

Evolución temprana de sistemas planetarios

Interacciones Planeta-Disco

- La densidad del disco cambia como resultado de la competencia de los torques ejercidos sobre el disco por el planeta y por el propio disco.
- El planeta da momento angular a la parte externa del disco, mientras que toma algo de la parte interna.
- Así empuja la parte externa del disco hacia afuera y la parte interna hacia adentro, y por lo tanto abre una brecha.
- La evolución interna del disco, que tiende a expandir el gas hacia las regiones vacías, se opone a la apertura de la brecha.



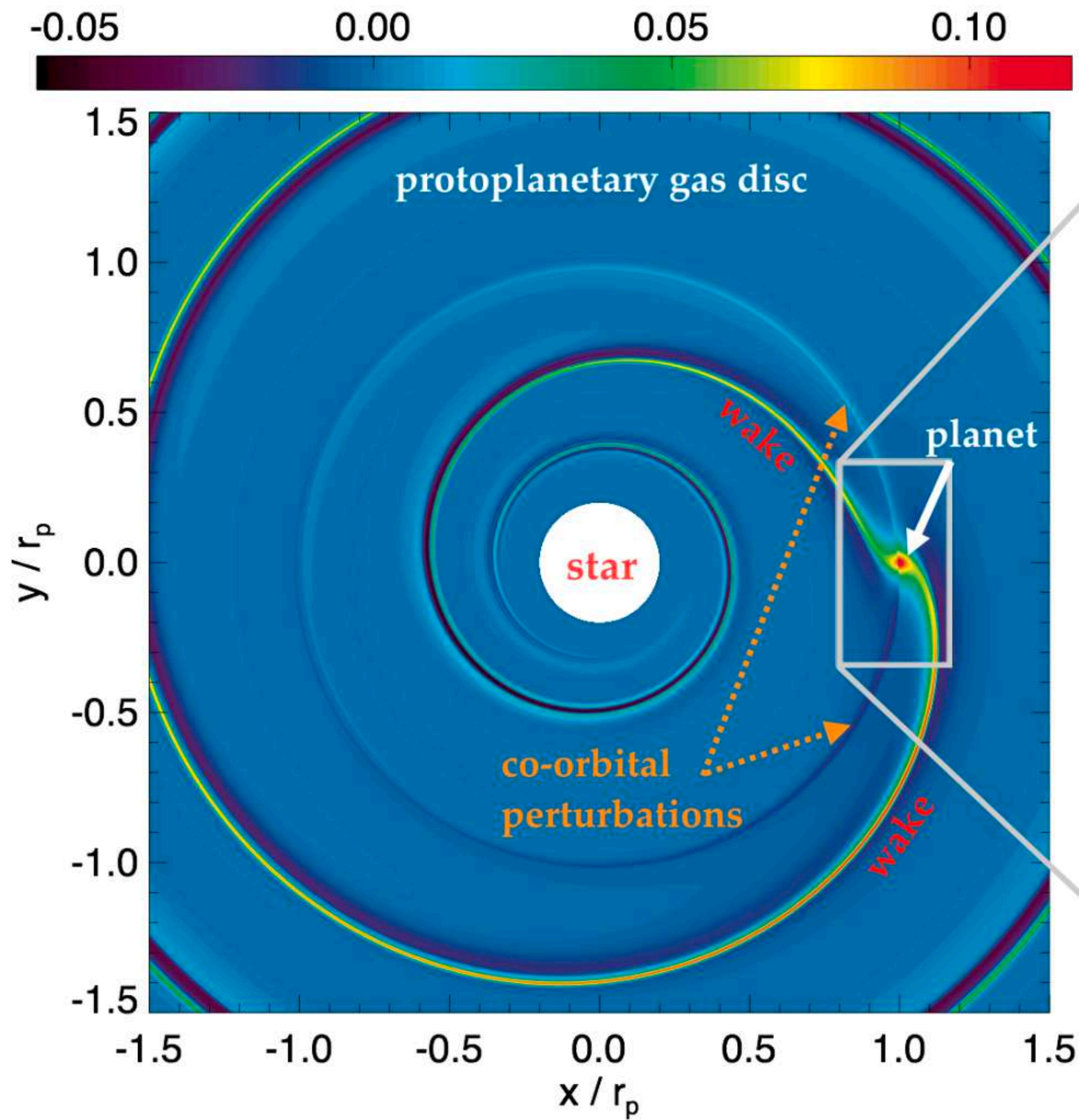
Juego de Torques

$$t_g + t_\nu + t_P + t_{\text{corot}} = 0$$

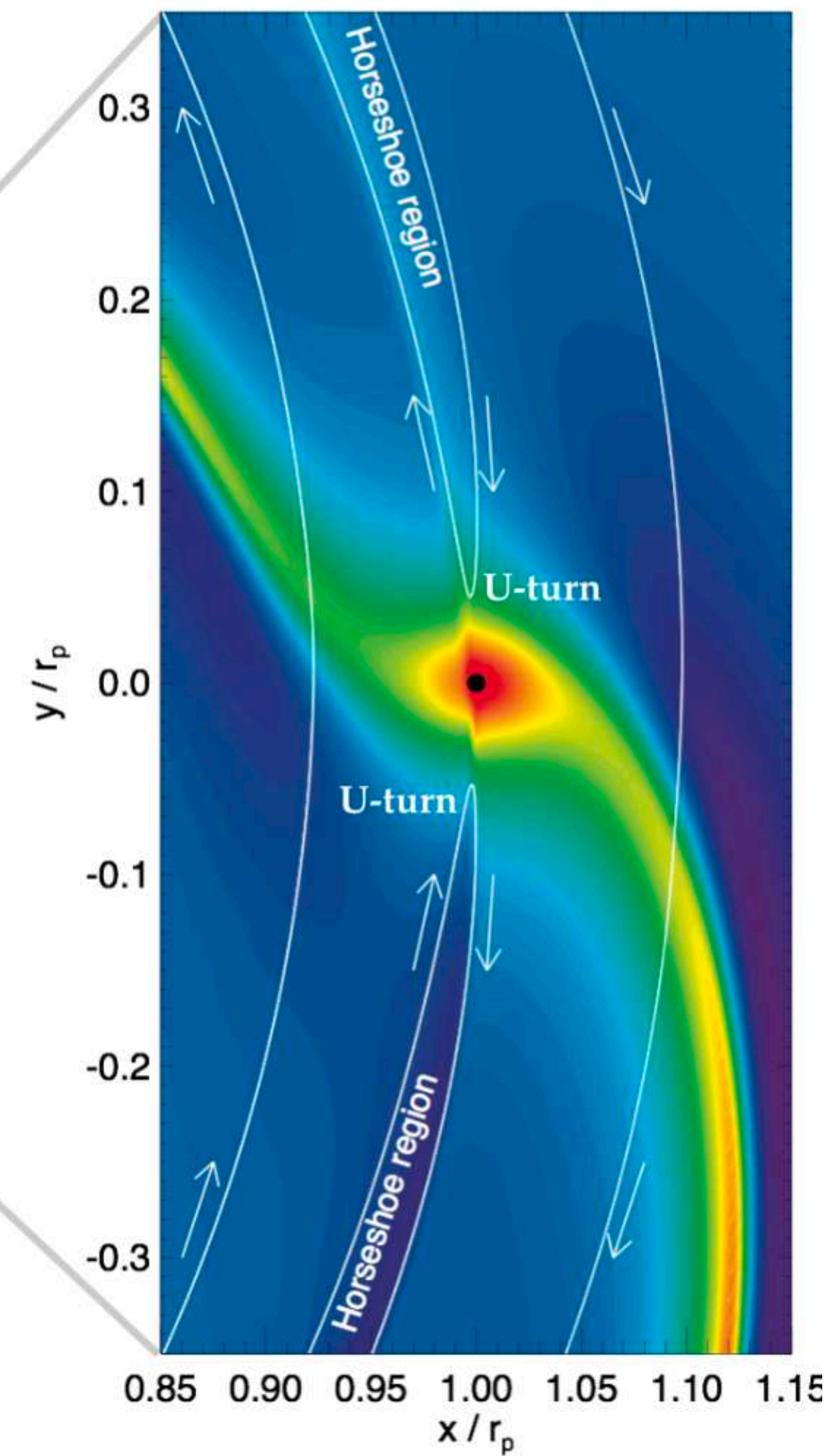
Interacción planeta-disco



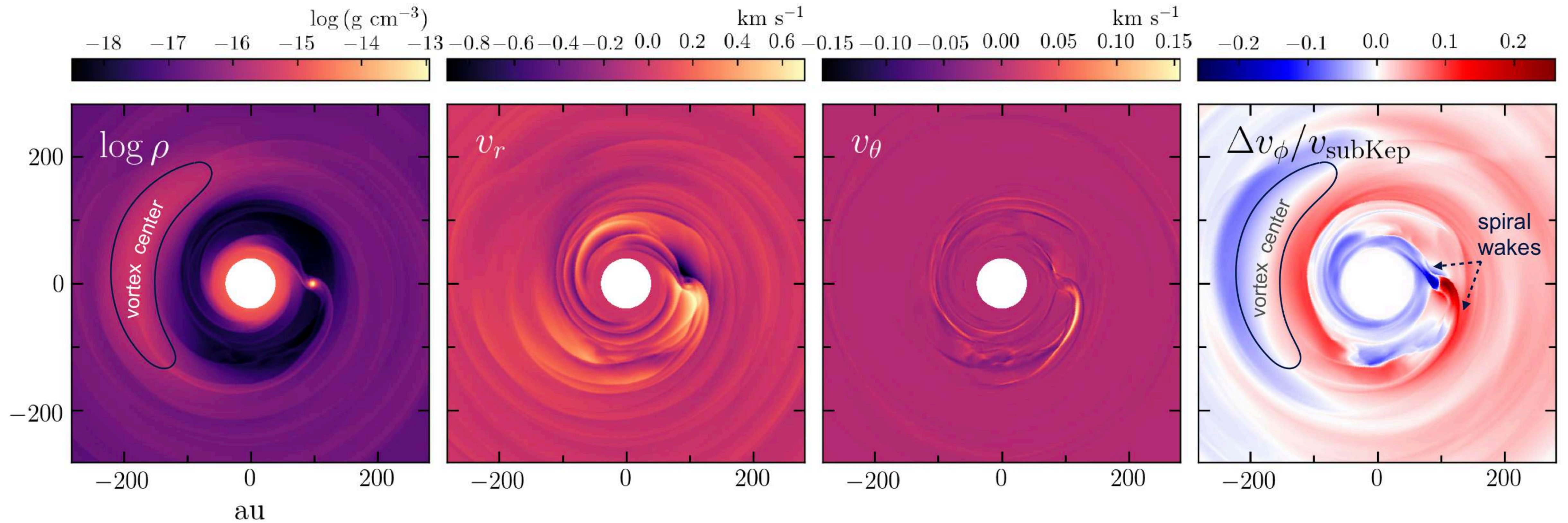
Torques



Baruteau et al. (2013) PPVI chapter



Interacción planeta-disco

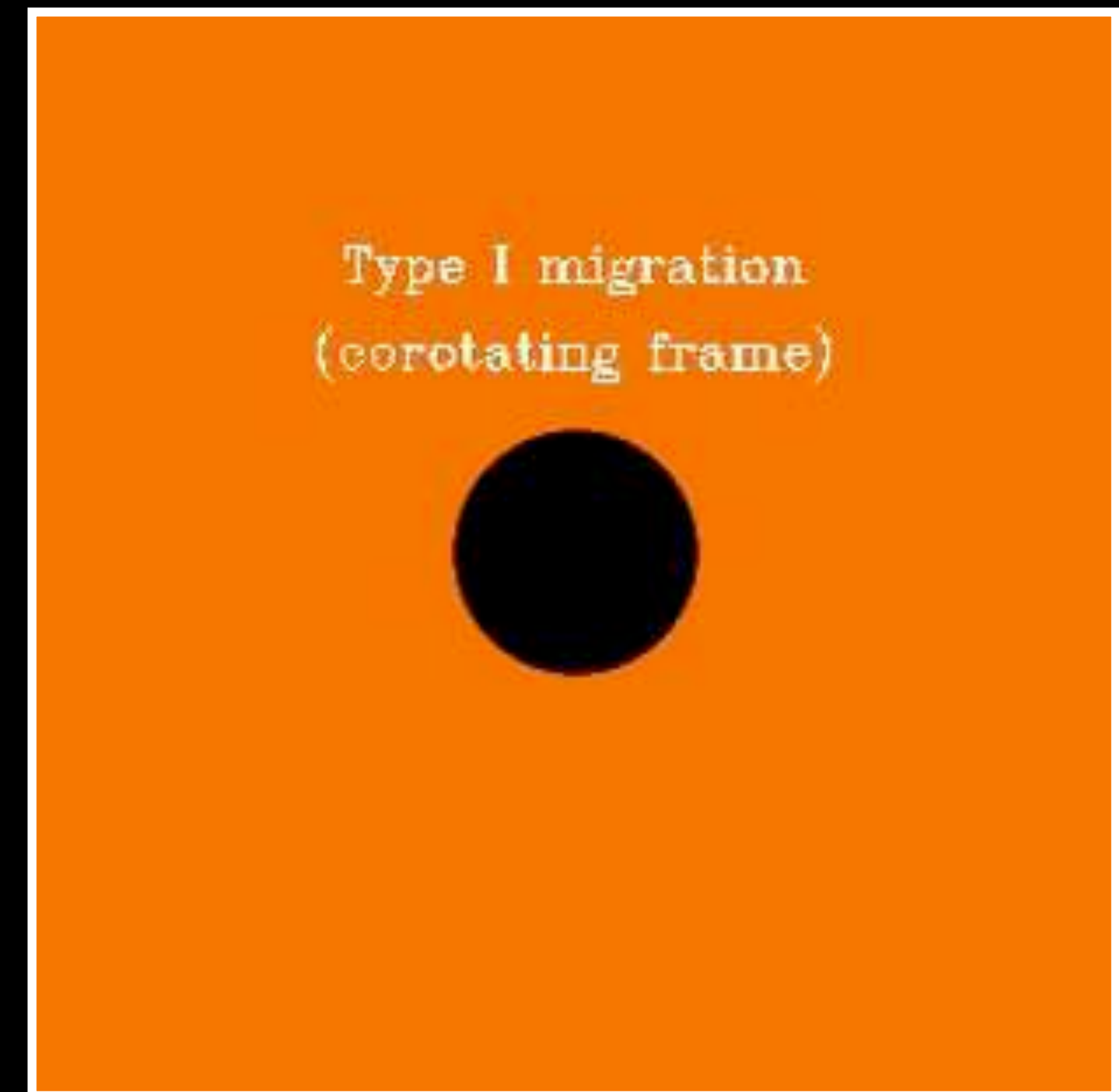


3D isothermal simulation, **FARGO3D GPU**, 1000 orbits
Perez, Casassus & Benitez-Llambay (2018)

Migración en disco gaseoso

- El resultado del intercambio de momentum angular durante la interacción entre un planeta y un disco viscoso es la “migración”.
- Se puede dividir en 2 regímenes
- **Tipo I:** apropiado para planeta de baja masa.
- **Tipo II:** apropiado para planetas gigantes.

