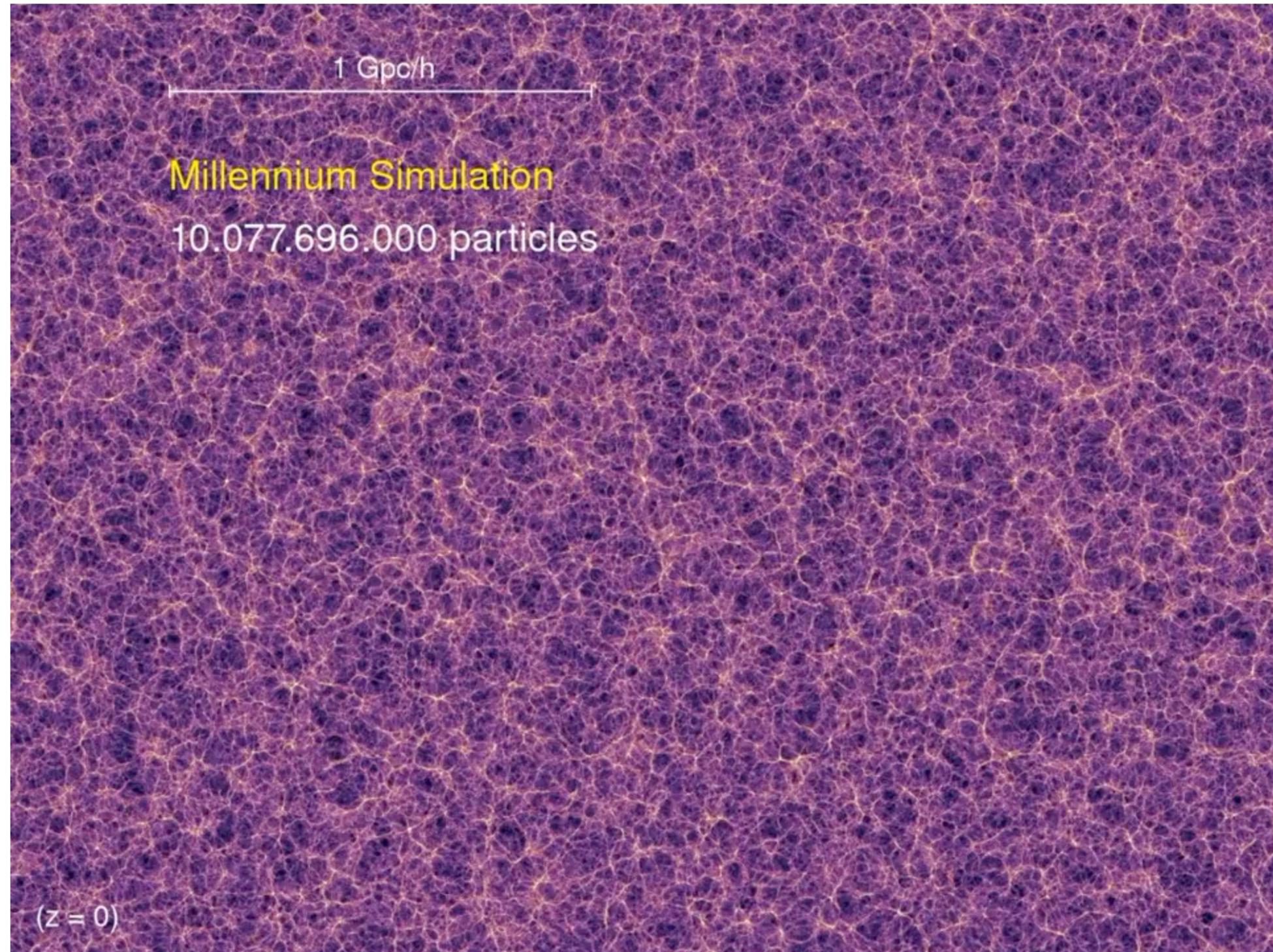


FARGO3D - Simulaciones hidrodinámicas



# Ejemplos

Formación de estructuras  
en el universo



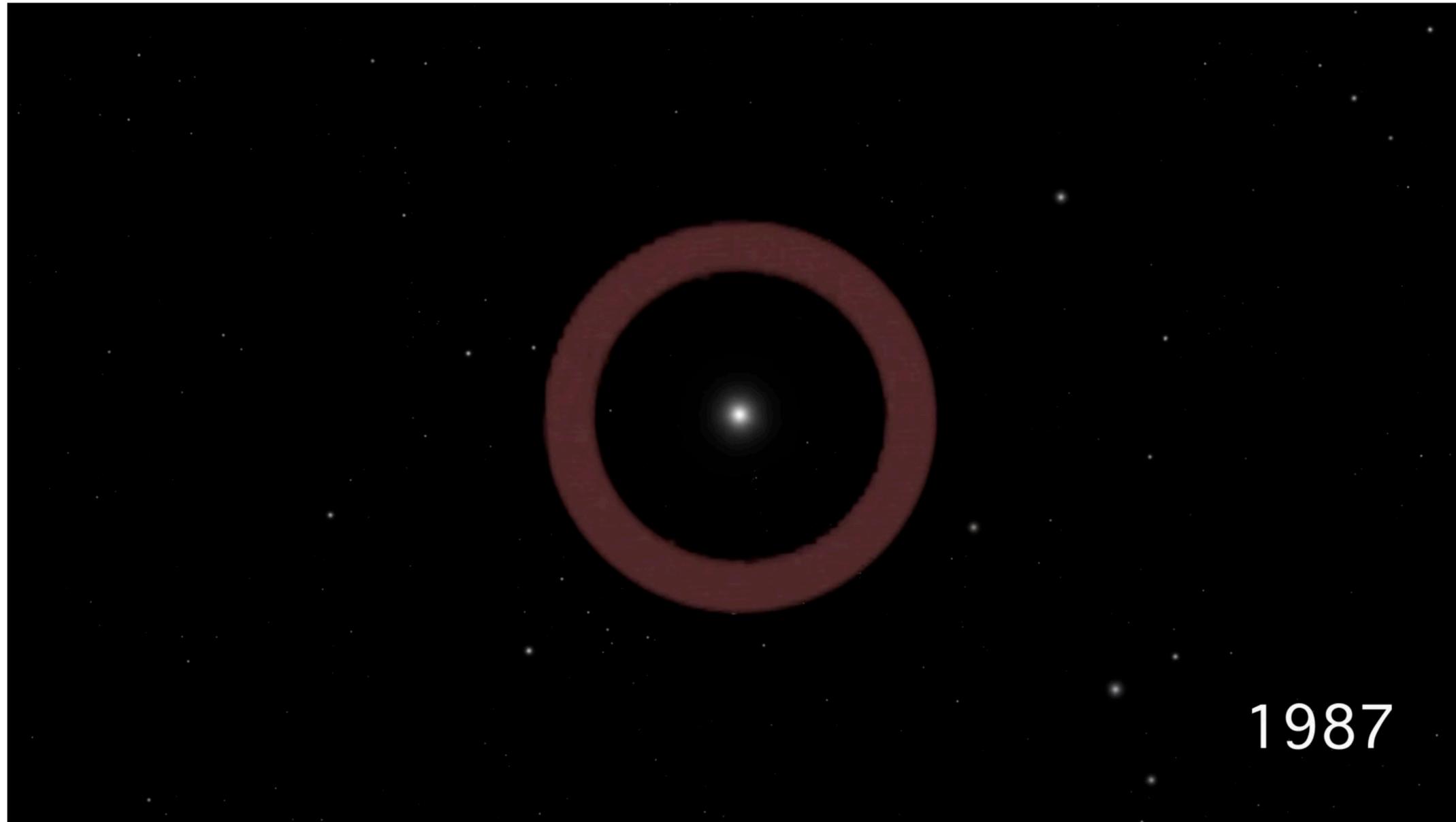
# Ejemplos

## Formación de estrellas



# Ejemplos

Supernova 1987A



# Hidrodinámica en el espacio

## Conservación de masa

$$\partial_t \rho + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v}) = 0$$

## Conservación del momento

$$\partial_t \vec{v} + (\vec{v} \cdot \vec{\nabla}) \vec{v} = -\frac{1}{\rho} \vec{\nabla} P - \vec{\nabla} \phi + \dots$$

## Conservación de energía

$$\partial_t e + \vec{\nabla} \cdot (e \vec{v}) = -P \vec{\nabla} \cdot \vec{v} + \dots$$

# Hidrodinámica en el espacio

Conservación de masa

$$\partial_t \rho + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v}) = 0$$

Conservación del momento

$$\partial_t \vec{v} + (\vec{v} \cdot \vec{\nabla}) \vec{v} = -\frac{1}{\rho} \vec{\nabla} P - \vec{\nabla} \phi + \dots$$

Conservación de energía

$$\partial_t e + \vec{\nabla} \cdot (e \vec{v}) = -P \vec{\nabla} \cdot \vec{v} + \dots$$

¿Por qué es tan complicado resolver estas ecuaciones analíticamente?

