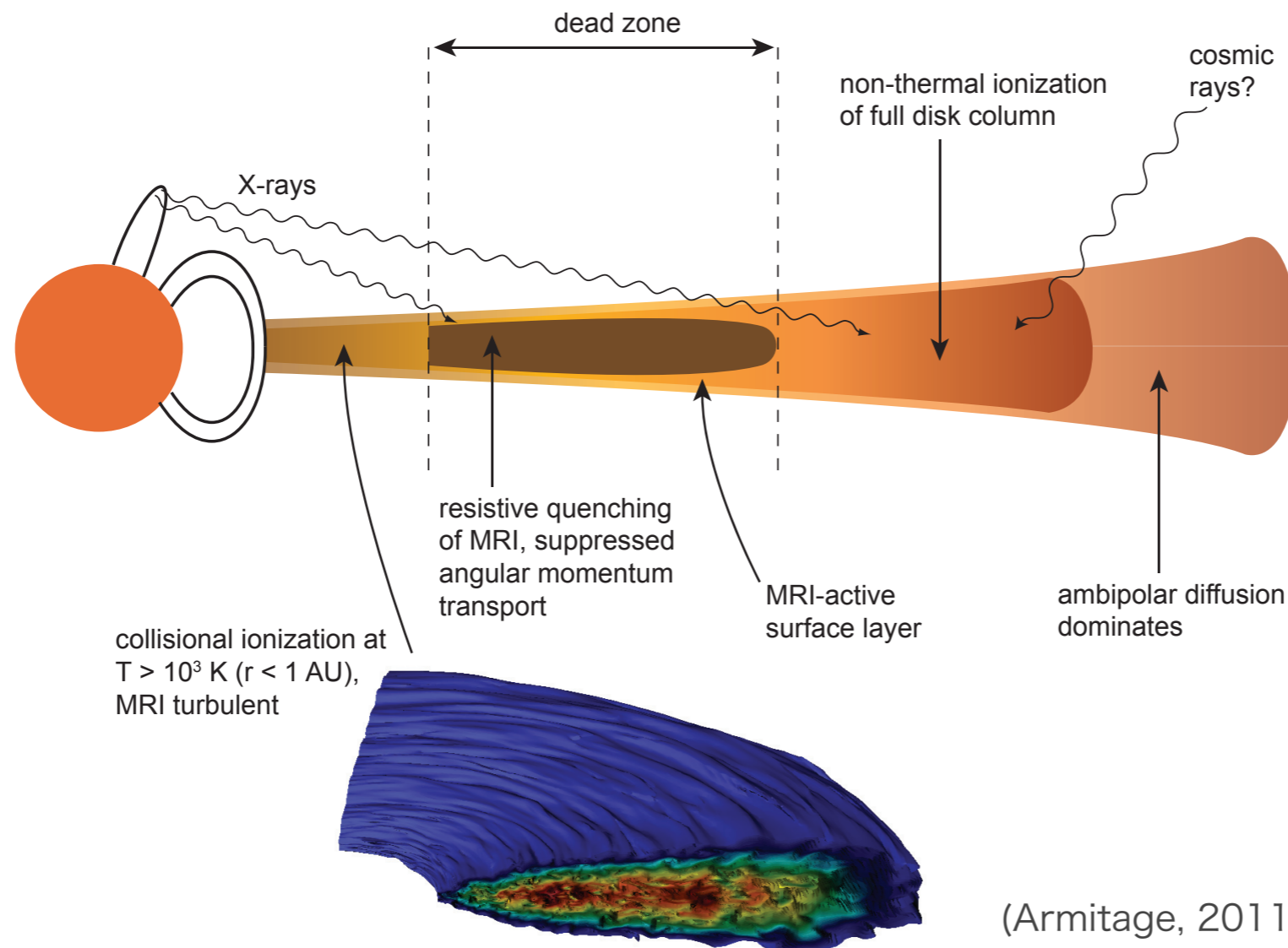
- Nem akkretáló zóna, “dead zone”

Akkreciót a viszkozitás okozza

Mágneses tér + turbulencia (MRI) →  $\alpha$ -viszkozitás (Shakura & Sunyaev, 1973)

Ahol nincs ionizáció, ott csökken a viszkozitás

Ahol kicsi a viszkozitás → akkreció dead zone



## 4. DEAD ZONE A KORONGBAN → ÖRVÉNYKÉPZŐDÉS

- Nem akkretáló zóna, “dead zone”

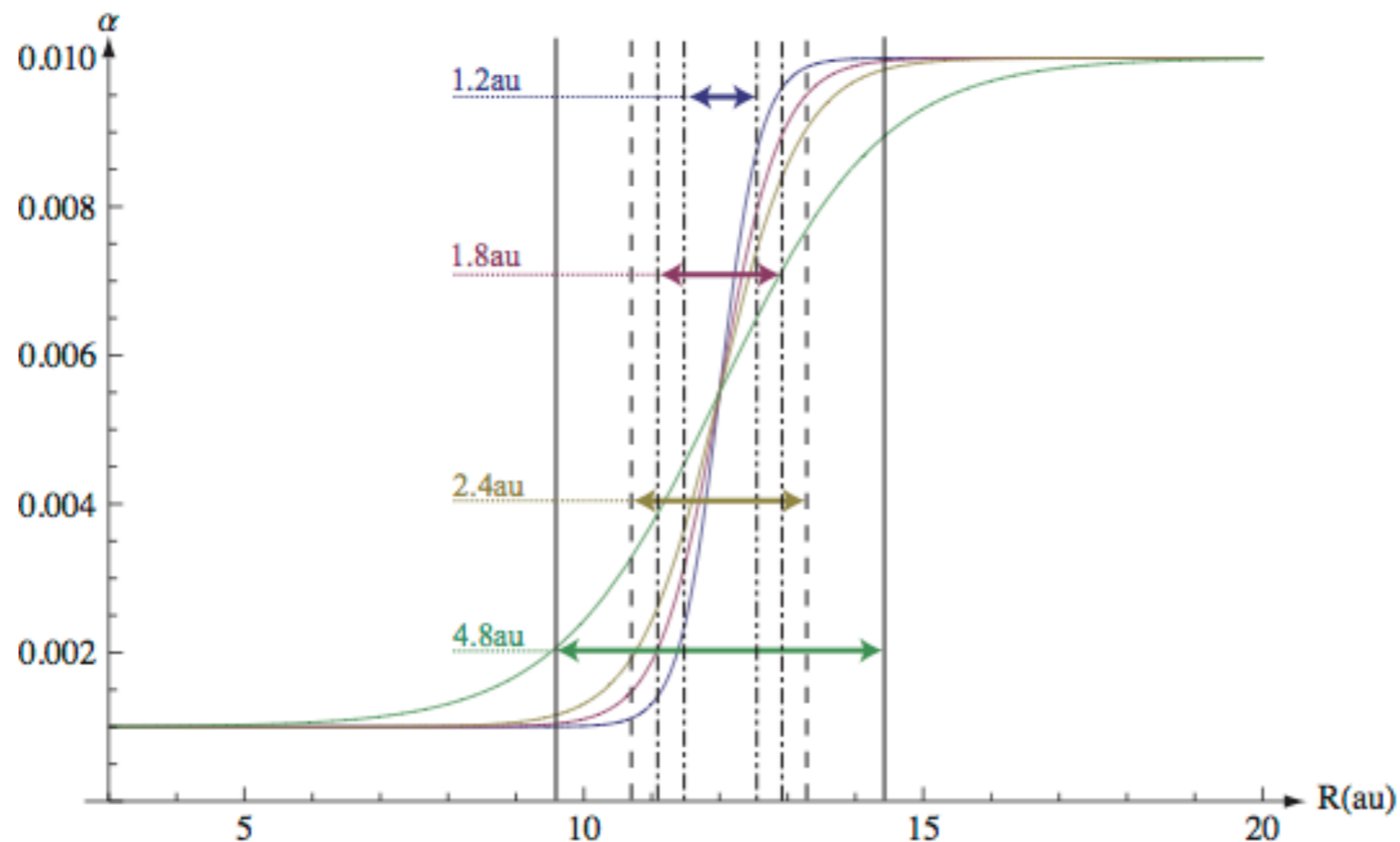
Akkreciót a viszkozitás okozza

Mágneses tér + turbulencia (MRI) →  $\alpha$ -viszkozitás (Shakura & Sunyaev, 1973)

Ahol nincs ionizáció, ott csökken a viszkozitás

Ahol kicsi a viszkozitás → akkréciós dead zone

Viszkozitásredukció: “éles” átment ( $\Delta R_{dze} < 2H_{dze}$ ) vagy “tompá” ( $\Delta R_{dze} \geq 2H_{dze}$ )