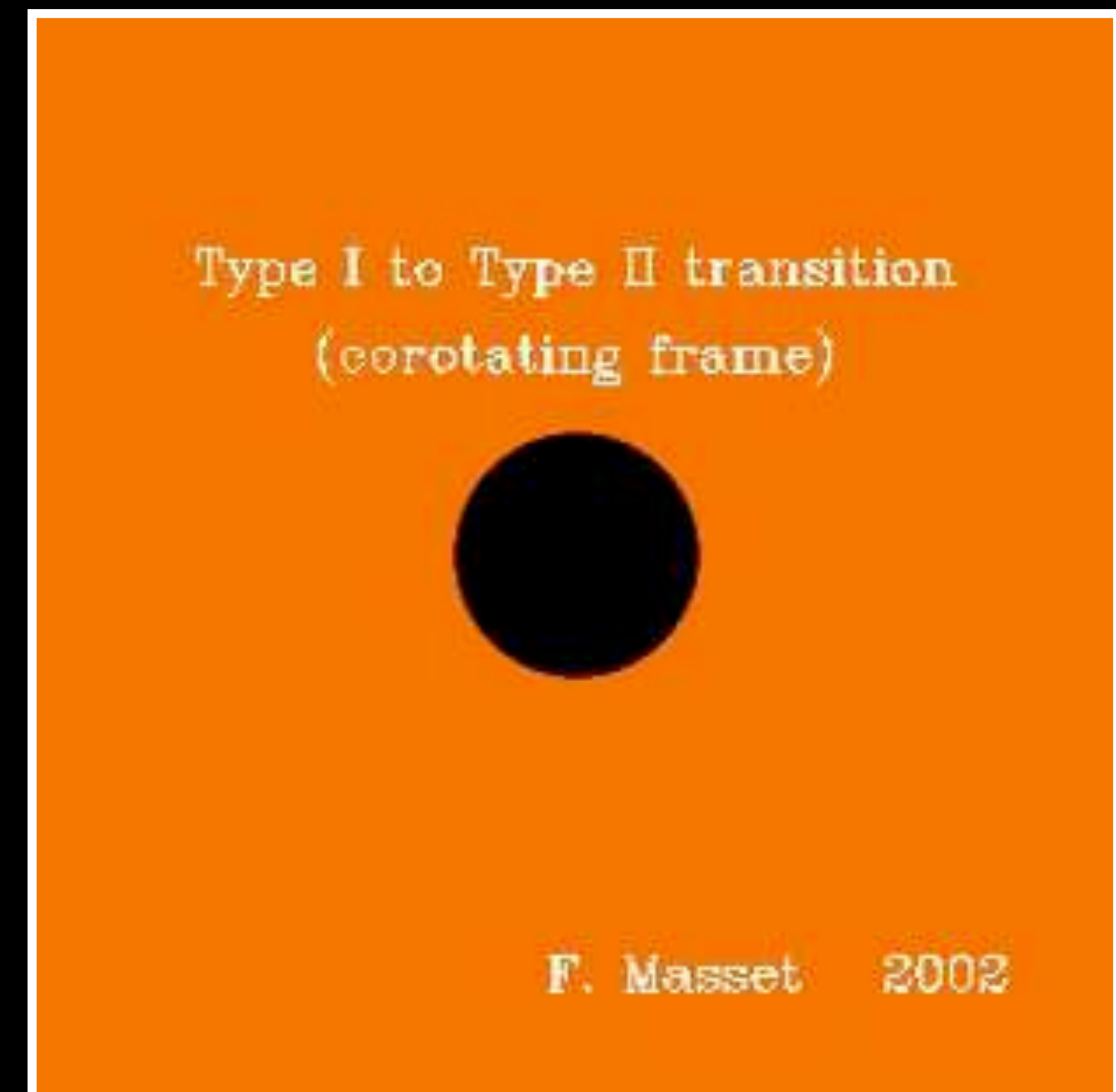
Tipo I. La interacción es débil y prácticamente no perturba la densidad local del disco, o no lo suficiente para contrarrestar la redistribución de momentum angular debida a la evolución viscosa.



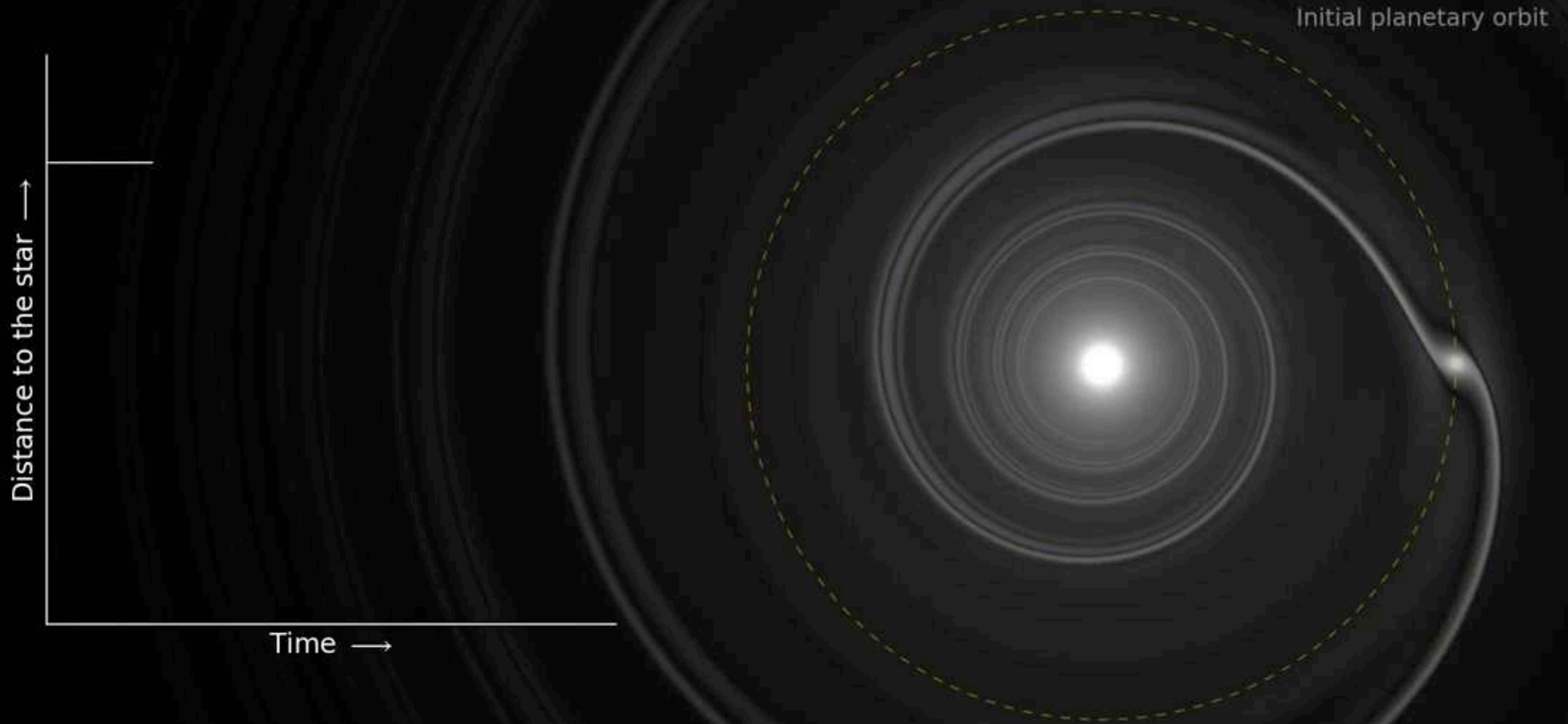
Migración en disco gaseoso

- El resultado del intercambio de momentum angular durante la interacción entre un planeta y un disco viscoso es la “migración”.
- Se puede dividir en 2 regímenes
- **Tipo I:** apropiado para planeta de baja masa.
- **Tipo II:** apropiado para planetas gigantes.