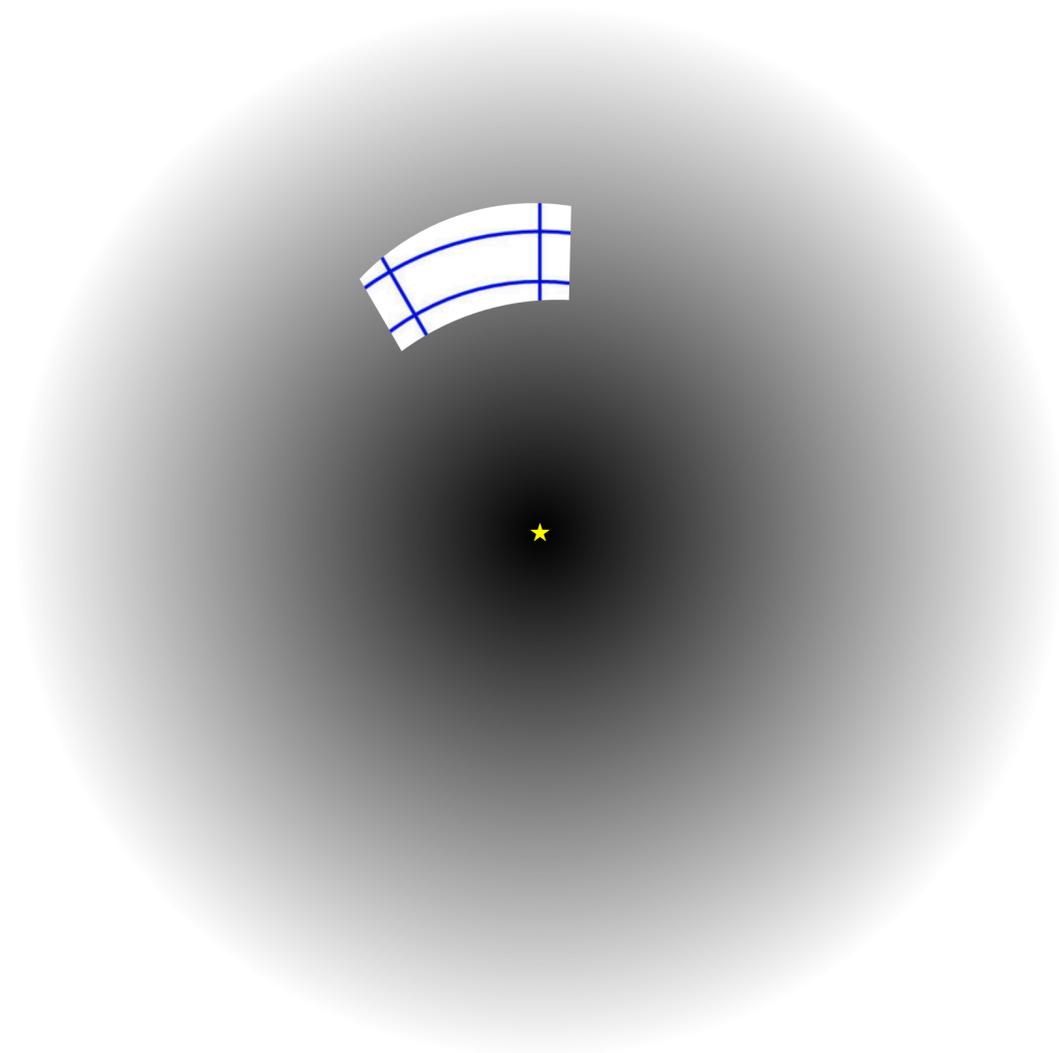
1. Son no lineales
2. Hay muchas variables interdependientes

$$\partial_t \rho + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v}) = 0$$

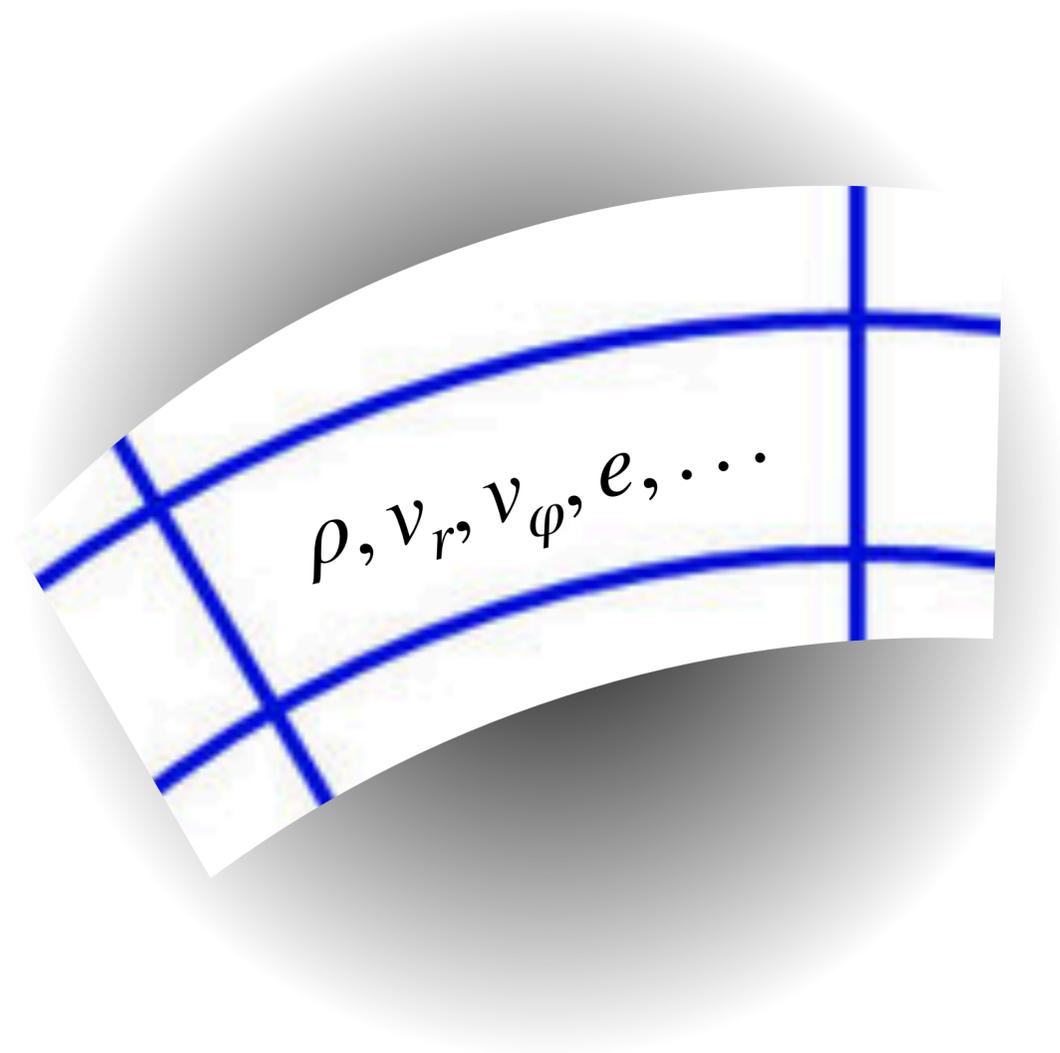
$$\partial_t \vec{v} + (\vec{v} \cdot \vec{\nabla}) \vec{v} = -\frac{1}{\rho} \vec{\nabla} P - \vec{\nabla} \phi$$

$$\partial_t e + \vec{\nabla} \cdot (e \vec{v}) = -P \vec{\nabla} \cdot \vec{v}$$