## 4. DEAD ZONE A KORONGBAN → ÖRVÉNYKÉPZŐDÉS

- Nagyskálájú örvények, “anticiklonok” fejlődése

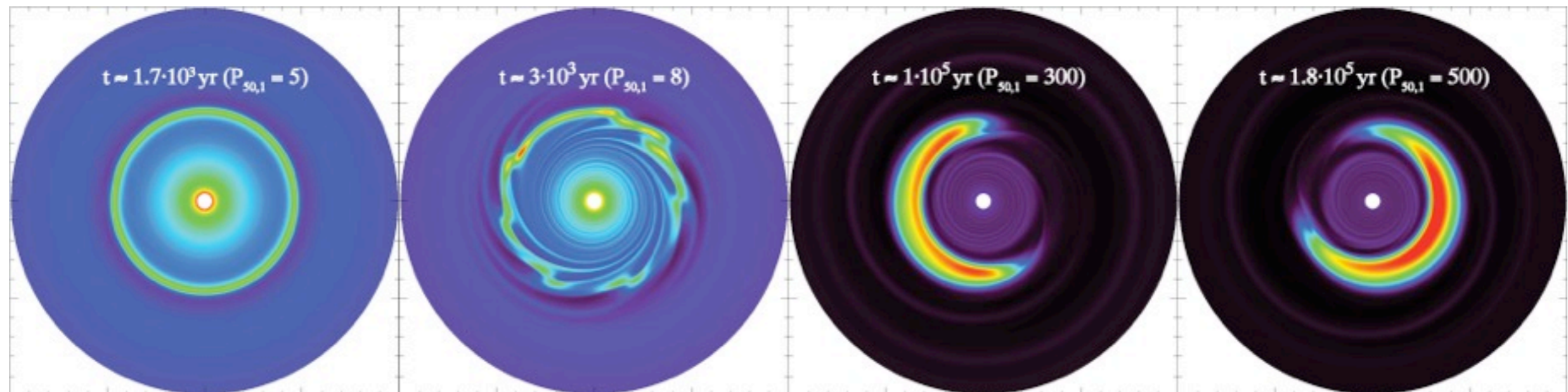
Rossby-instabilitás (Li et al. 2000)

1. Konstans  $\rho$  és  $p$  felületek nem párhuzamosak

$$\frac{1}{\rho^2} \nabla p \times \nabla \rho \neq 0$$

2. dead zone határán felgyülemlik az anyag  $\rightarrow \nabla p \neq 0$
3.  $\alpha$ -viszkozitás + perturbált  $\alpha \rightarrow$  Rossby-örvény (hurrikánok, Jupiter vörös foltja)
4. nagyskálás ( $m=1$  módus) anticiklonikus örvényképződés, ha  $\Delta R_{dze} < 2H_{dze}$
5. aszimmetrikus “lópatkó” alakú korongok

Anticiklonok fejlődése a korongban (Regály et al., 2012)



## 4. DEAD ZONE A KORONGBAN → ÖRVÉNYKÉPZŐDÉS

- Nagyskálájú örvények, “anticiklonok” fejlődése

Rossby-instabilitás (Li et al. 2000)

1. Konstans  $\rho$  és  $p$  felületek nem párhuzamosak

$$\frac{1}{\rho^2} \nabla p \times \nabla \rho \neq 0$$

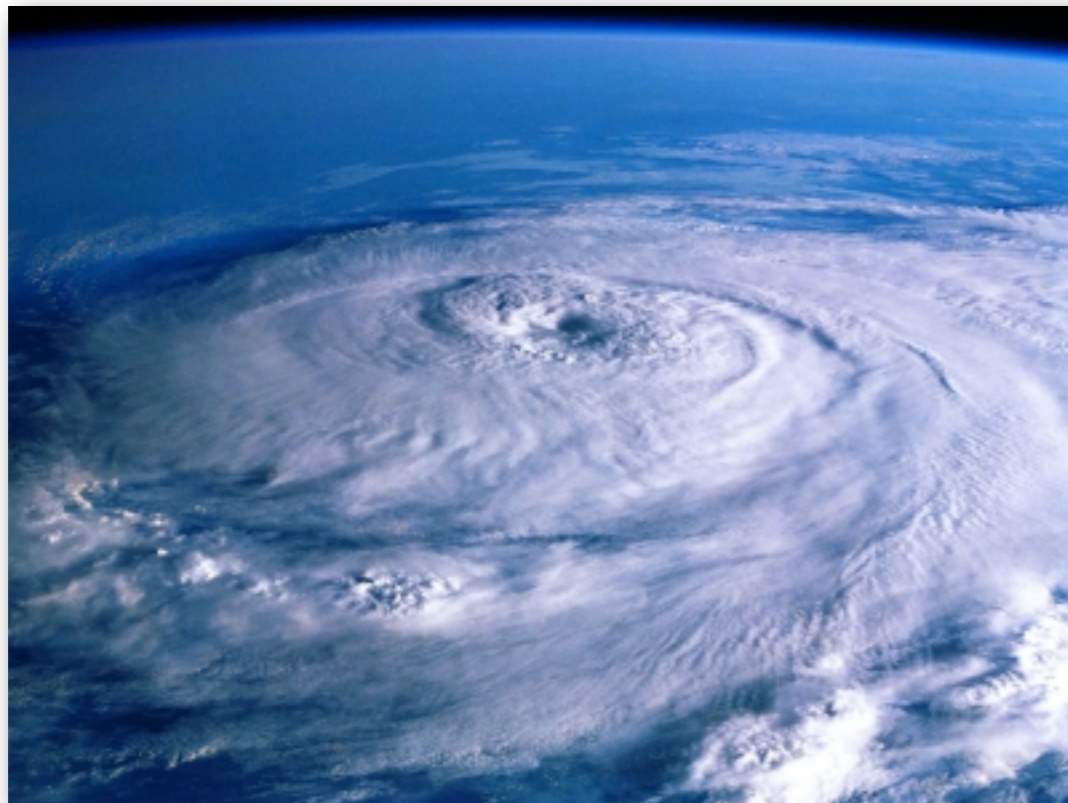
2. dead zone határán felgyűlemik az anyag  $\rightarrow \nabla p \neq 0$

3.  $\alpha$ -viszkozitás + perturbált  $\alpha \rightarrow$  Rossby-örvény (hurrikánok, Jupiter vörös foltja)

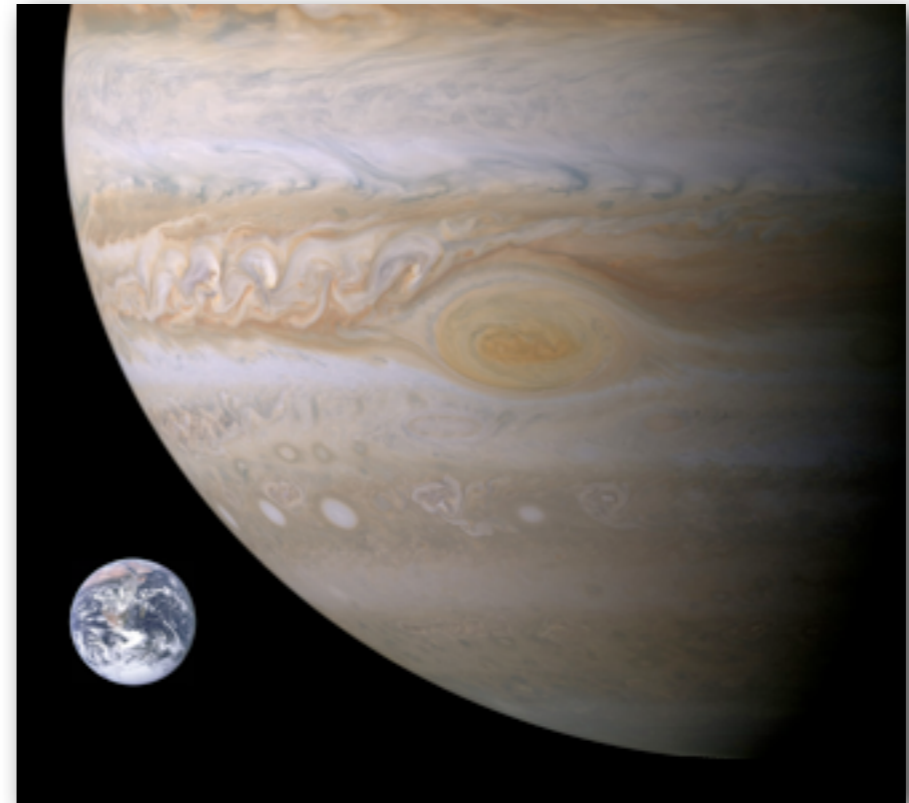
4. nagyskálás ( $m=1$  módus) anticiklonikus örvényképződés, ha  $\Delta R_{dze} < 2H_{dze}$