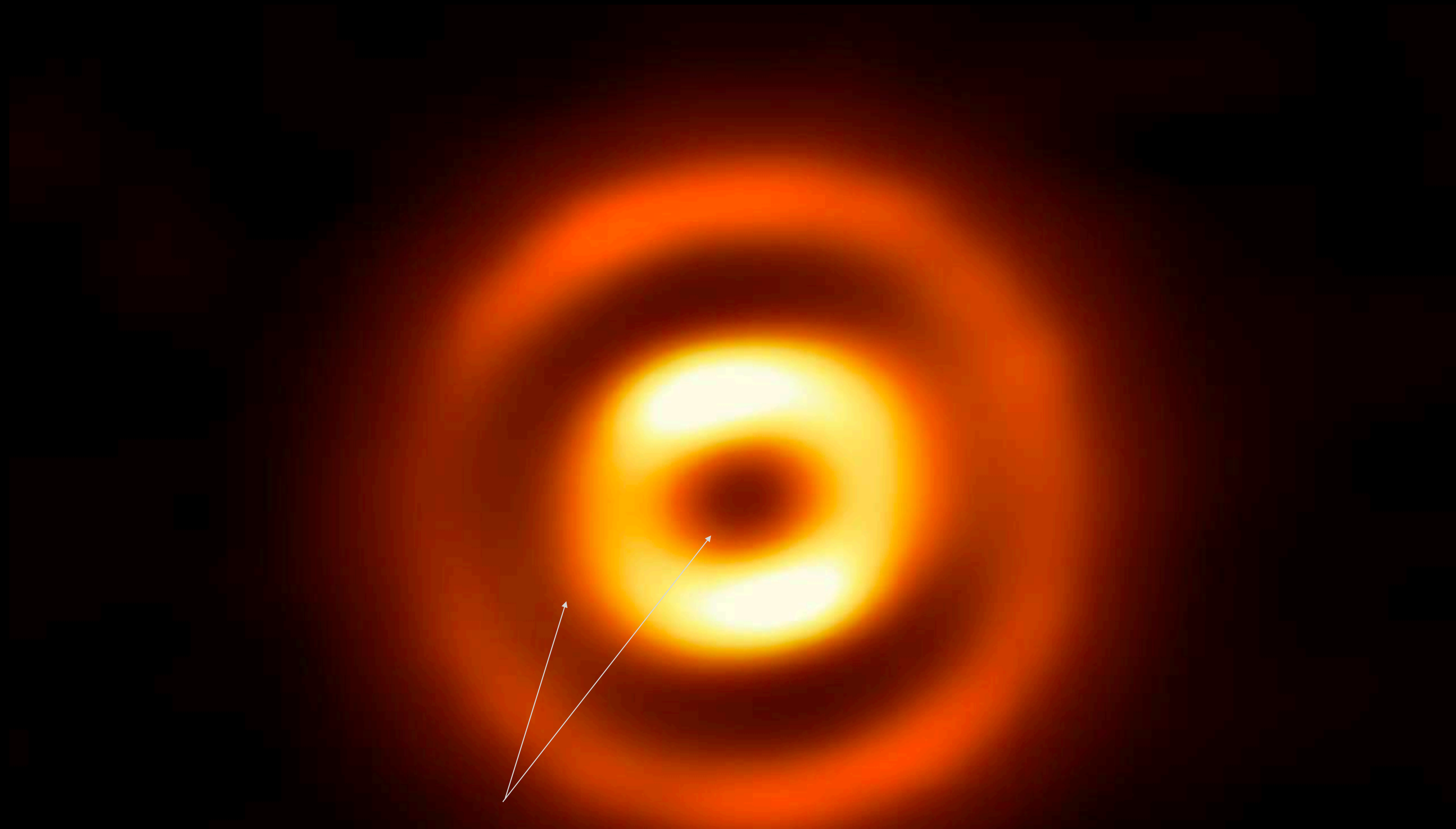
Tipo II. El torque gravitacional del planeta domina el transporte de momentum angular en el disco. Se abre un gap y se producen estructuras en el disco.