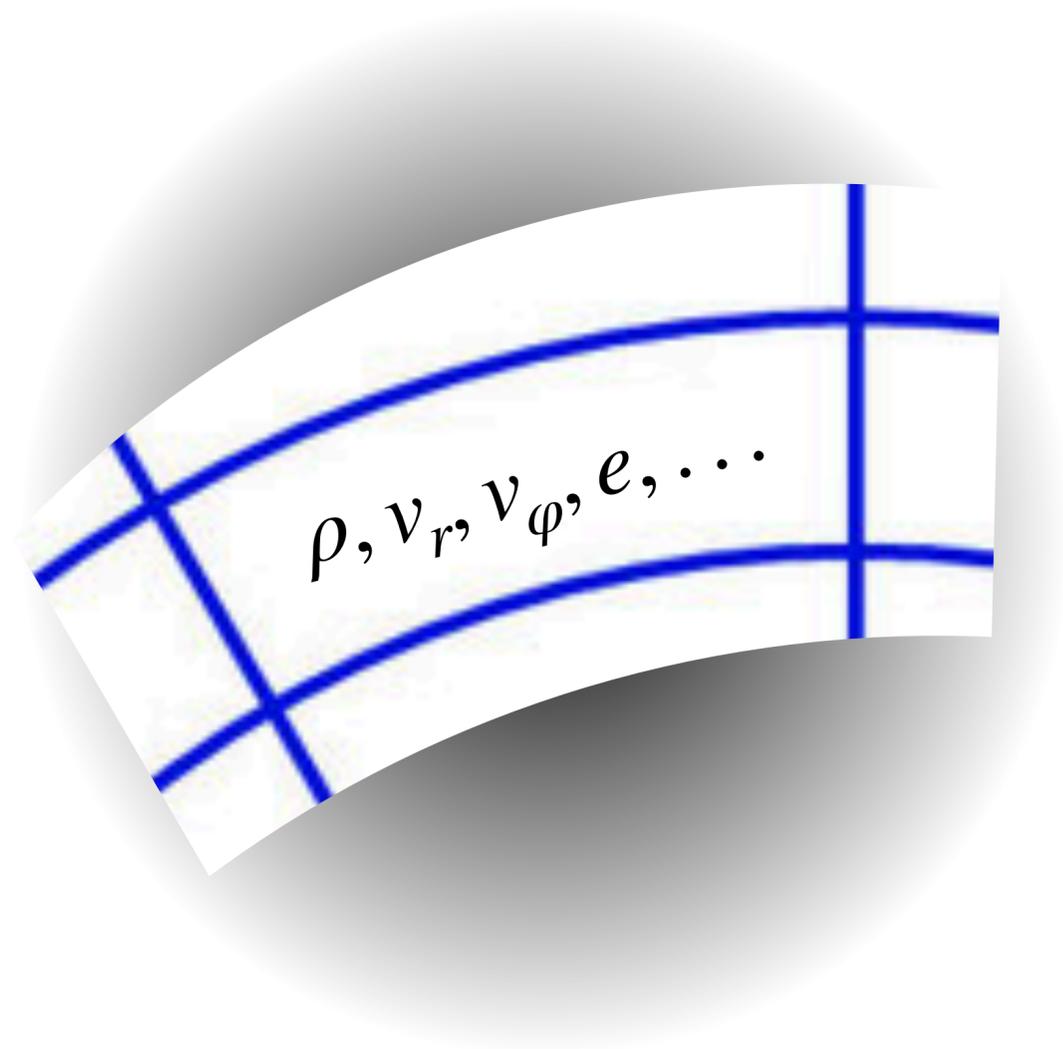
Contínuo  $\rightarrow$  Discretizar



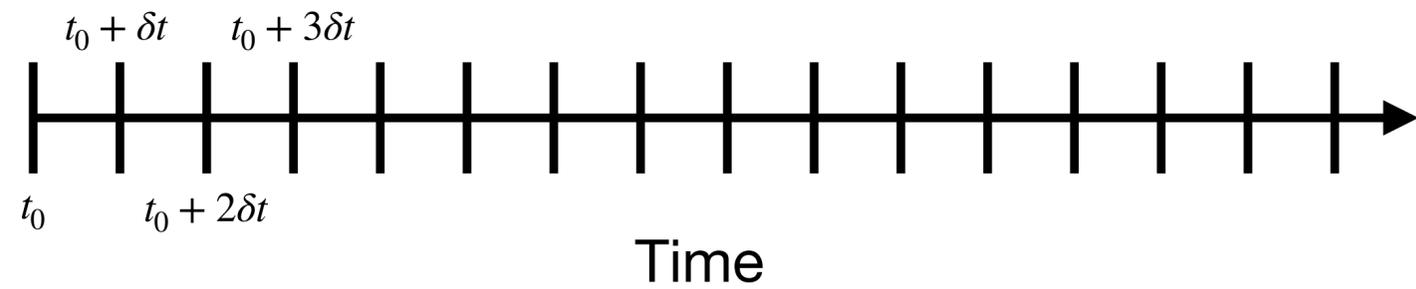
Continuo  $\rightarrow$  Discretizar



Continuo  $\rightarrow$  Discretizar



El mismo temporal:



En cada paso de tiempo tenemos que actualizar las cantidades en cada celda

Entonces, que pasa con las ecuaciones?

Continuo

$$\partial_t \rho + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v}) = 0$$

↓

Discreto

$$\frac{\rho_{t+1} - \rho_t}{\delta t} + \frac{(v\rho)_{x+1} - (v\rho)_x}{\delta x} = 0$$

$$\rho_{t+1} = \left( \rho_t - \frac{(v\rho)_{x+1} - (v\rho)_x}{\delta x} \right) \delta t$$

**Como podemos saber que el código hace lo que queremos?**

# Como podemos saber que el código hace lo que queremos?

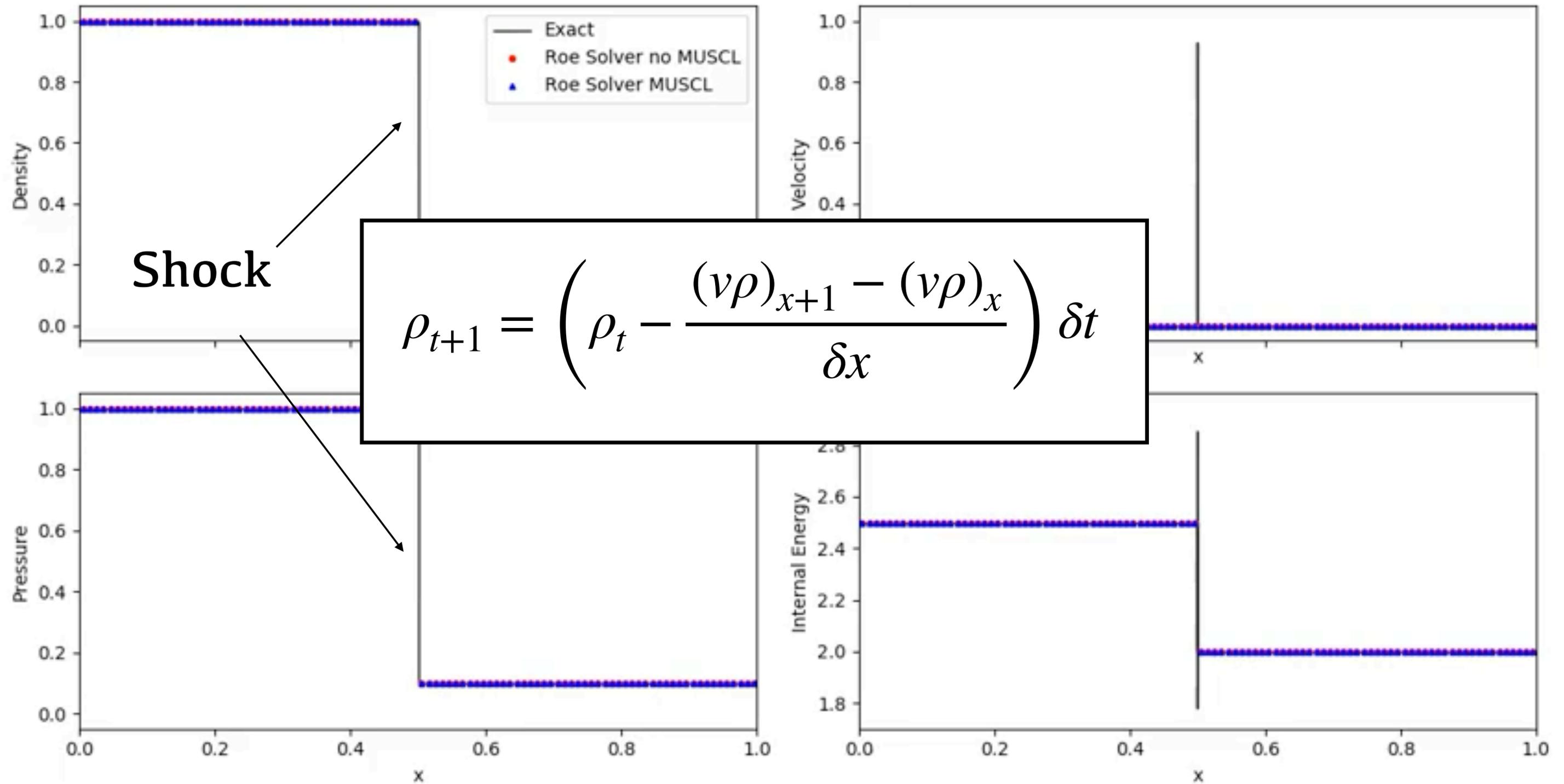
Veamos algunos problemas para los que  
conocemos una solución analítica!