5. aszimmetrikus “lópatkó” alakú korongok

Hurrikán a Földön



Vörös “folt” a Jupiteren (>300 éves)



# 4. DEAD ZONE A KORONGBAN → ÖRVÉNYKÉPZŐDÉS

- Nagyskálájú örvények, “anticiklonok” fejlődése

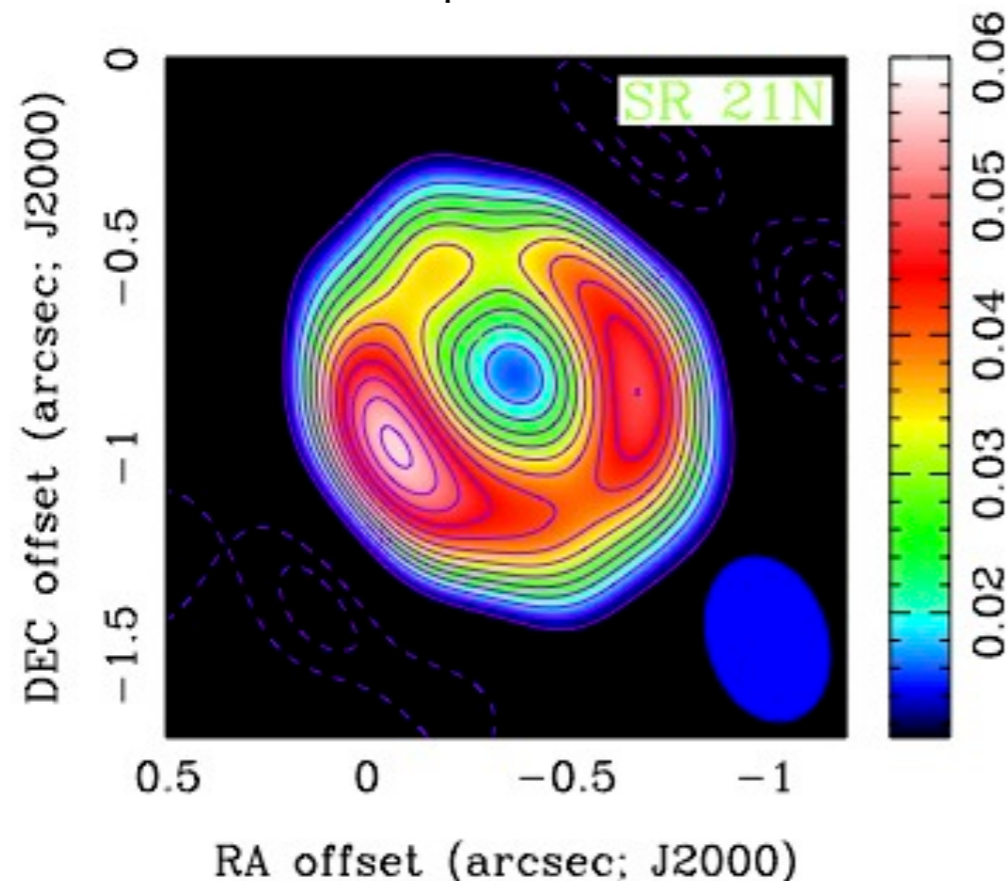
Rossby-instabilitás (Li et al. 2000)

1. Konstans  $\rho$  és  $p$  felületek nem párhuzamosak

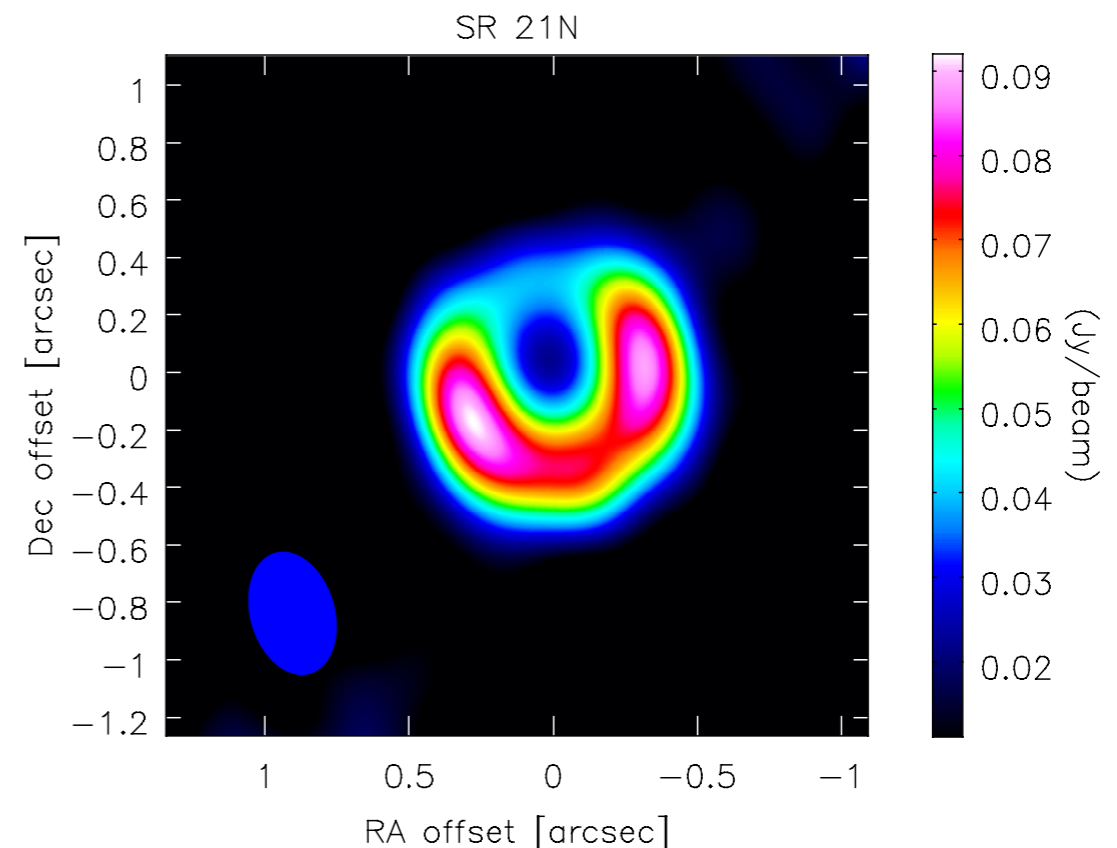
$$\frac{1}{\rho^2} \nabla p \times \nabla \rho \neq 0$$

2. dead zone határán felgyűlemik az anyag  $\rightarrow \nabla p \neq 0$
3.  $\alpha$ -viszkozitás + perturbált  $\alpha \rightarrow$  Rossby-örvény (hurrikánok, Jupiter vörös foltja)
4. nagyskálás (m=1 módus) anticiklonikus örvényképződés, ha  $\Delta R_{dze} < 2H_{dze}$
5. aszimmetrikus “lópatkó” alakú korongok

SR21 SMA-kép (Brown et al., 2009)



Szimulált kép (Regály et al., 2012)