STANDARD MIGRATION



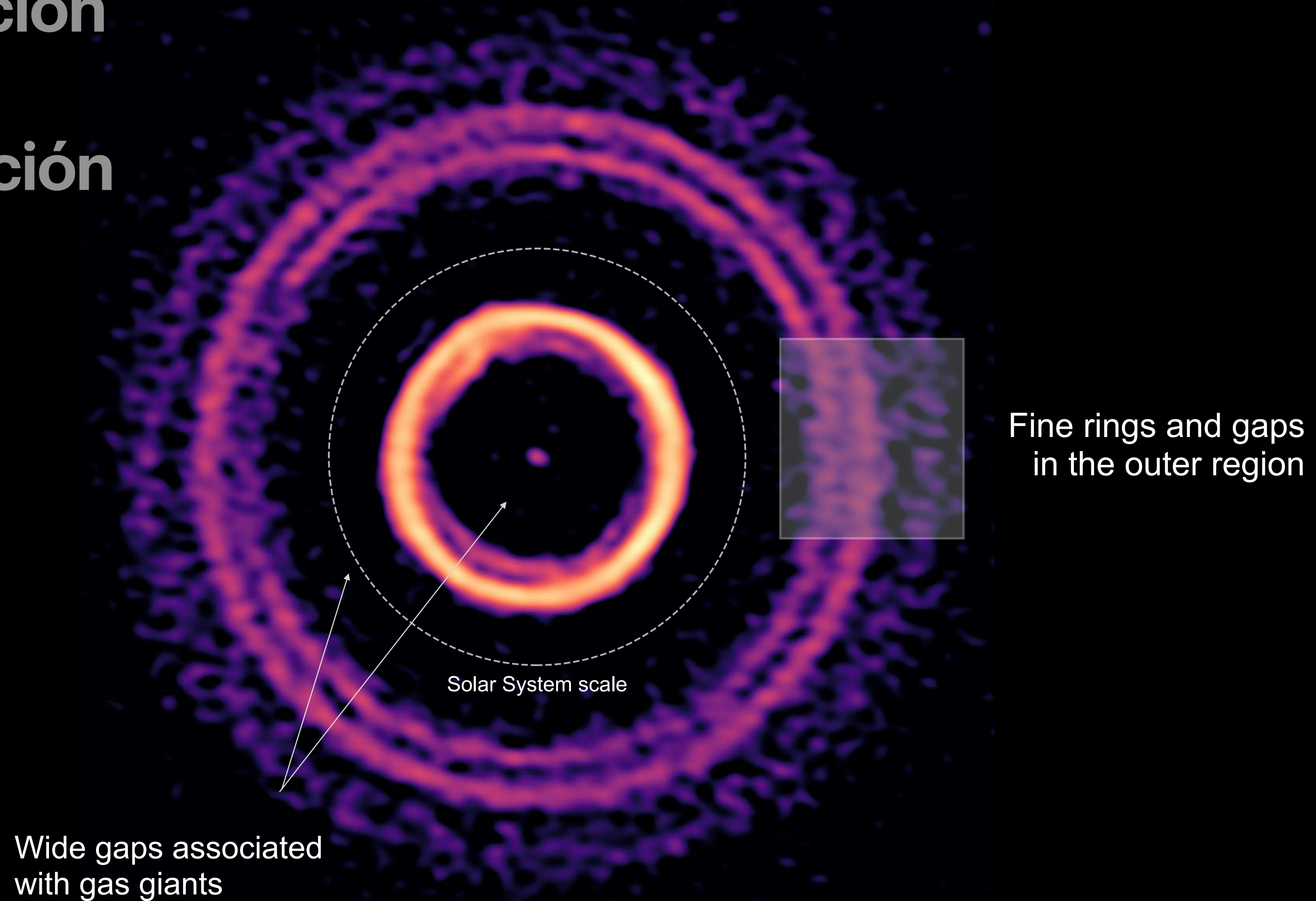
Benitez-Llambay et al. (2015), Nature



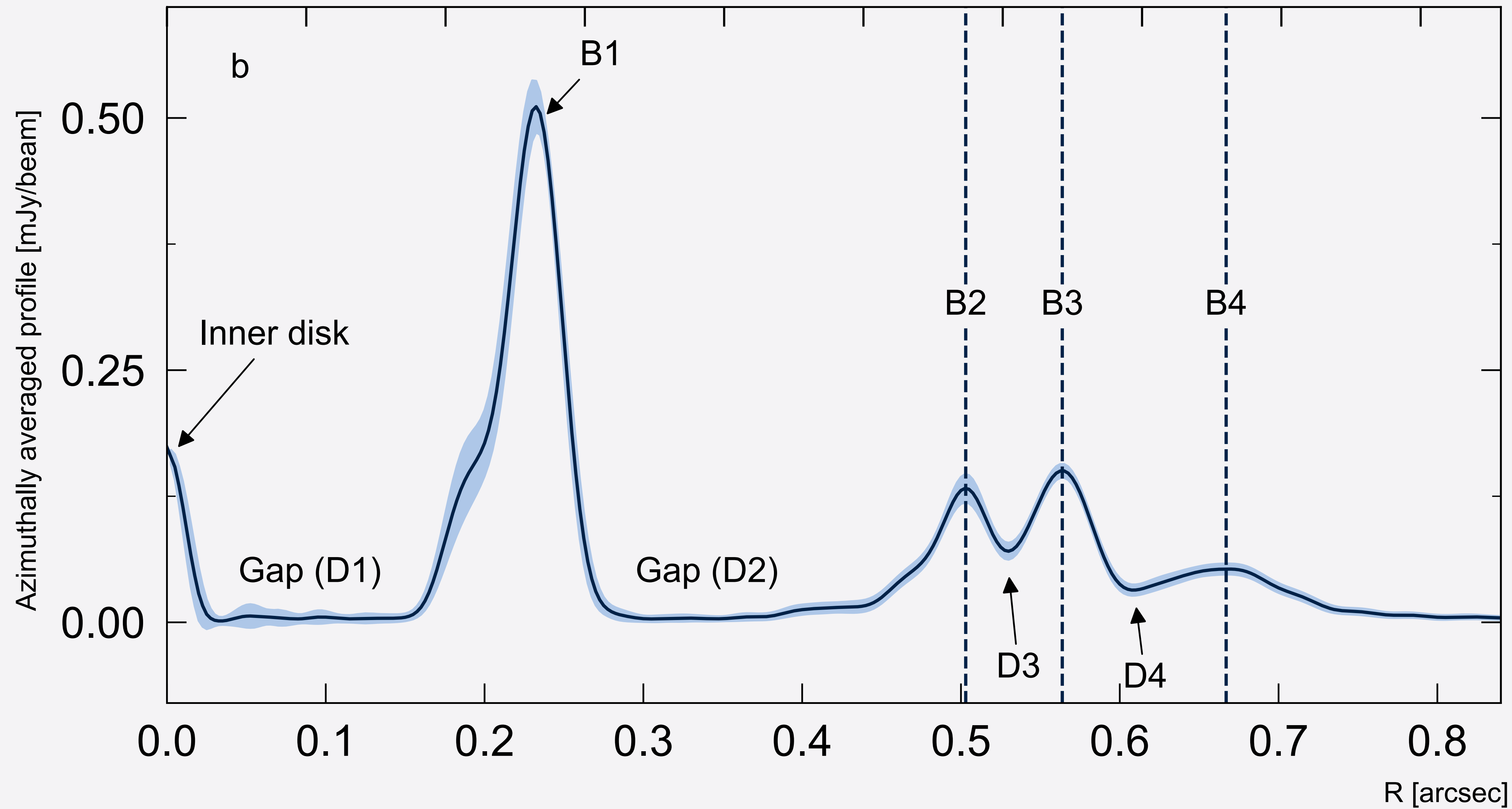
Wide gaps associated
with gas giants

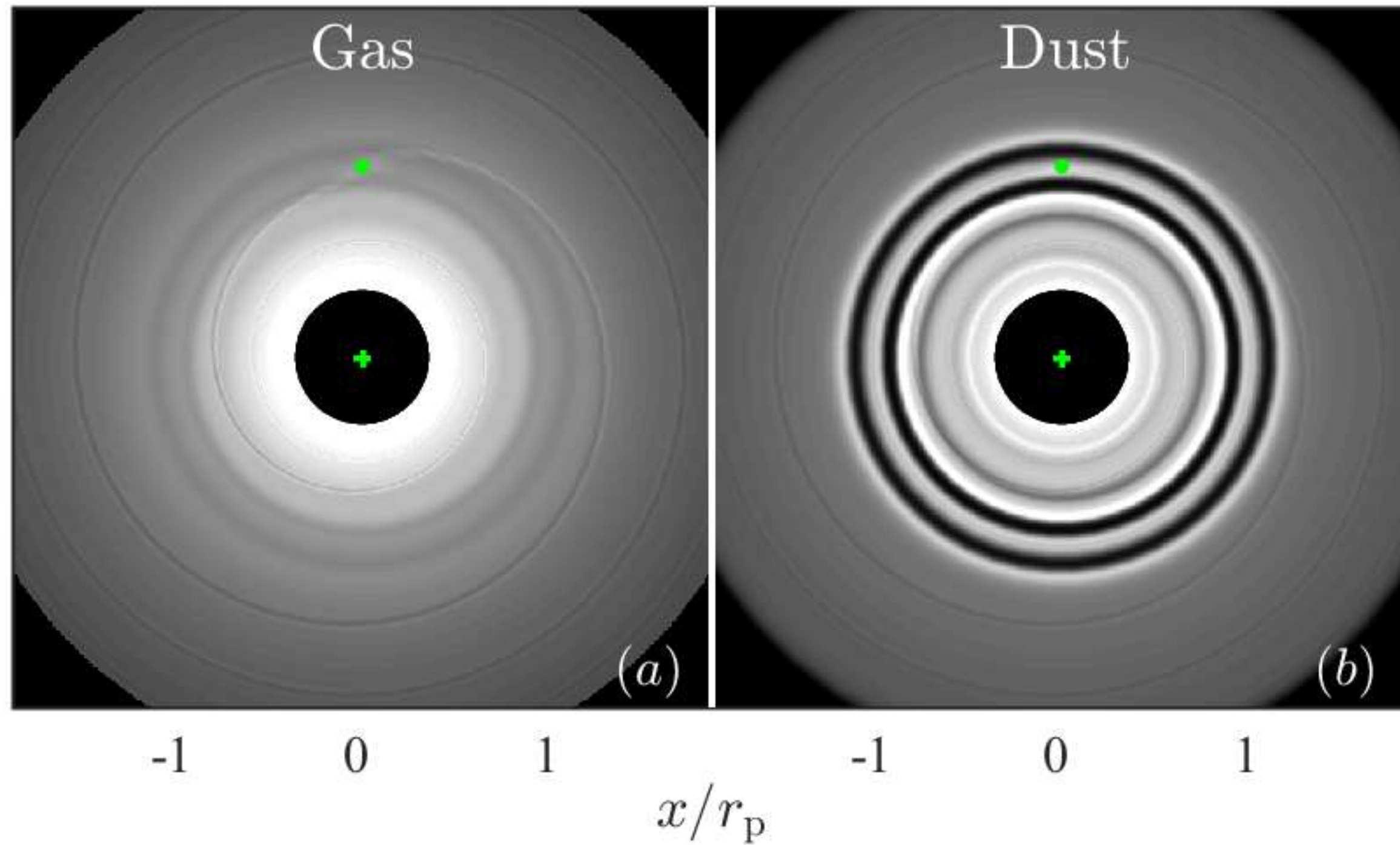