→ “Benchmarking” ~ “Evaluación comparativa”

# Test: Analytical vs Numerical

# “Benchmarking” ~ “Evaluación comparativa”

Time = 0.000000

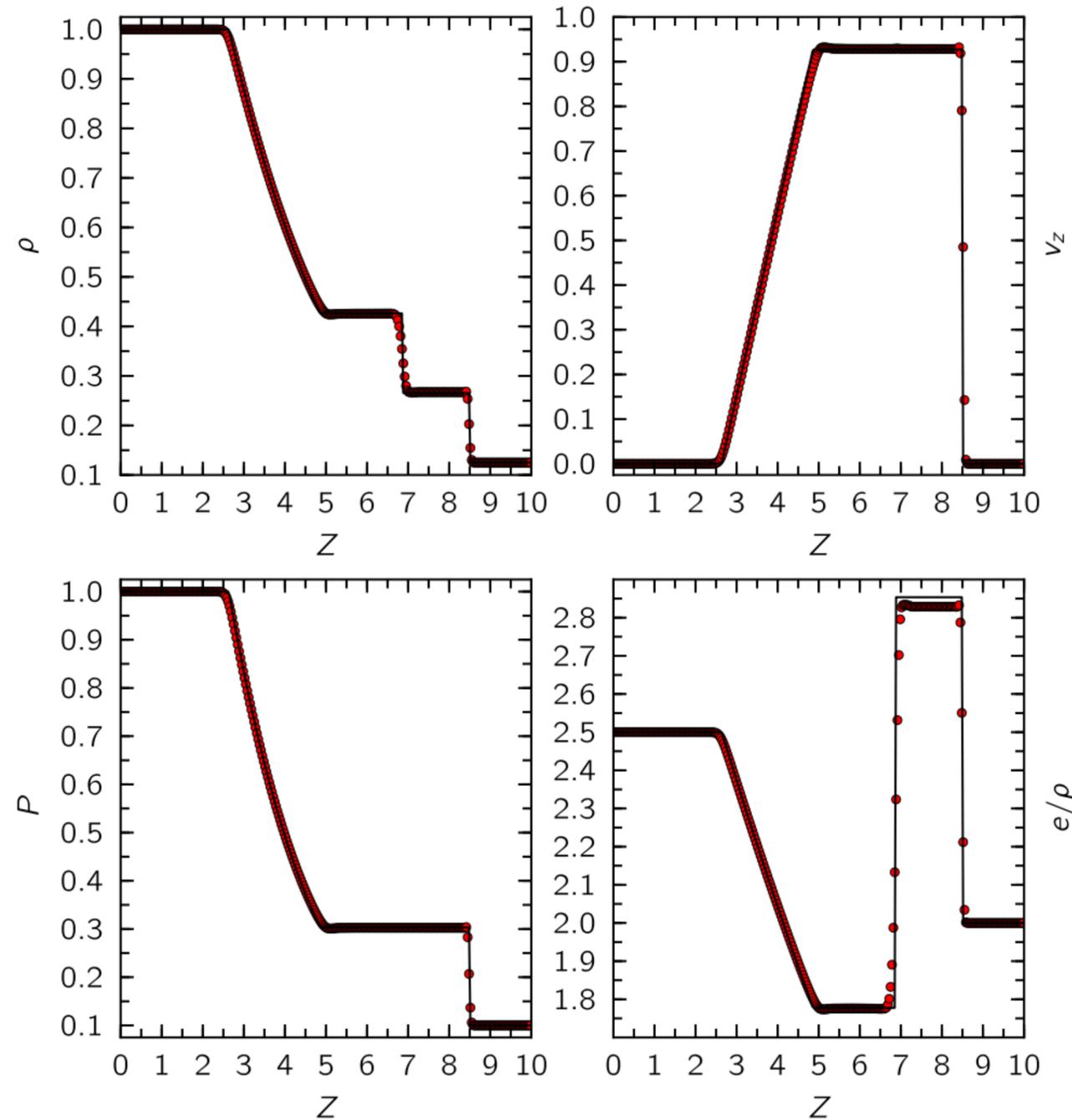


$$\rho_{t+1} = \left( \rho_t - \frac{(v\rho)_{x+1} - (v\rho)_x}{\delta x} \right) \delta t$$

# Test: Analytical vs Numerical

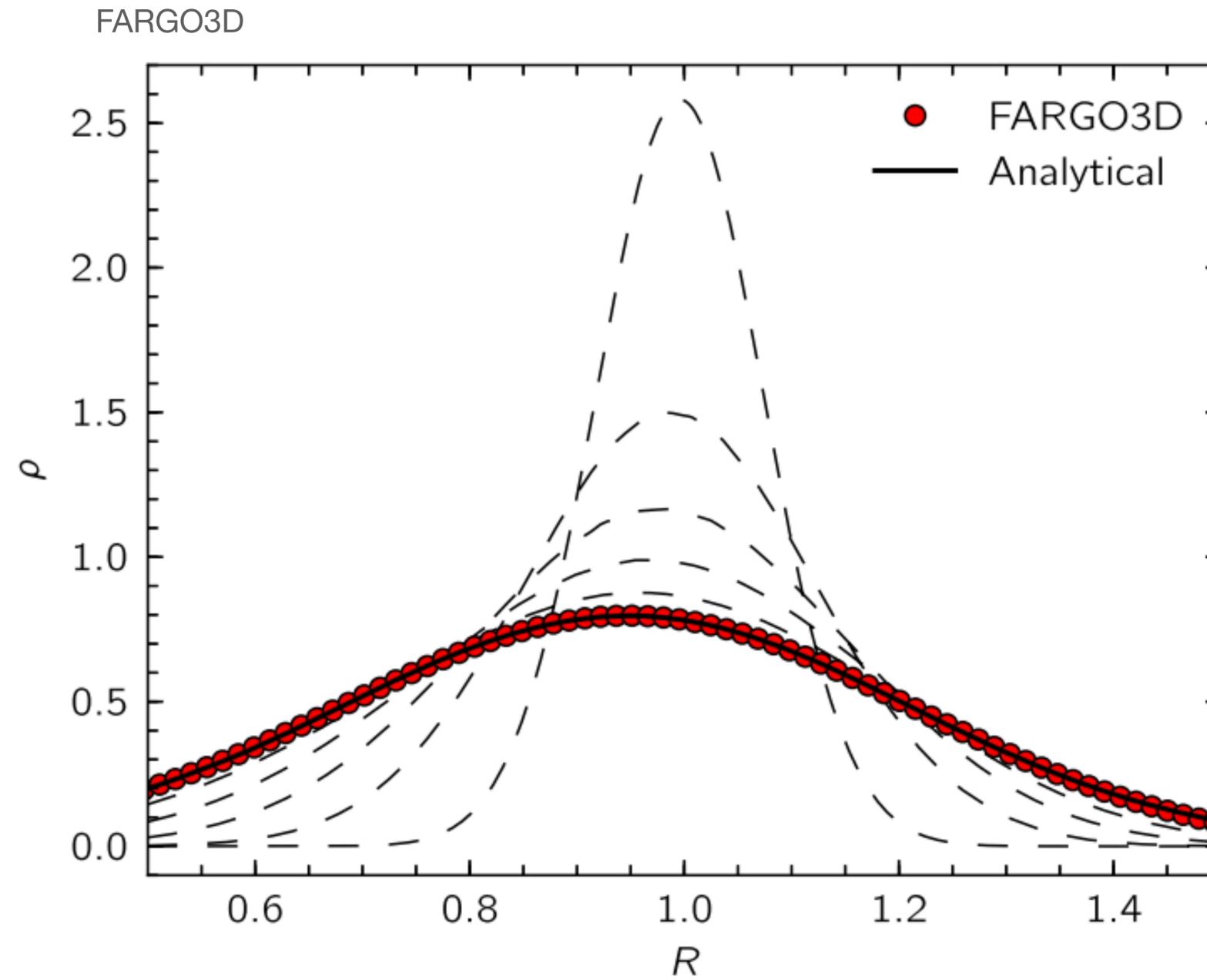
# “Benchmarking” ~ “Evaluación comparativa”