## 4. DEAD ZONE A KORONGBAN → ÖRVÉNYKÉPZŐDÉS

- Nagyskálájú örvények, “anticiklonok” fejlődése

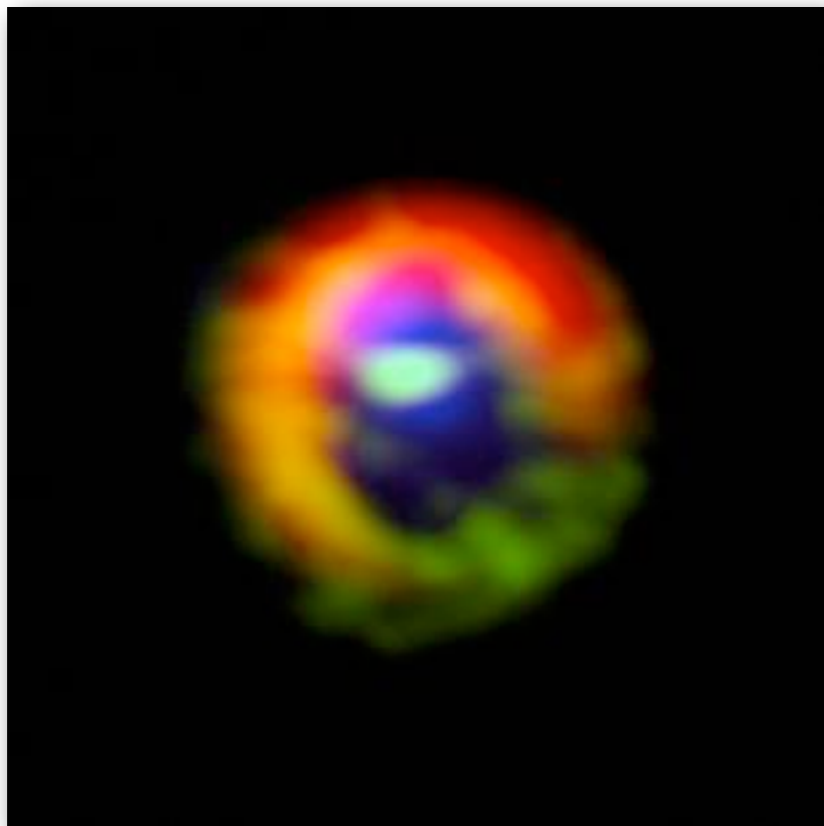
Rossby-instabilitás (Li et al. 2000)

1. Konstans  $\rho$  és  $p$  felületek nem párhuzamosak

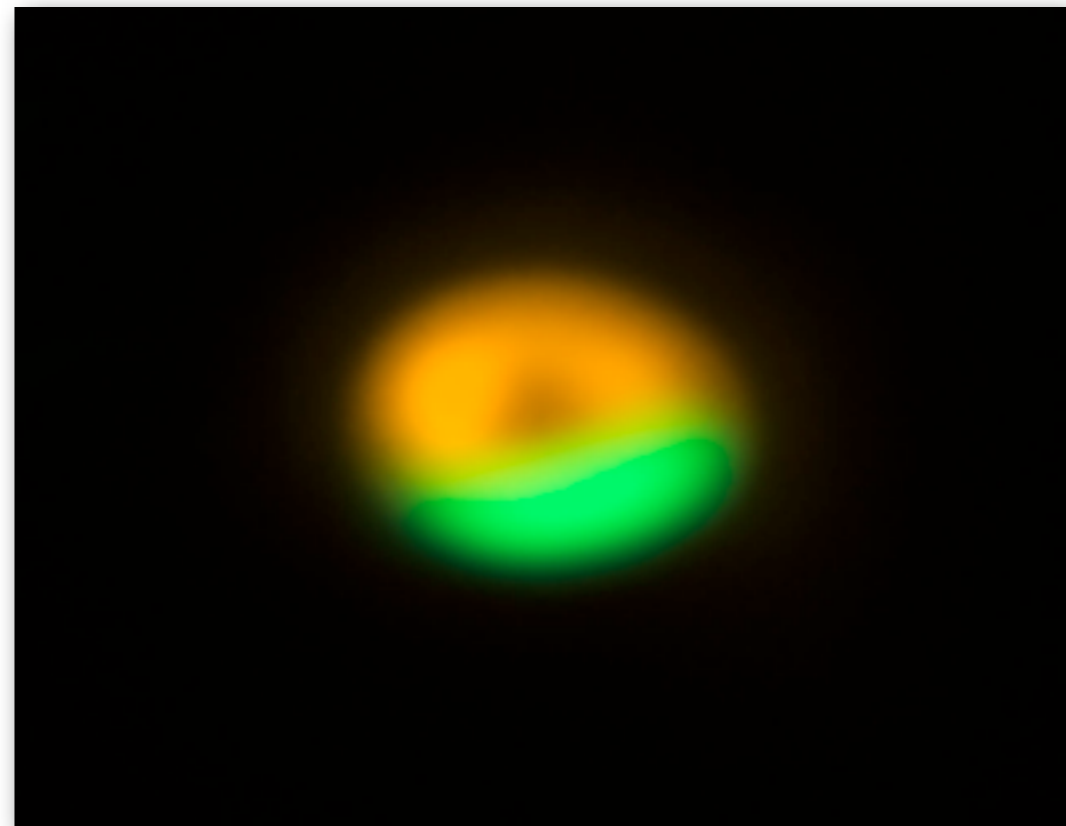
$$\frac{1}{\rho^2} \nabla p \times \nabla \rho \neq 0$$

2. dead zone határán felgyűlemik az anyag  $\rightarrow \nabla p \neq 0$
3.  $\alpha$ -viszkozitás + perturbált  $\alpha \rightarrow$  Rossby-örvény (hurrikánok, Jupiter vörös foltja)
4. **nagyskálás (m=1 módus) anticiklonikus örvényképződés, ha  $\Delta R_{dze} < 2H_{dze}$**
5. **aszimmetrikus “lópatkó” alakú korongok**

HD142527 (Casassus et al., 2013, Nature)



Oph IRS 48 (van der Marel et al., 2013, Science)