ALMA 1.3 mm image of HD169142 (Fedele et al. 2017)

Única observación
a la fecha que
muestra migración
de un
protoplaneta.



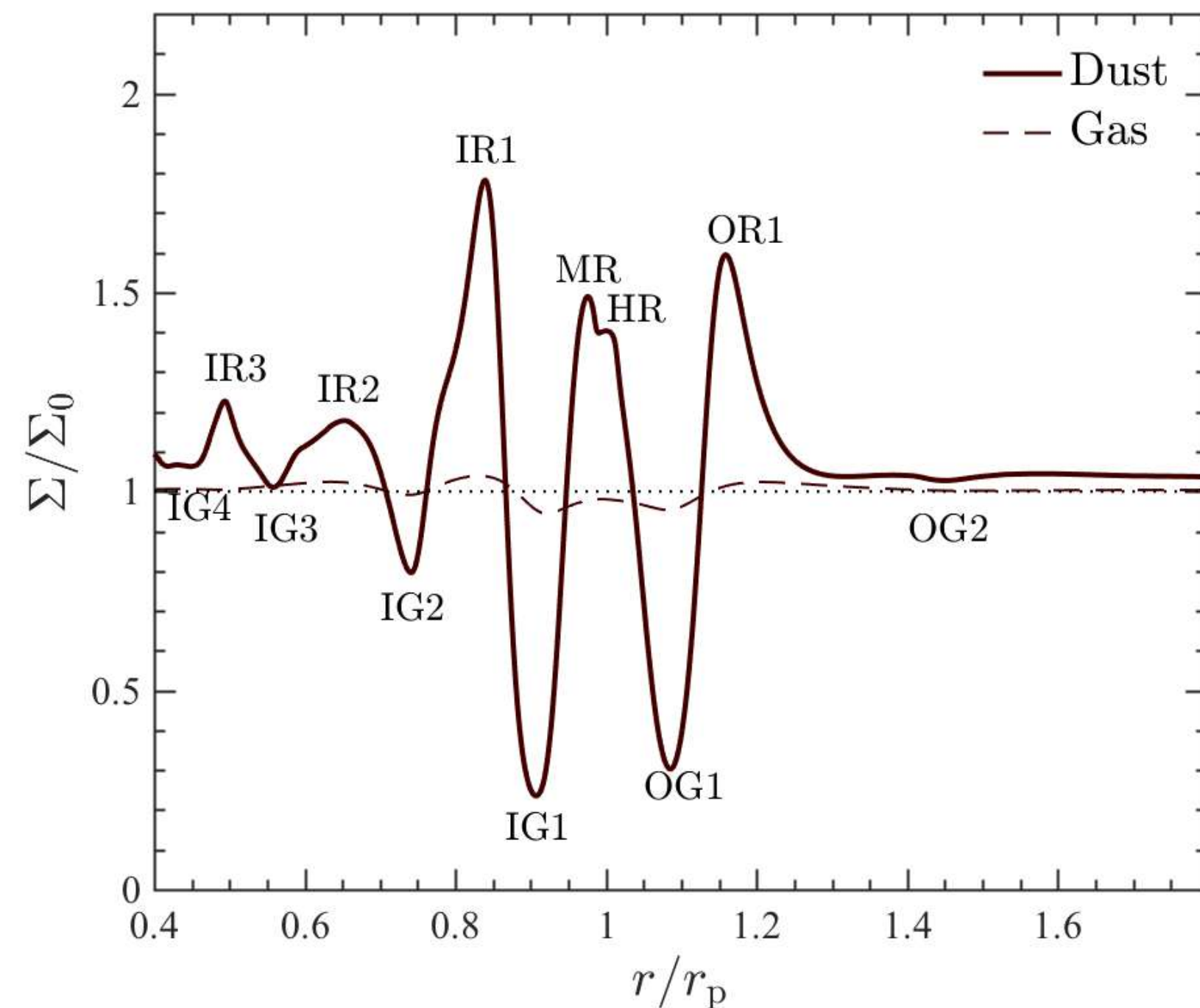
ALMA 1.3 mm image of HD169142 (Perez et al. 2019)