FARGO3D

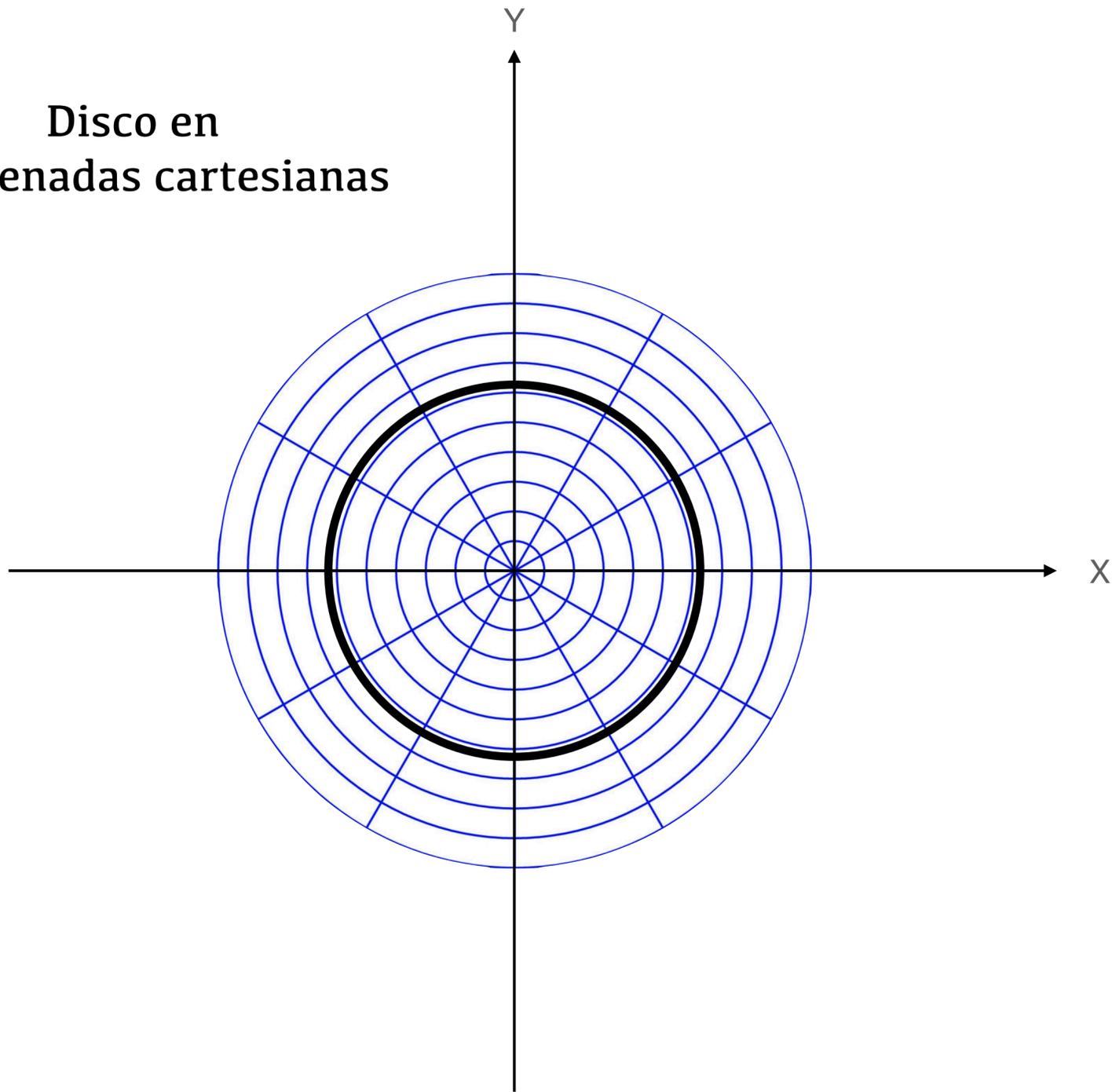


# Test: Analytical vs Numerical

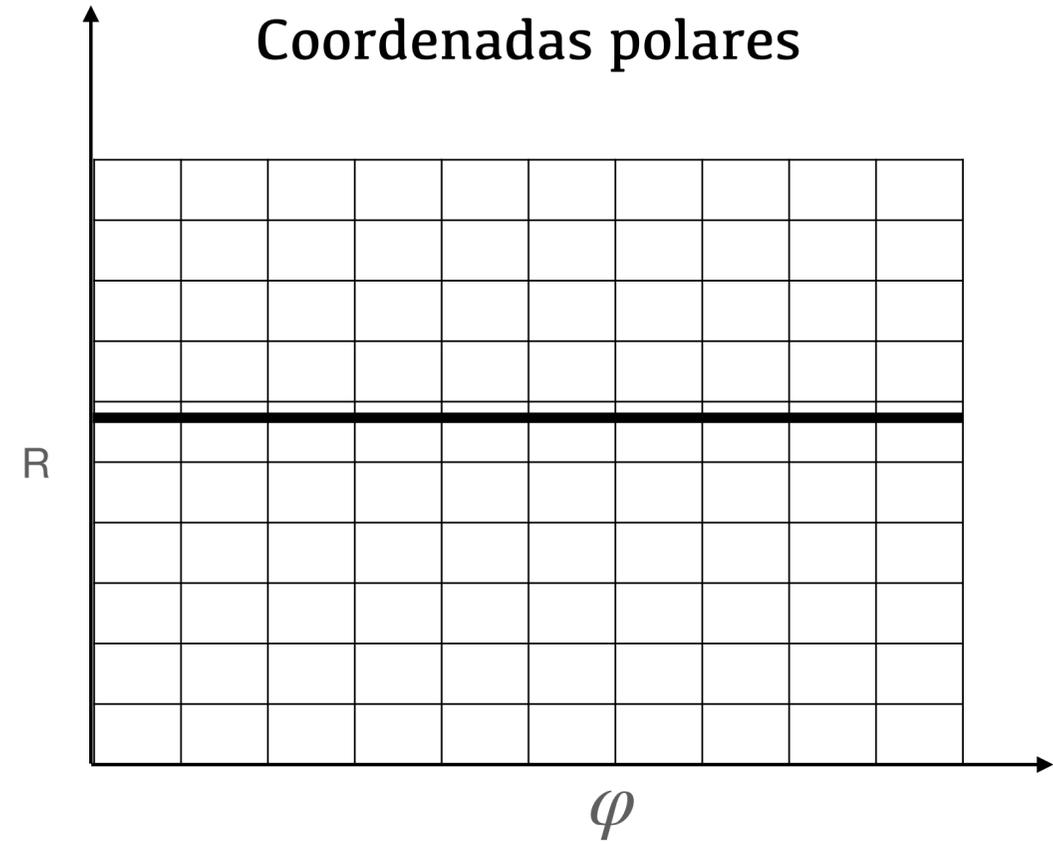
# “Benchmarking” ~ “Evaluación comparativa”