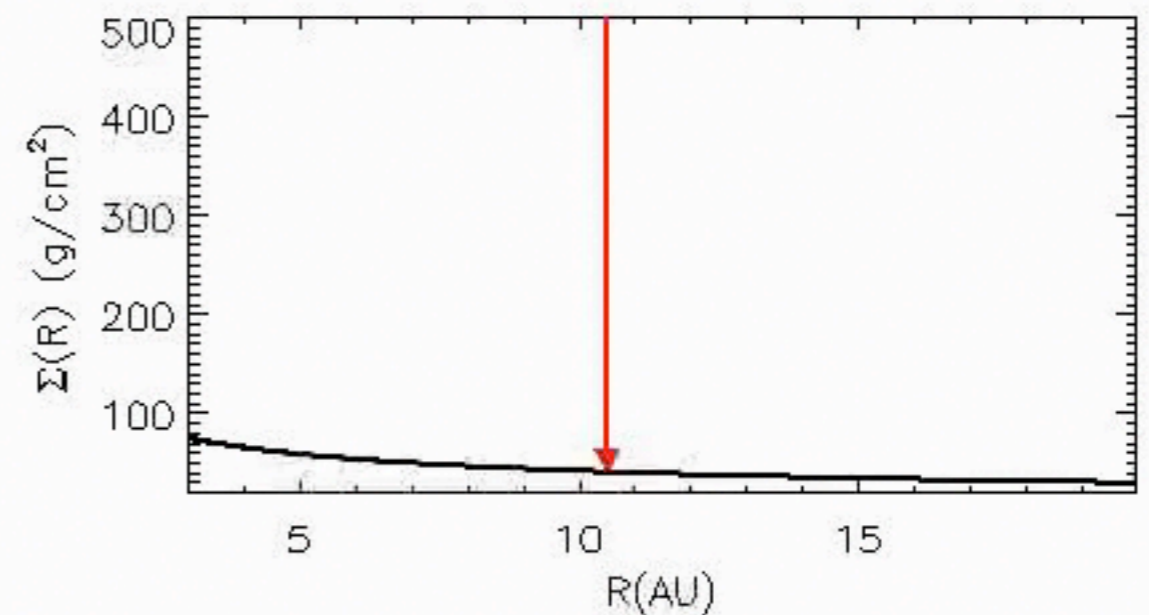
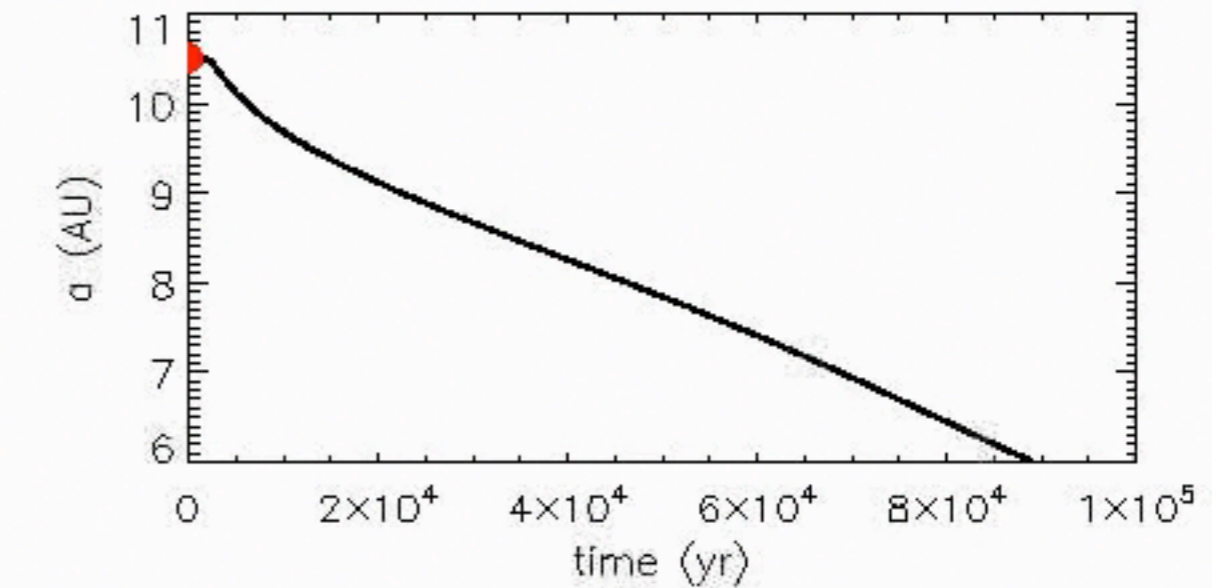
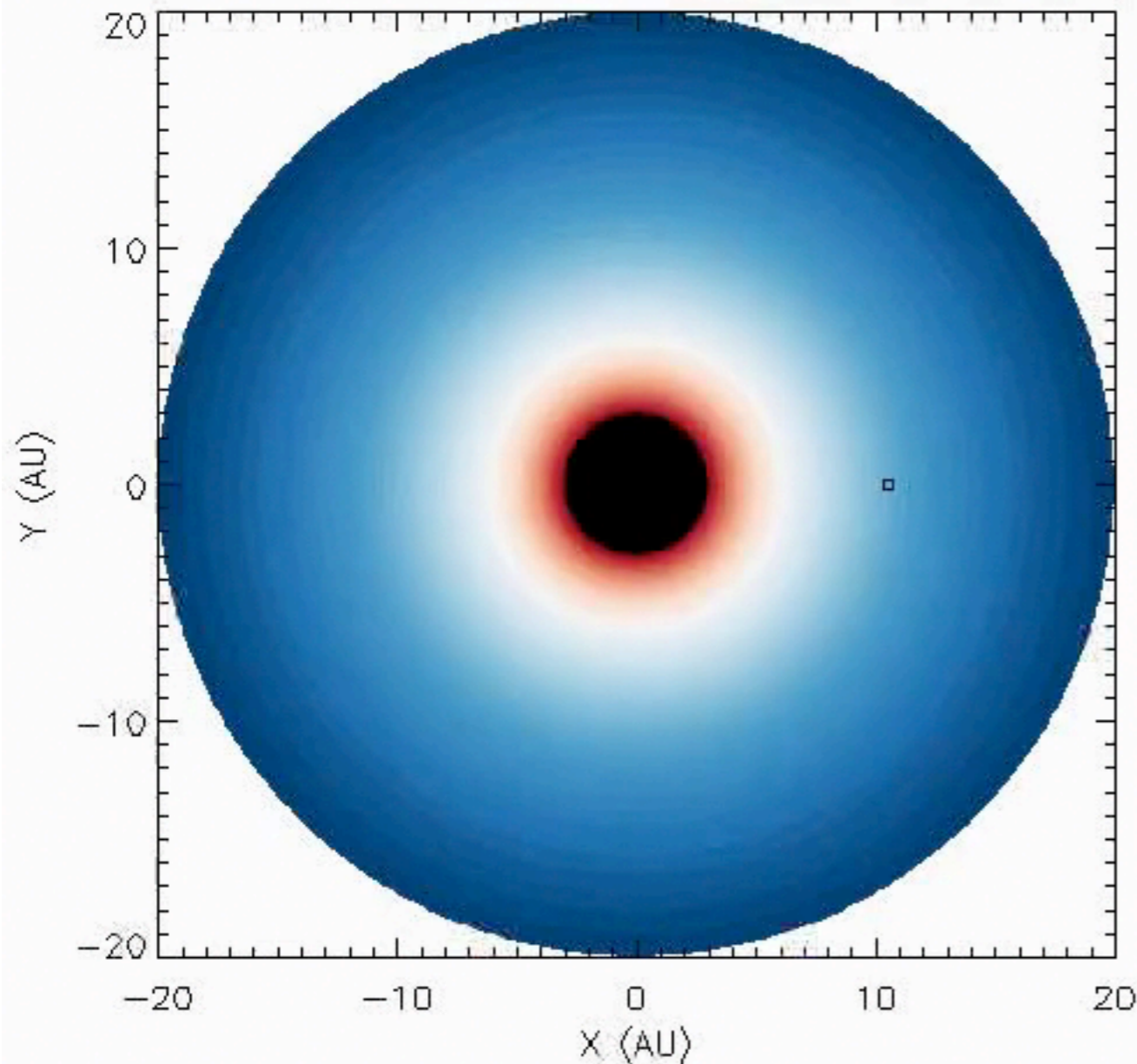


## 5. ÓRIÁSBOLYGÓ-MAG MIGRÁCIÓJA 2D-BEN

- Migráció vizsgálata 2D-ben, GFARGO-val

Nincs Rossby-instabilitás:  $\Delta R_{dze} = 2H_{dze}$

$10M_{\oplus}$  bolygó migrációja (Regály et al., 2013)