Two gaps, one planet

Dong et al. (2017, 2018)
Goodman & Rafikov (2001)

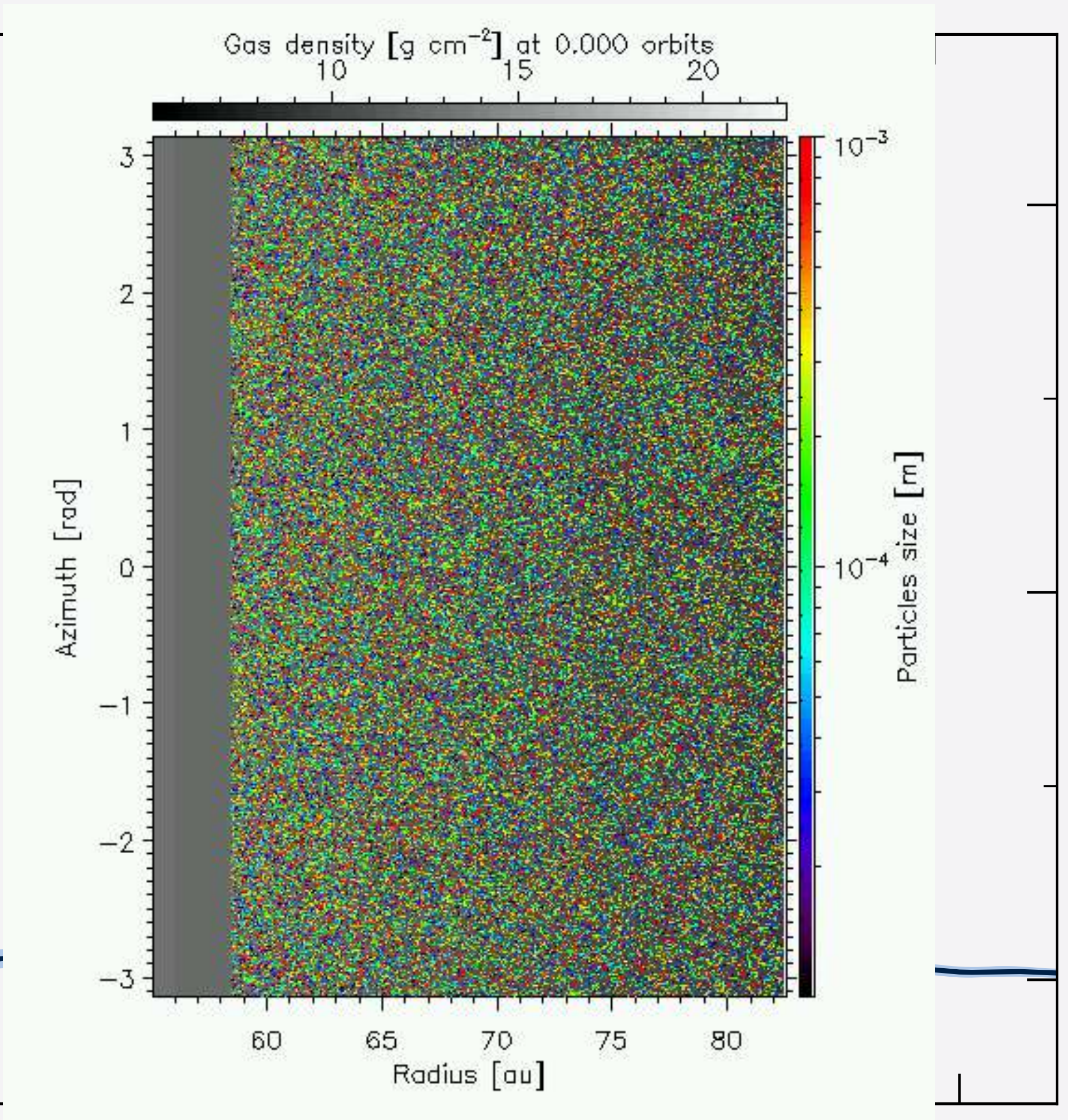
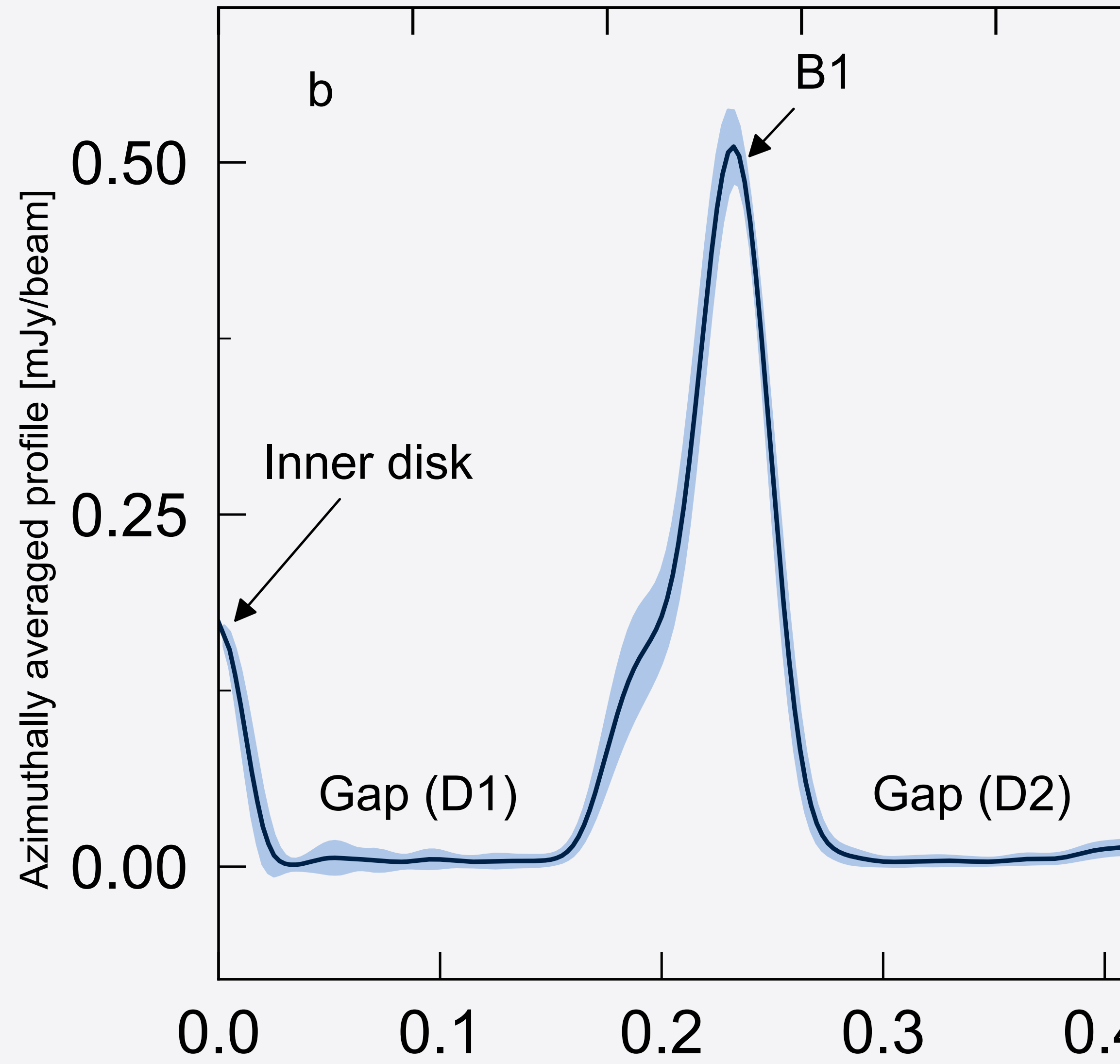