Disco en  
Coordenadas cartesianas

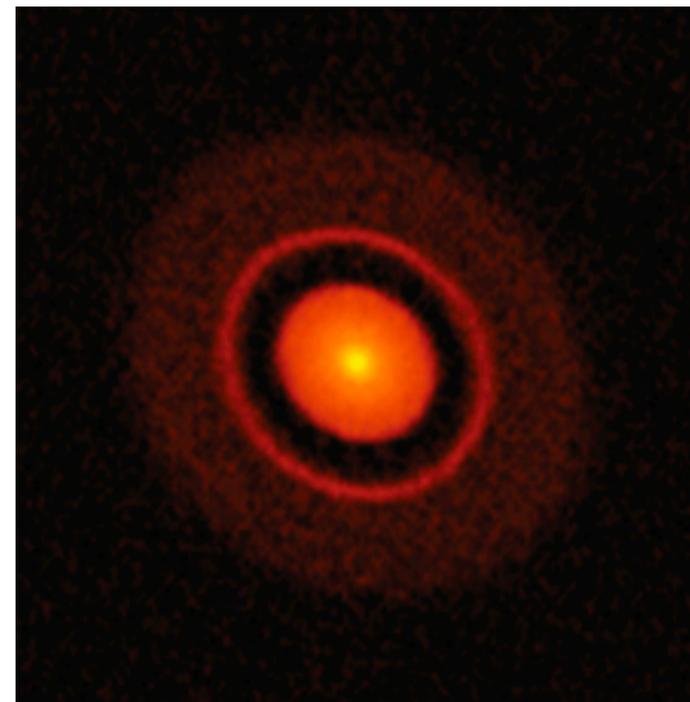
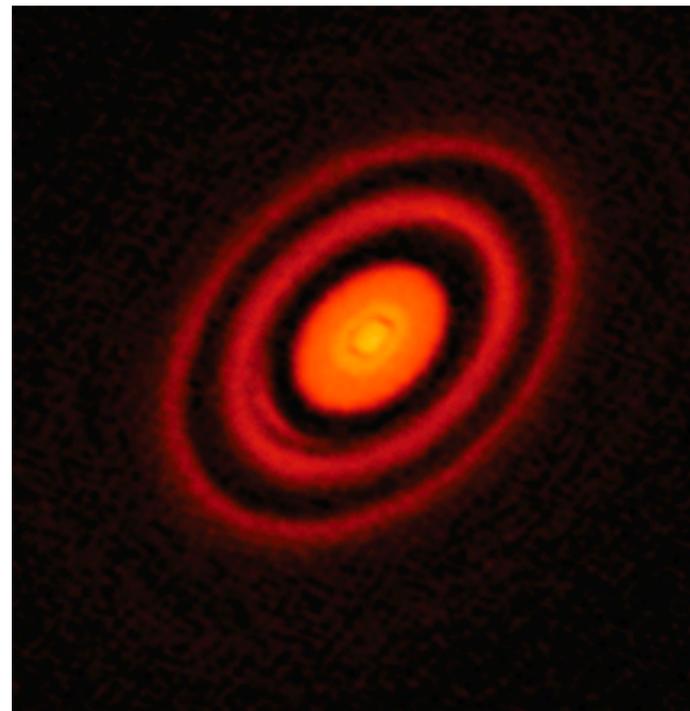
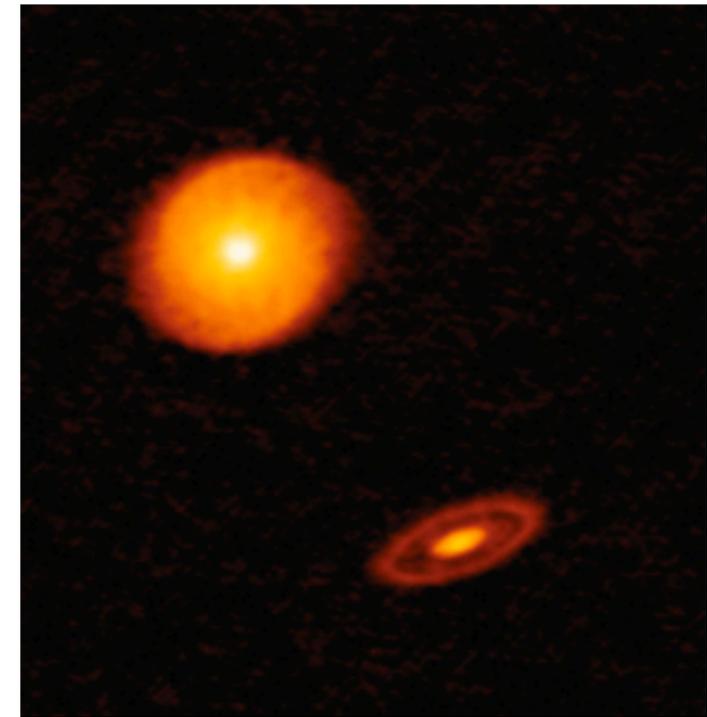
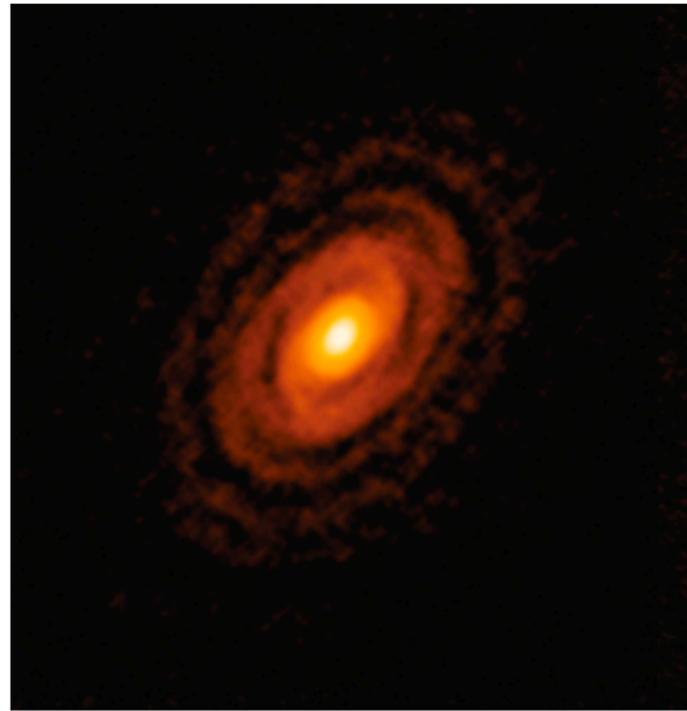
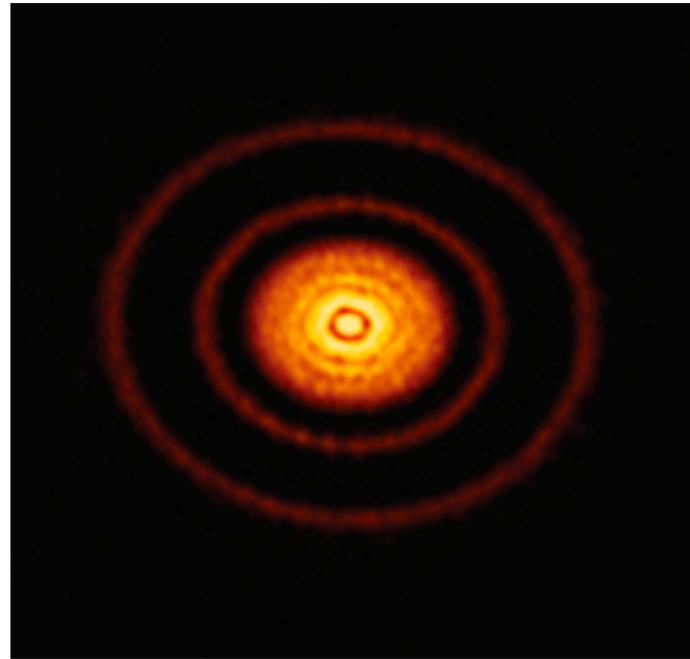