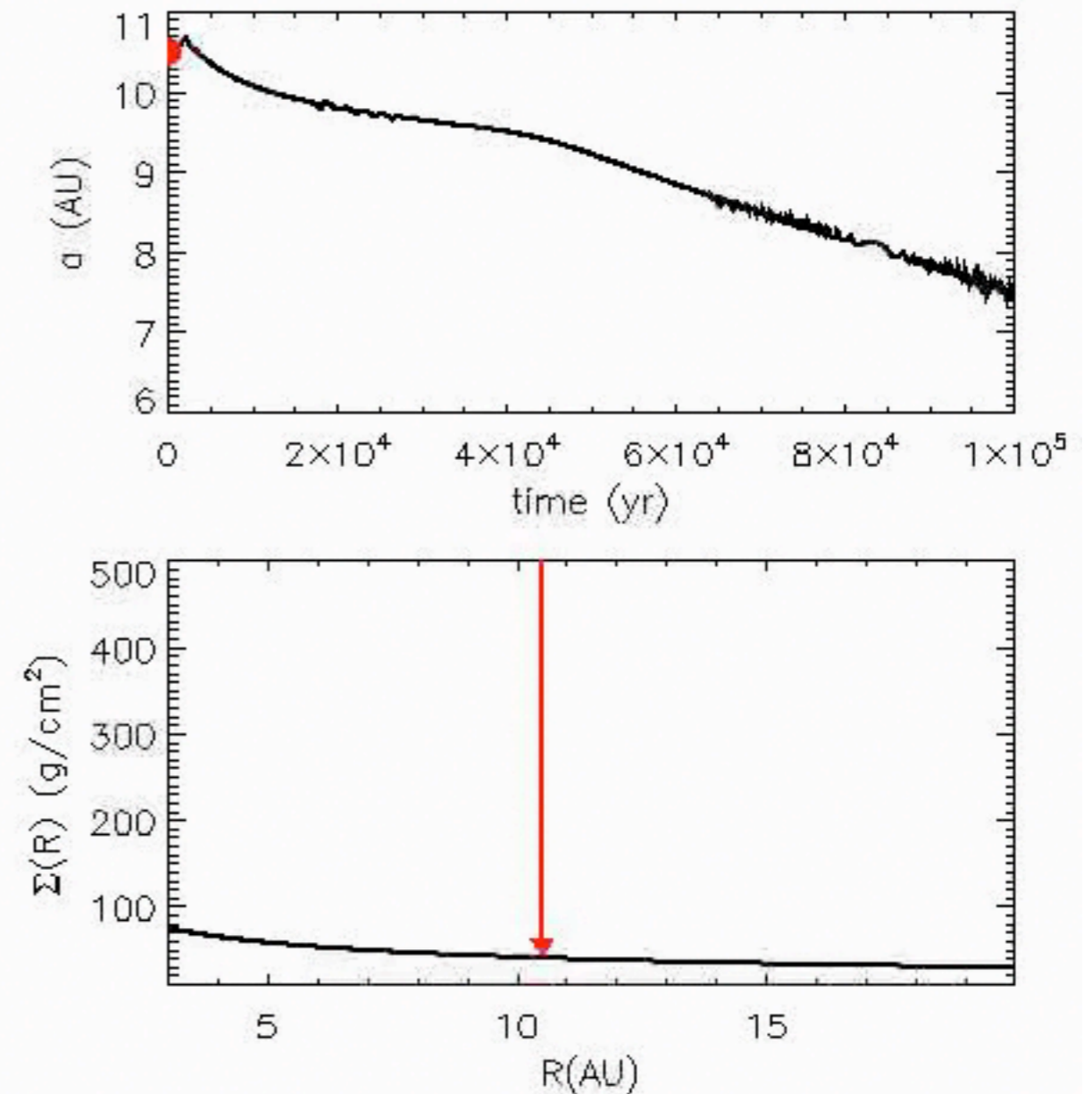
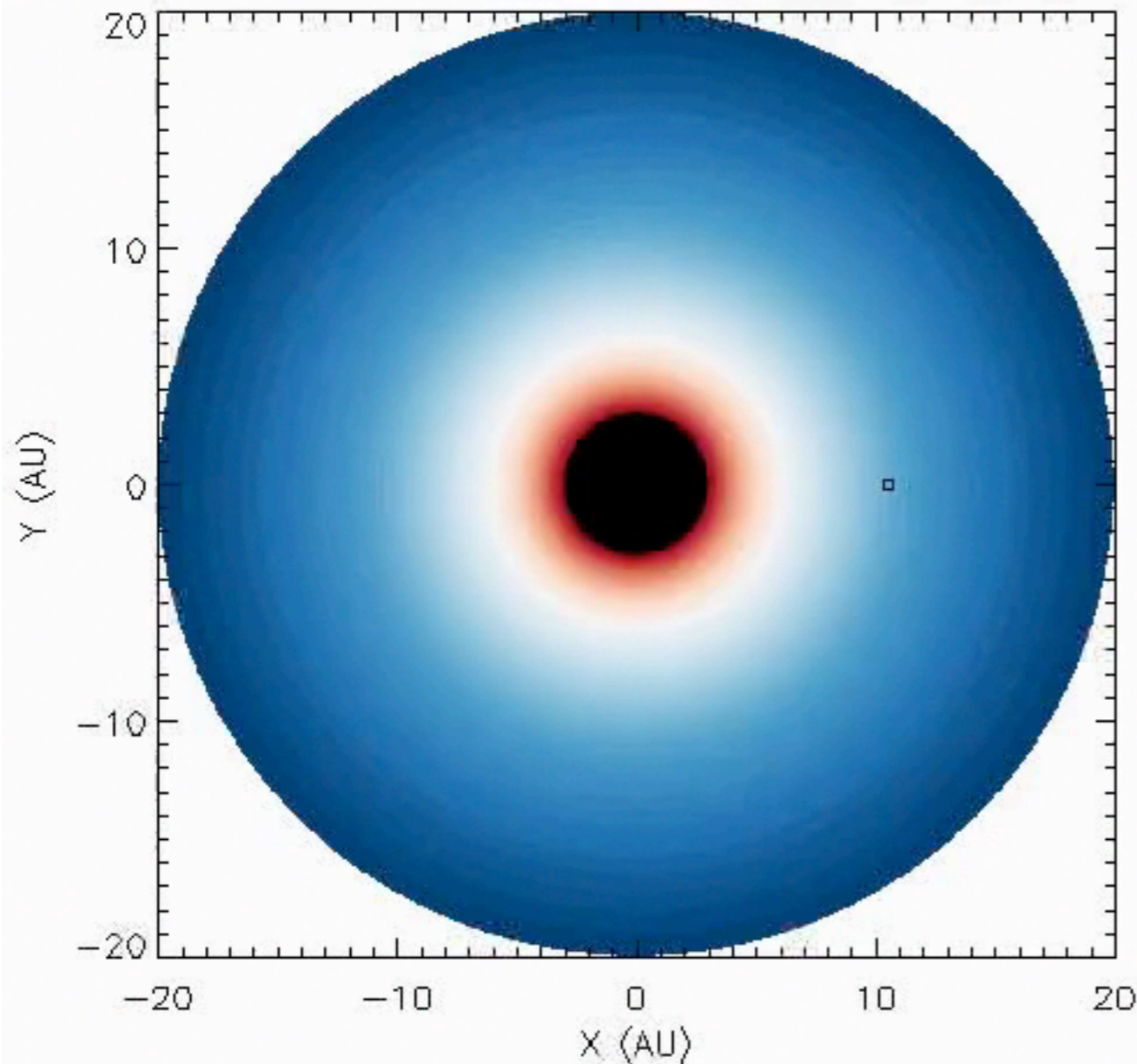


## 5. ÓRIÁSBOLYGÓ-MAG MIGRÁCIÓJA 2D-BEN

- Migráció vizsgálata 2D-ben, GFARGO-val

Van Rossby-instabilitás:  $\Delta R_{dze} = 1.5H_{dze}$

$10M_{\oplus}$  bolygó átmeneti csapdázódása (Regály et al., 2013)