Low viscosity disk:

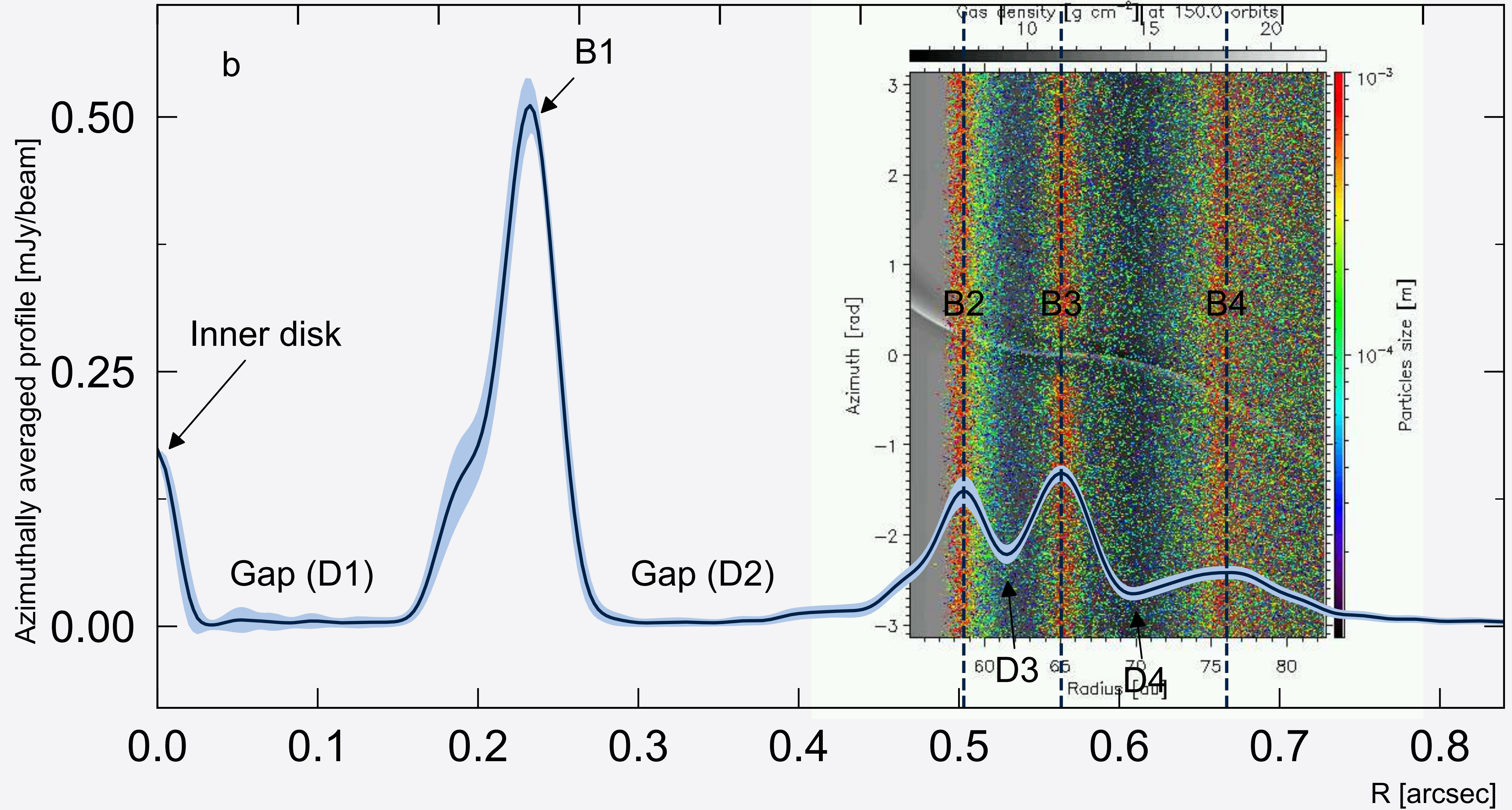
$$\frac{r_{\text{OG1}} - r_{\text{IG1}}}{r_p} \approx 2.9 \left(\frac{\gamma + 1}{12/5} \frac{M_p}{M_{\text{th}}} \right)^{-2/5} \left(\frac{h}{r} \right)$$

Also: dependence on choice of EOS
(Miranda & Rafikov 2019)