Disco en  
Coordenadas polares

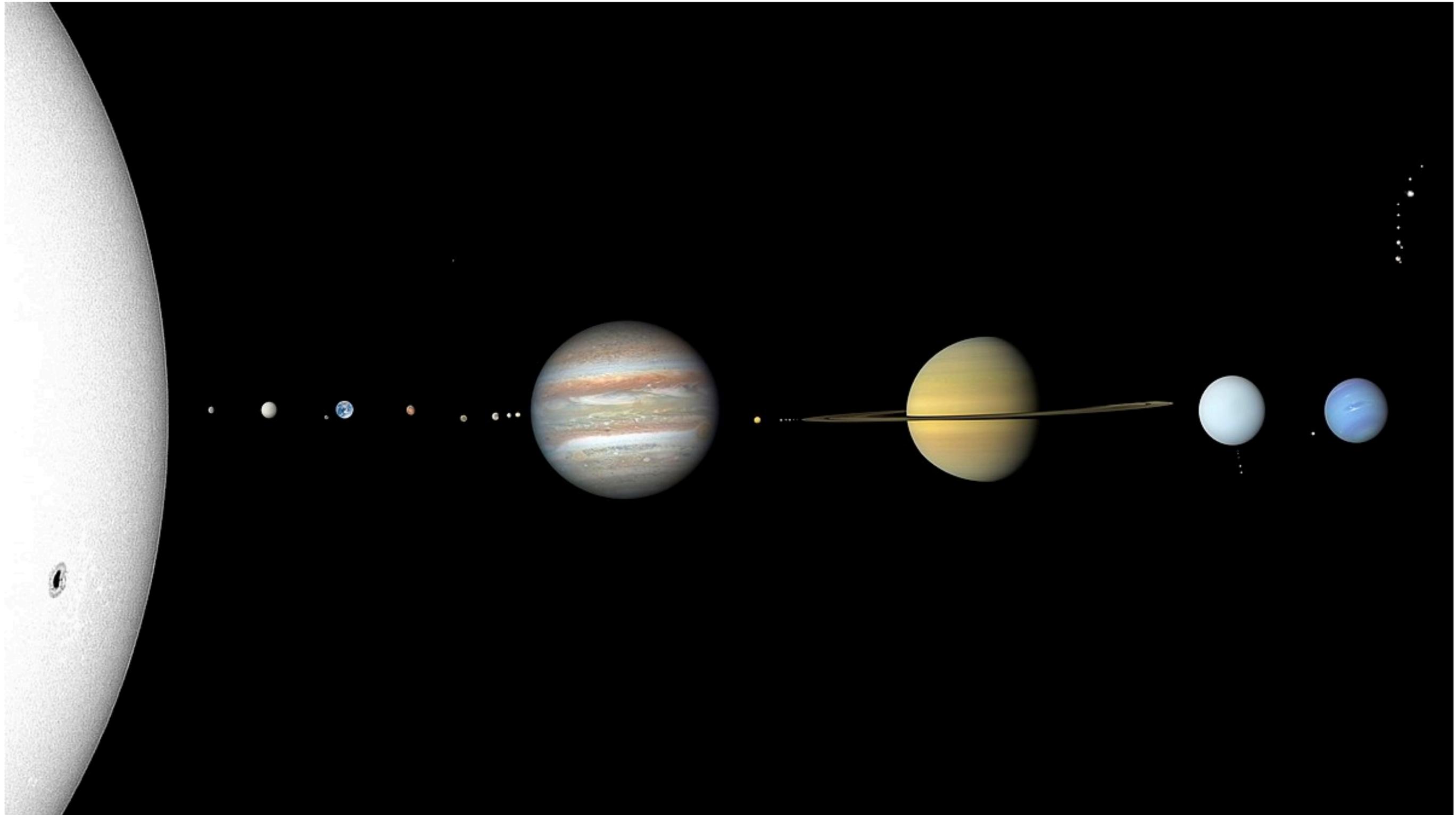


Motivación

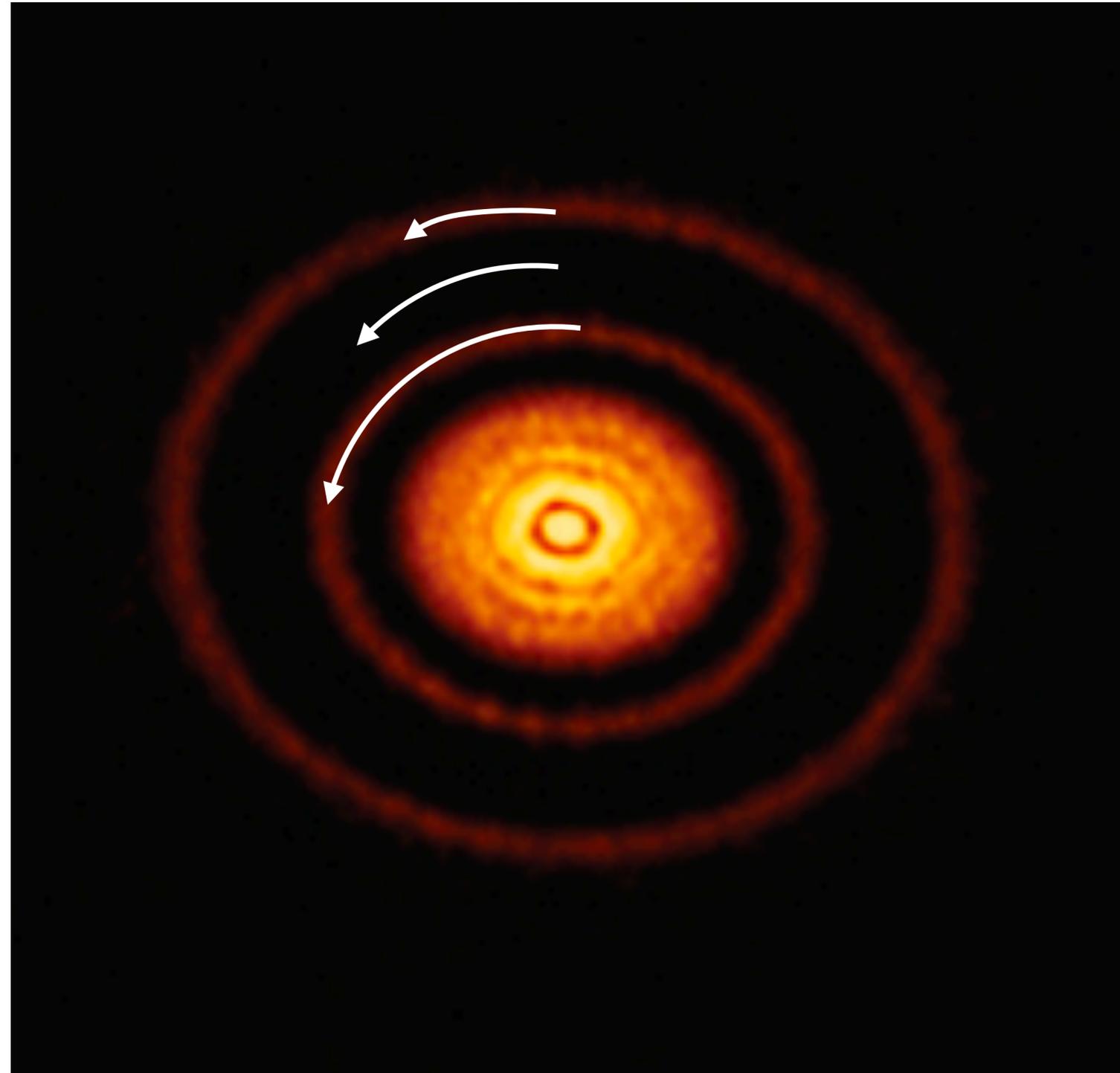
¿Podemos entender que está pasando allá?



Motivación ¿Podemos entender que estaba pasando aquí?



## El disco protoplanetario:

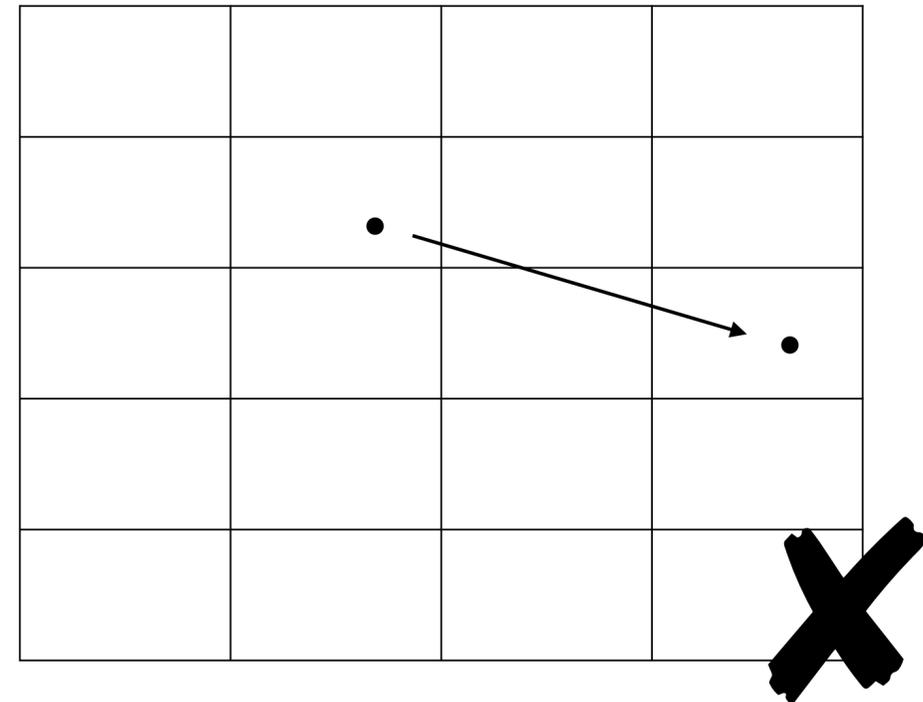
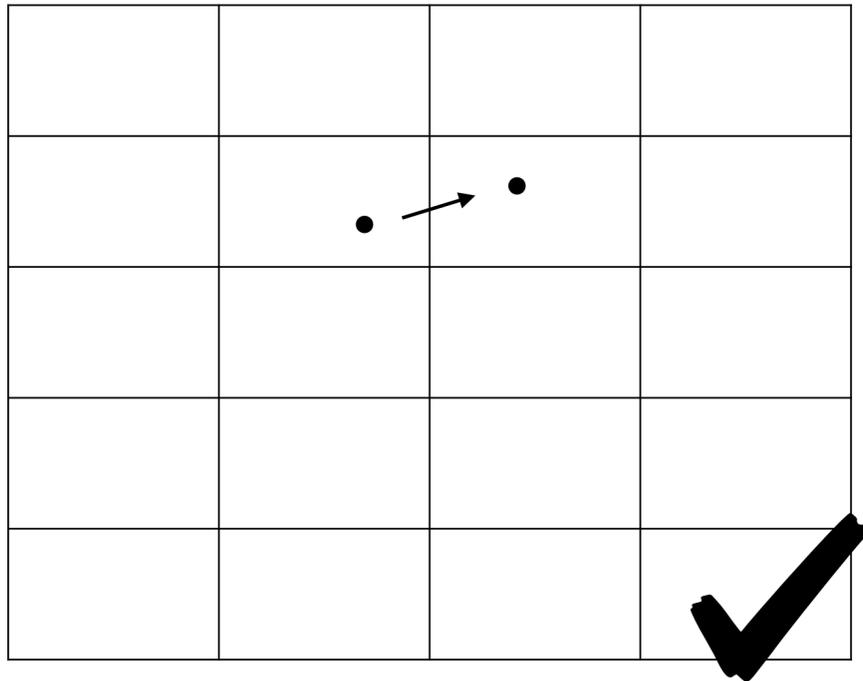


$$v_K = \sqrt{\frac{GM_\star}{r}}$$

## El problema:

Para garantizar la estabilidad y la precisión, el paso temporal no puede ser demasiado grande.