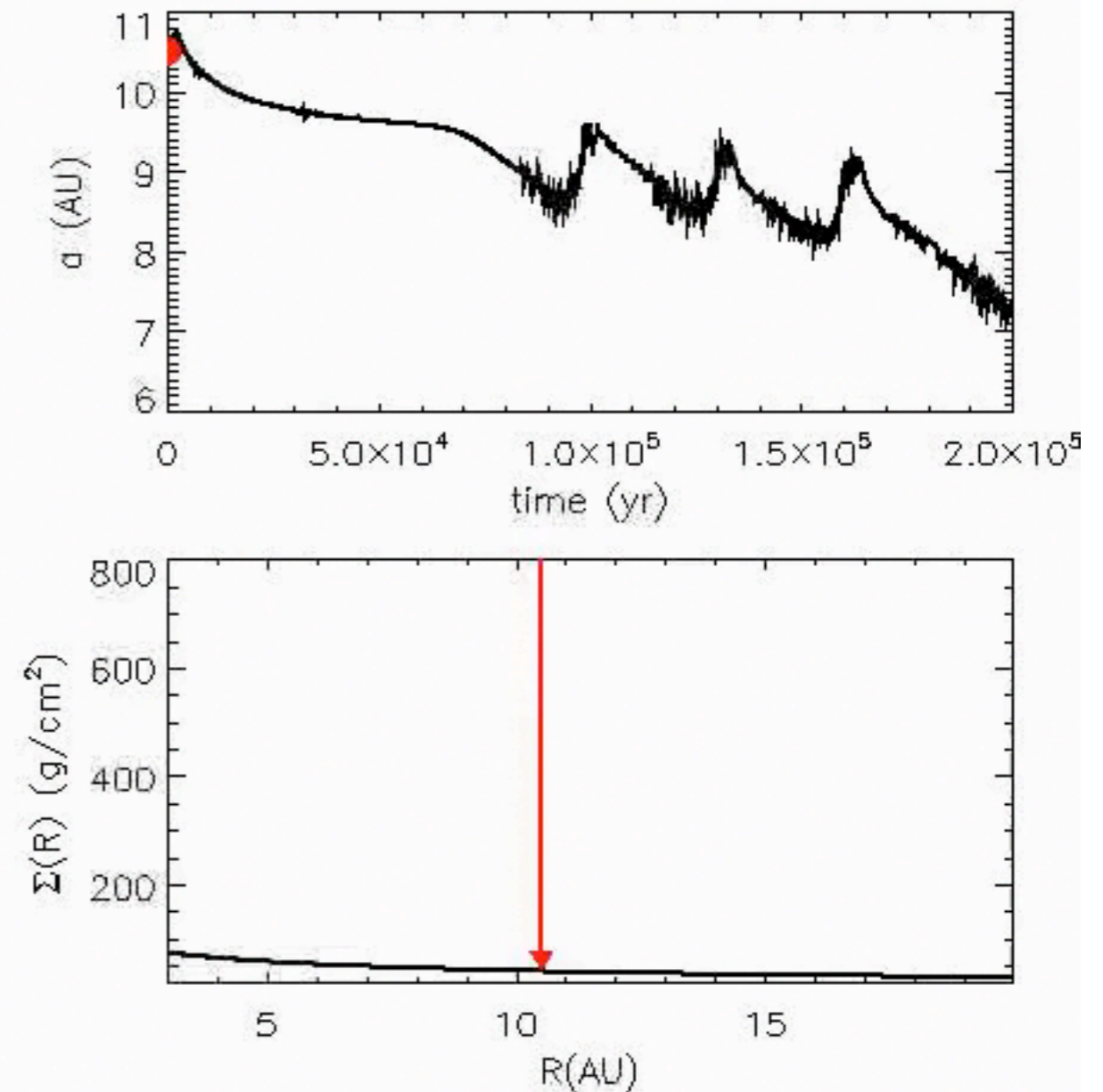
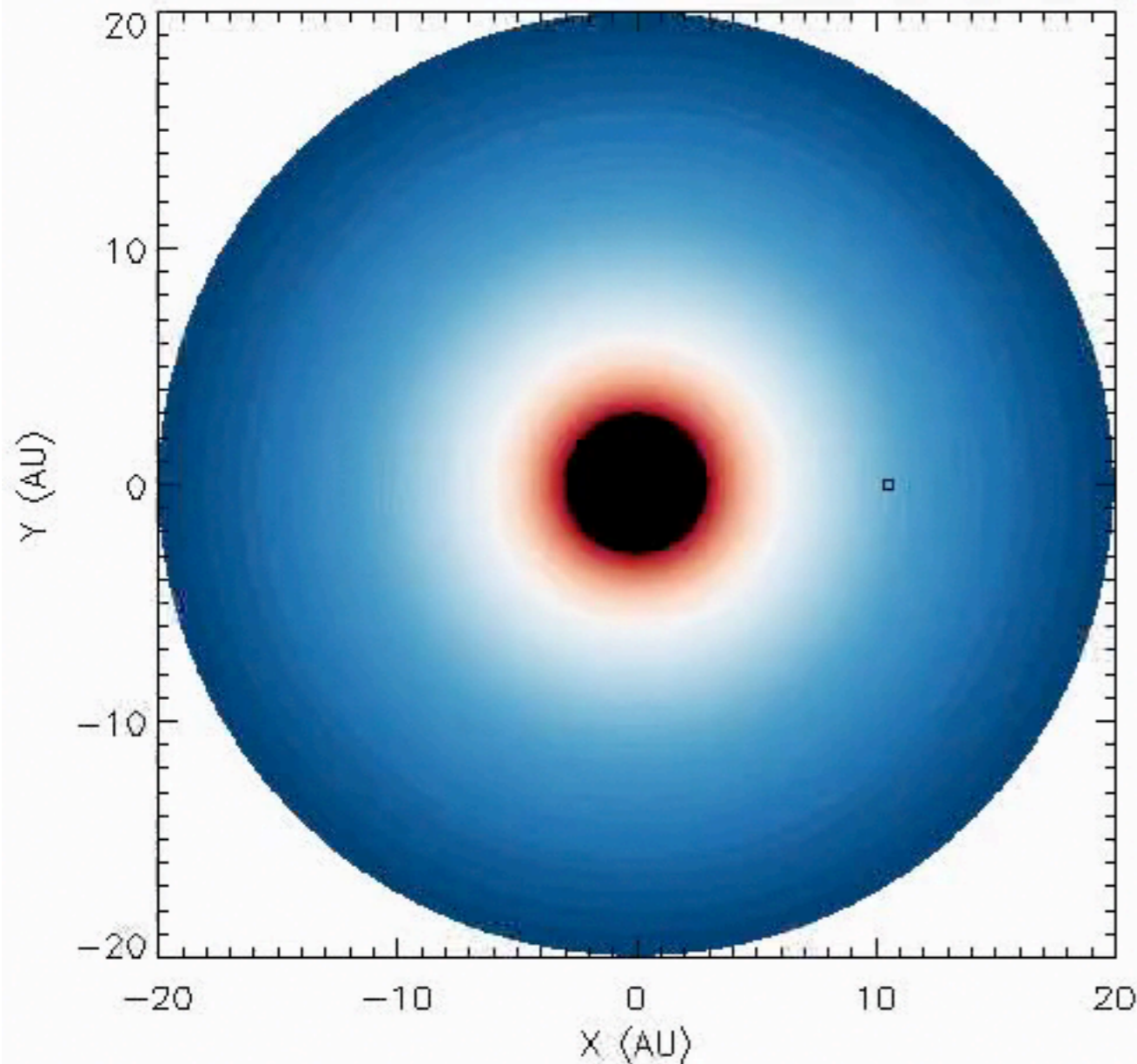


## 5. ÓRIÁSBOLYGÓ-MAG MIGRÁCIÓJA 2D-BEN

- Migráció vizsgálata 2D-ben, GFARGO-val

Van Rossby-instabilitás:  $\Delta R_{dze} = 1.3H_{dze}$

$10M_{\oplus}$  bolygó átmeneti csapdázódása (Regály et al., 2013)

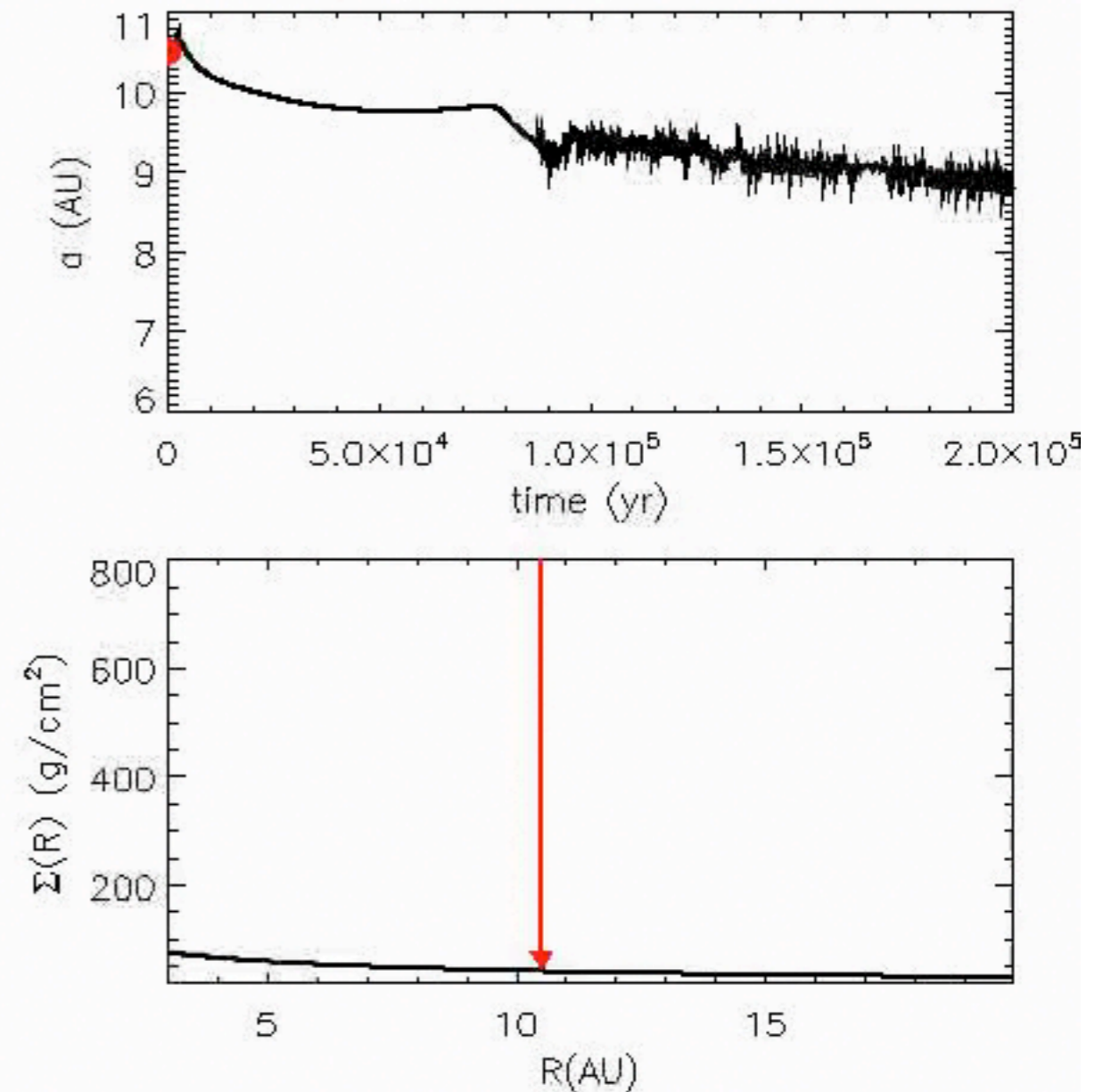
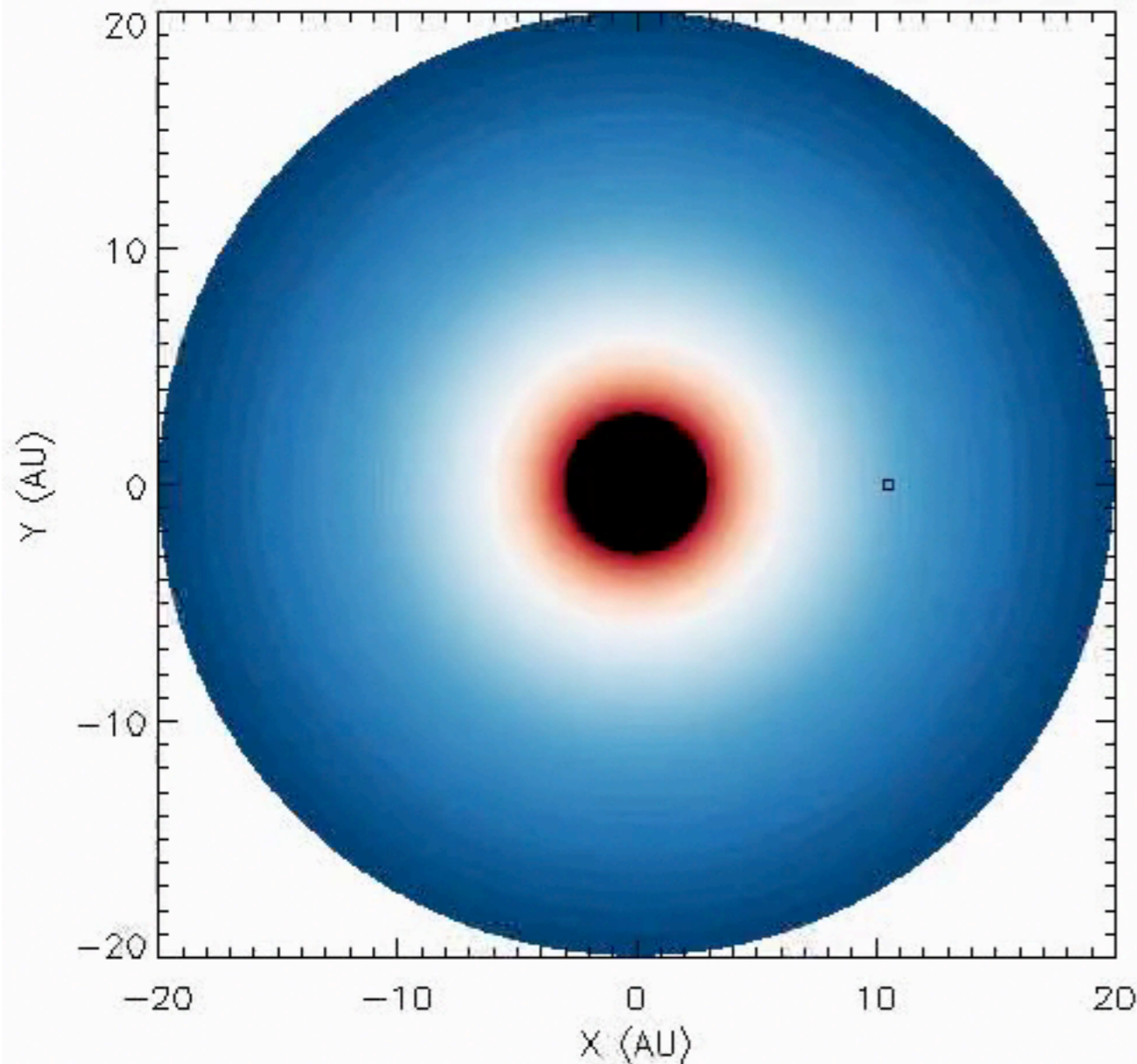