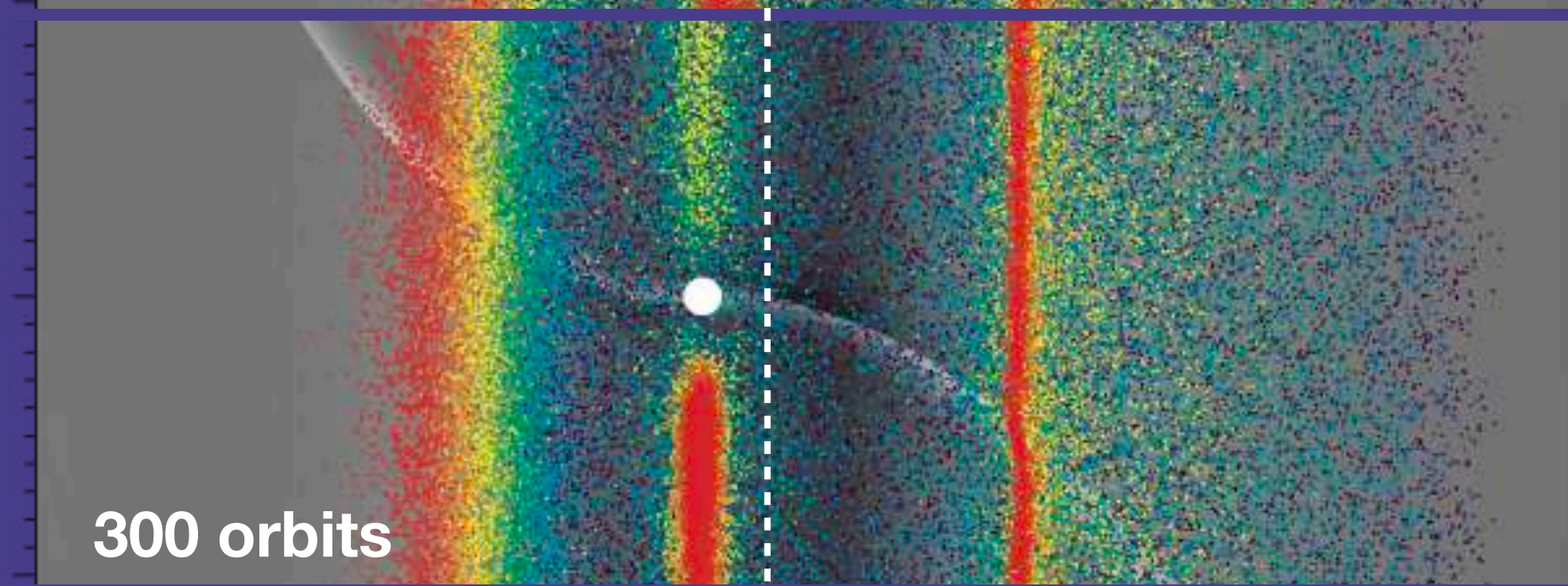
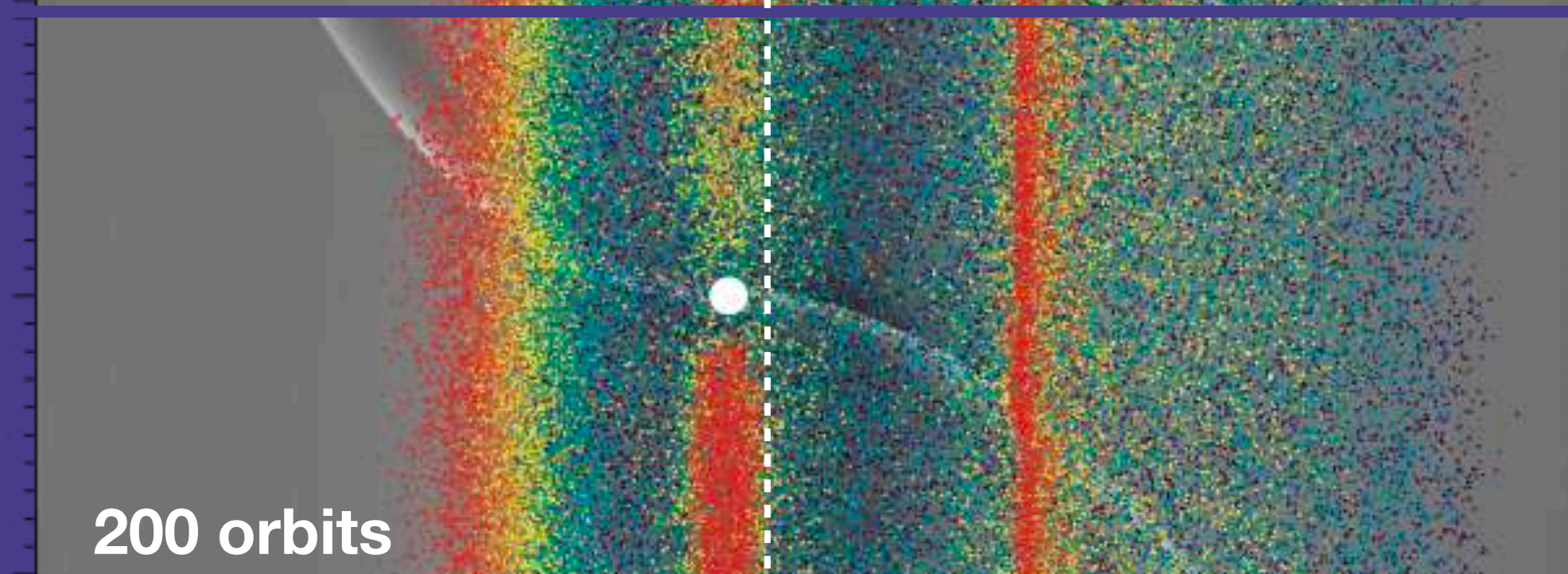
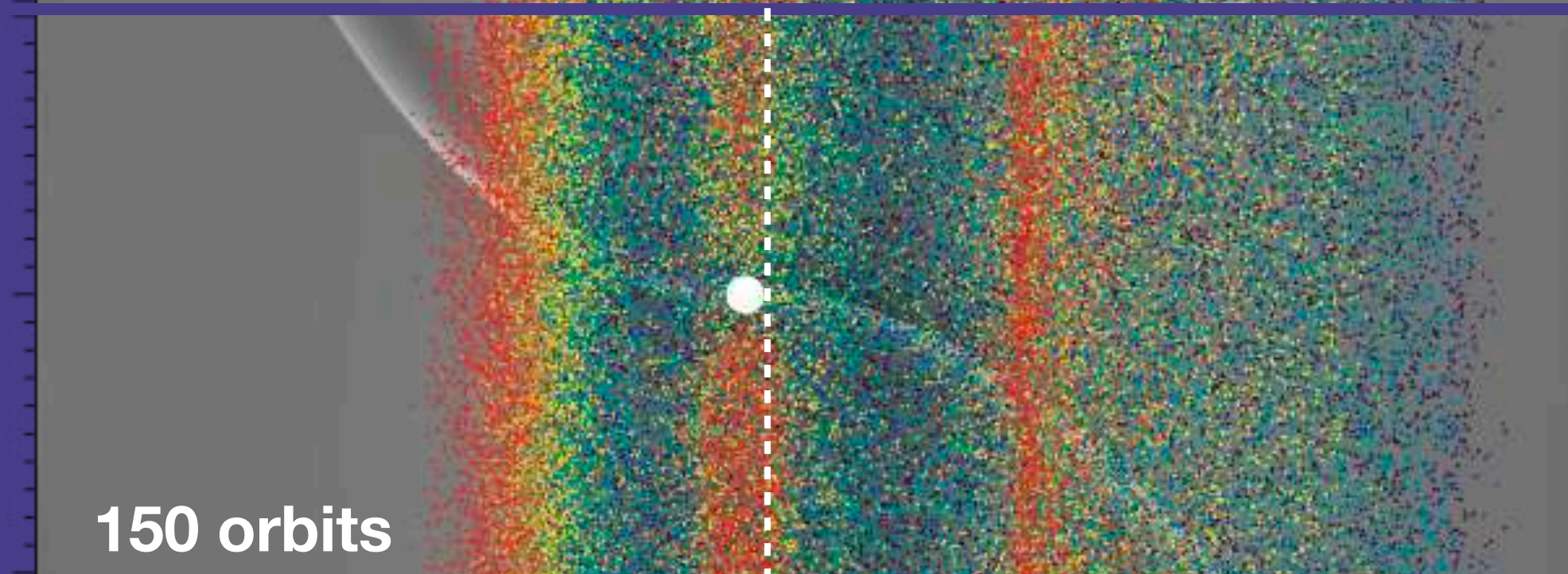
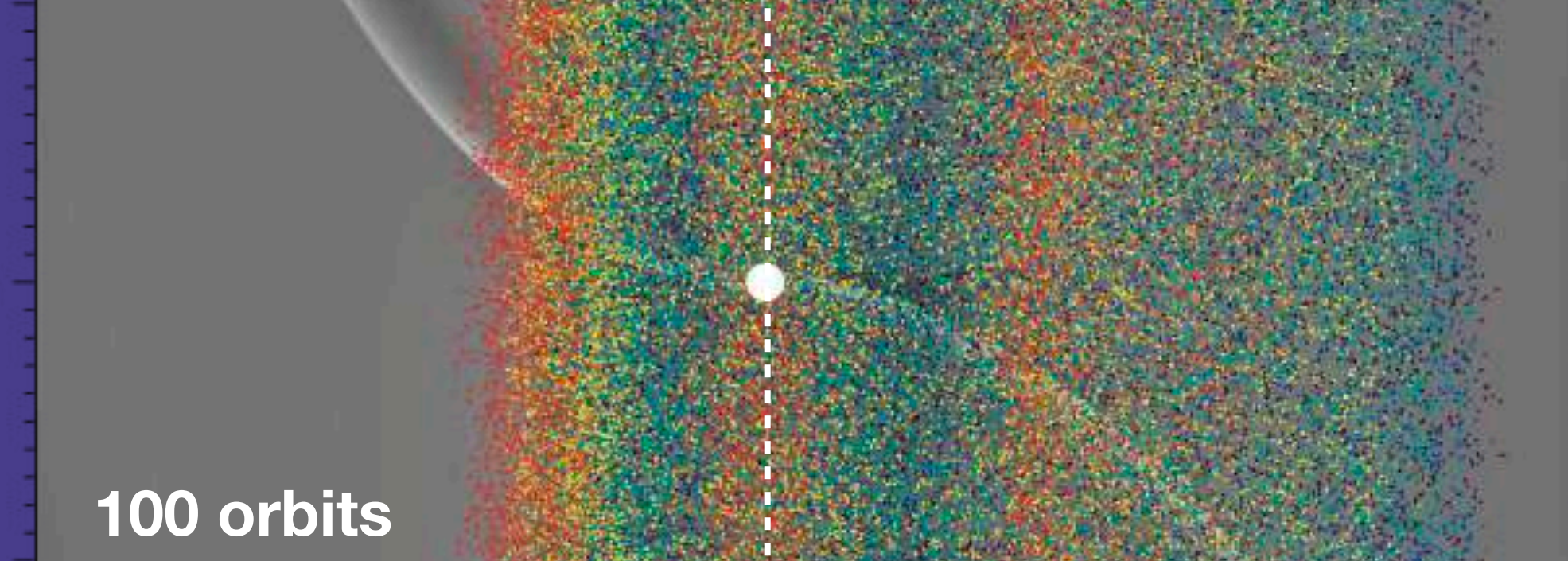
Dusty FARGO2D-ADSG simulation w/ Lagrangian particles (C. Baruteau's code)



Dusty FARGO2D-ADSG simulation w/ Lagrangian particles (C. Baruteau's code)



at USACH: working on GPU version of this multi fluid code



Locations of the rings (mutual separations) suggest the **planet is migrating**

~1 au / 10k years