## 5. ÓRIÁSBOLYGÓ-MAG MIGRÁCIÓJA 2D-BEN

- Migráció vizsgálata 2D-ben, GFARGO-val

Van Rossby-instabilitás:  $\Delta R_{dze} = 1H_{dze}$

$10M_{\oplus}$  bolygó csapdázódása (Regály et al., 2013)



## 6. KONKLÚZIÓK

Ha **nincs** Rossby-instabilitás, széles dead zone edge,  $\Delta R_{dze} \geq 2H_{dze}$

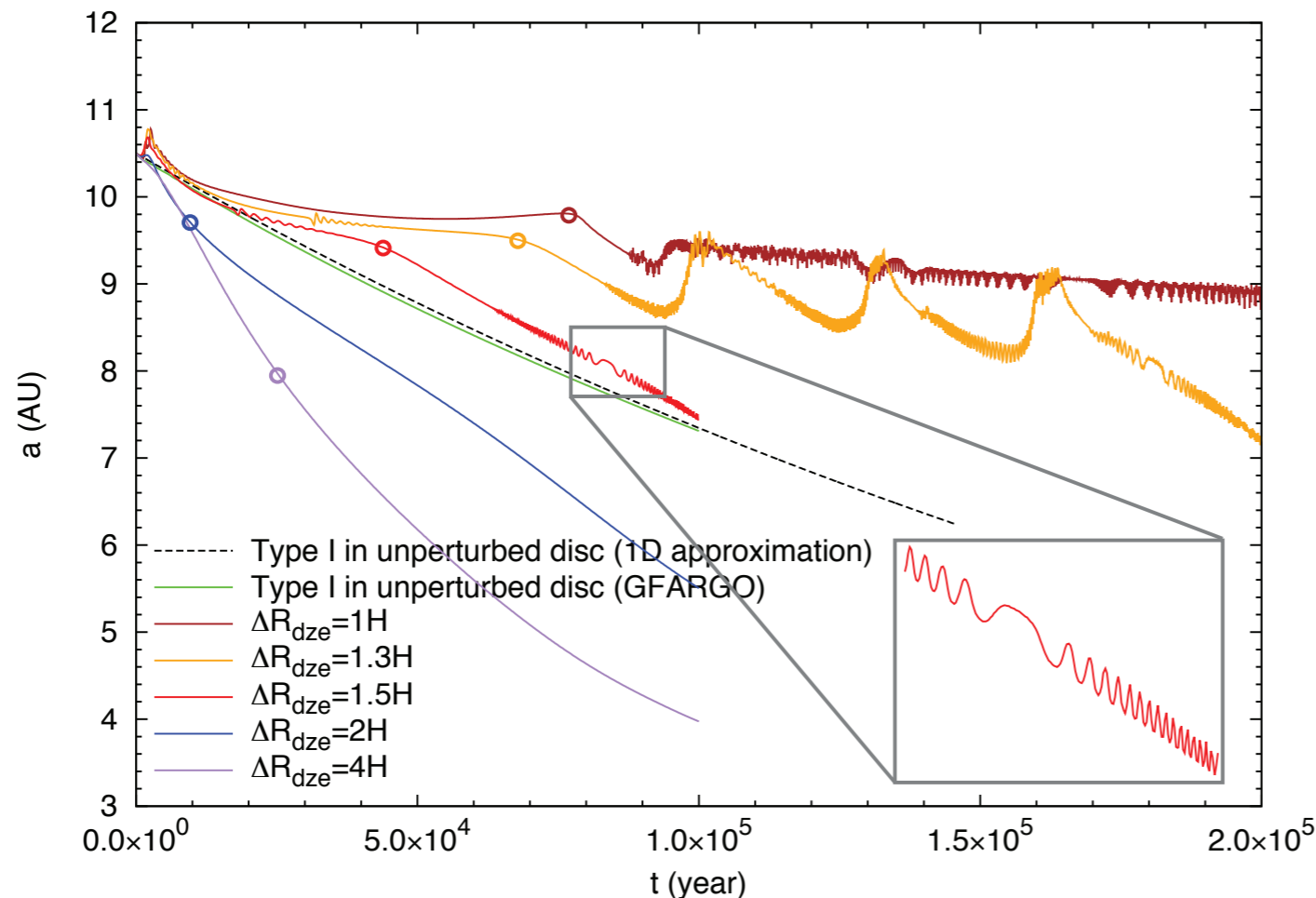
1. nincs migrációs csapda
2. a migráció gyorsabb, mint a klasszikus I-tip. migrációban

Ha **van** Rossby-instabilitás, vékony dead zone edge,  $1H_{dze} \leq \Delta R_{dze} \leq 1.5H_{dze}$

3. csak temporális csapda (kidobódáskor átmenetileg megszűnik az örvény)
4. ismétlődő befogás és kidobódás, kis amplitúdóval oscillál a bolygópálya

Ha **van** Rossby-instabilitás, extrém vékony dead zone edge,  $\Delta R_{dze} \leq 1H_{dze}$

5. 200 ezer évig a csapdában marad az órisásbolygó-mag, kis amplitúdóval oscillál a bolygópálya



(Regály et al., 2013)