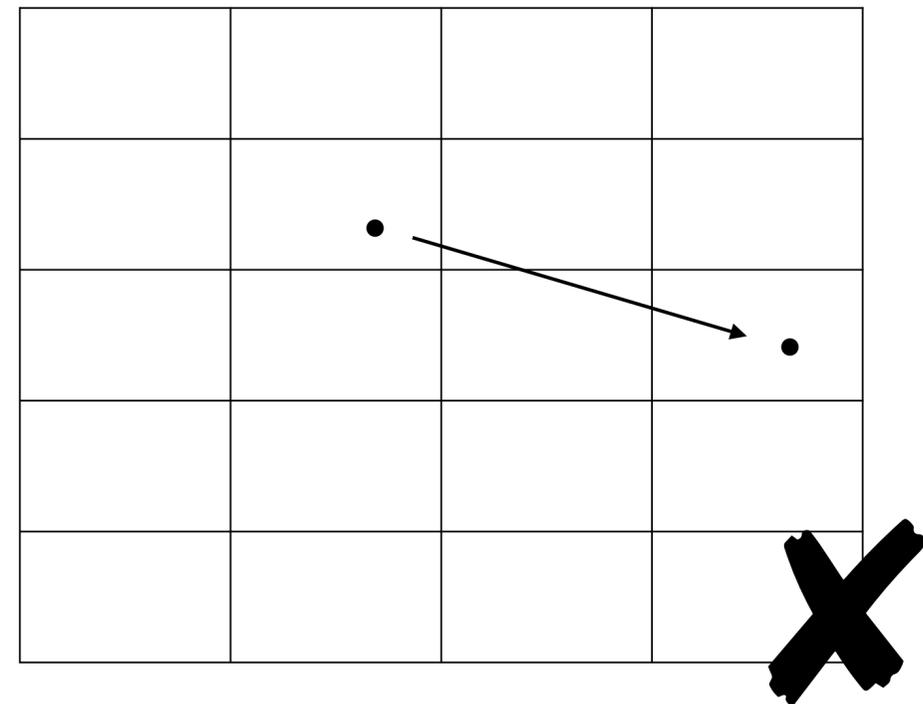
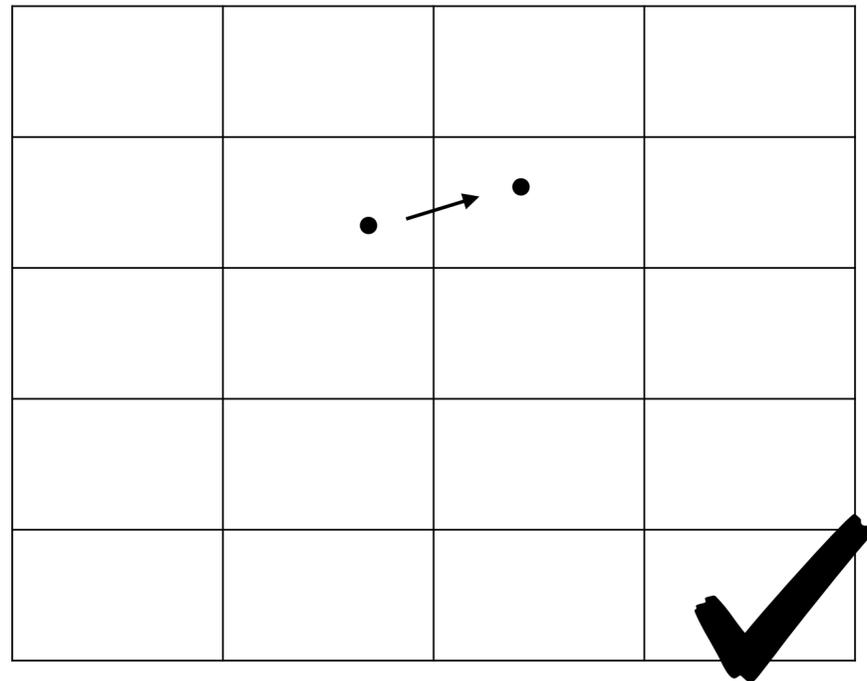
En la práctica, no podemos hacer avanzar el fluido más de una celda.



El problema:

Esto se expresa mediante la condición de Courant:

$$\frac{v\Delta t}{\Delta x} \leq 1$$

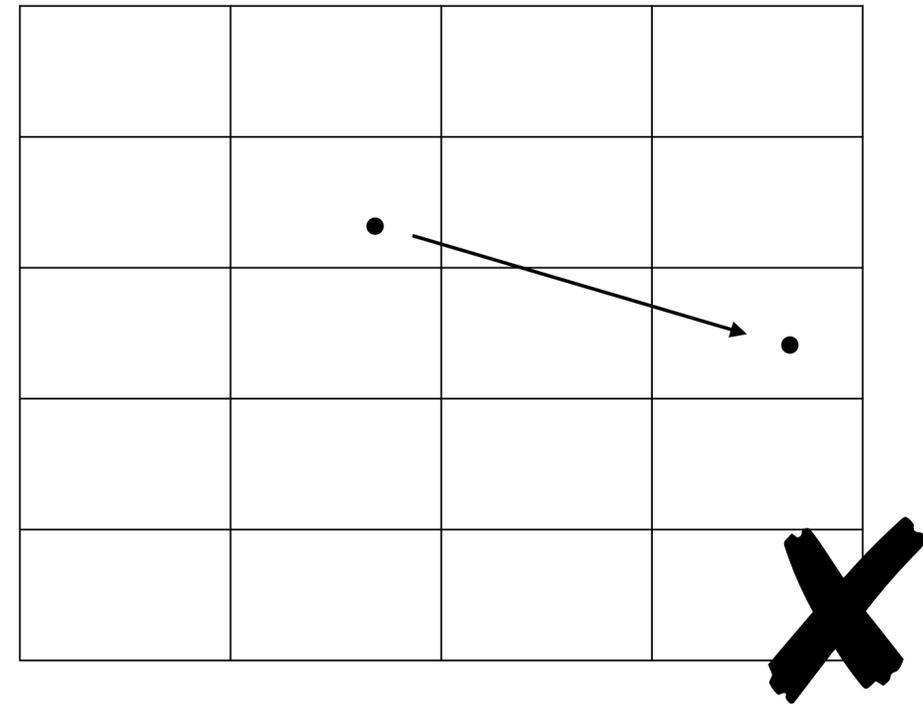
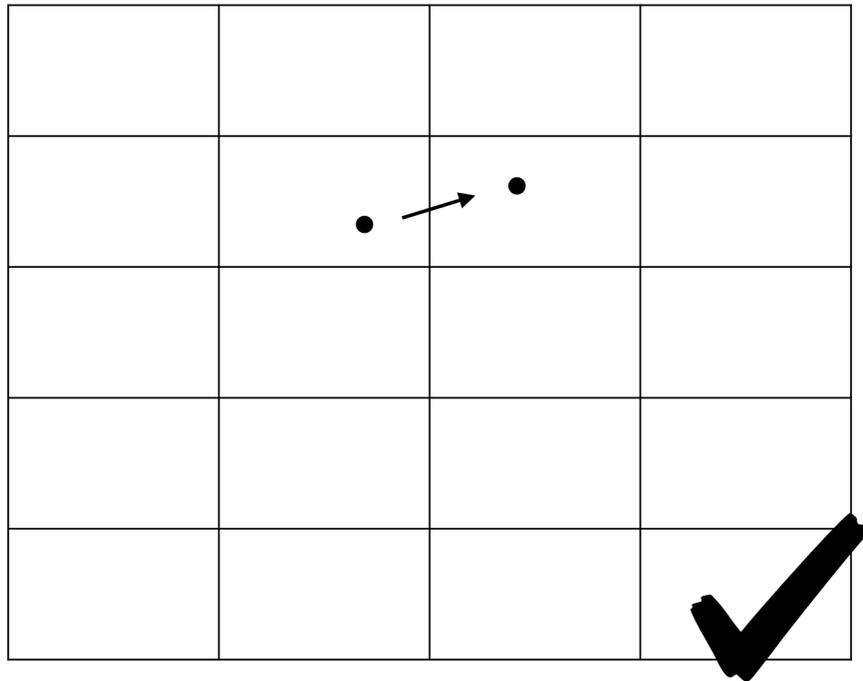


## El problema:

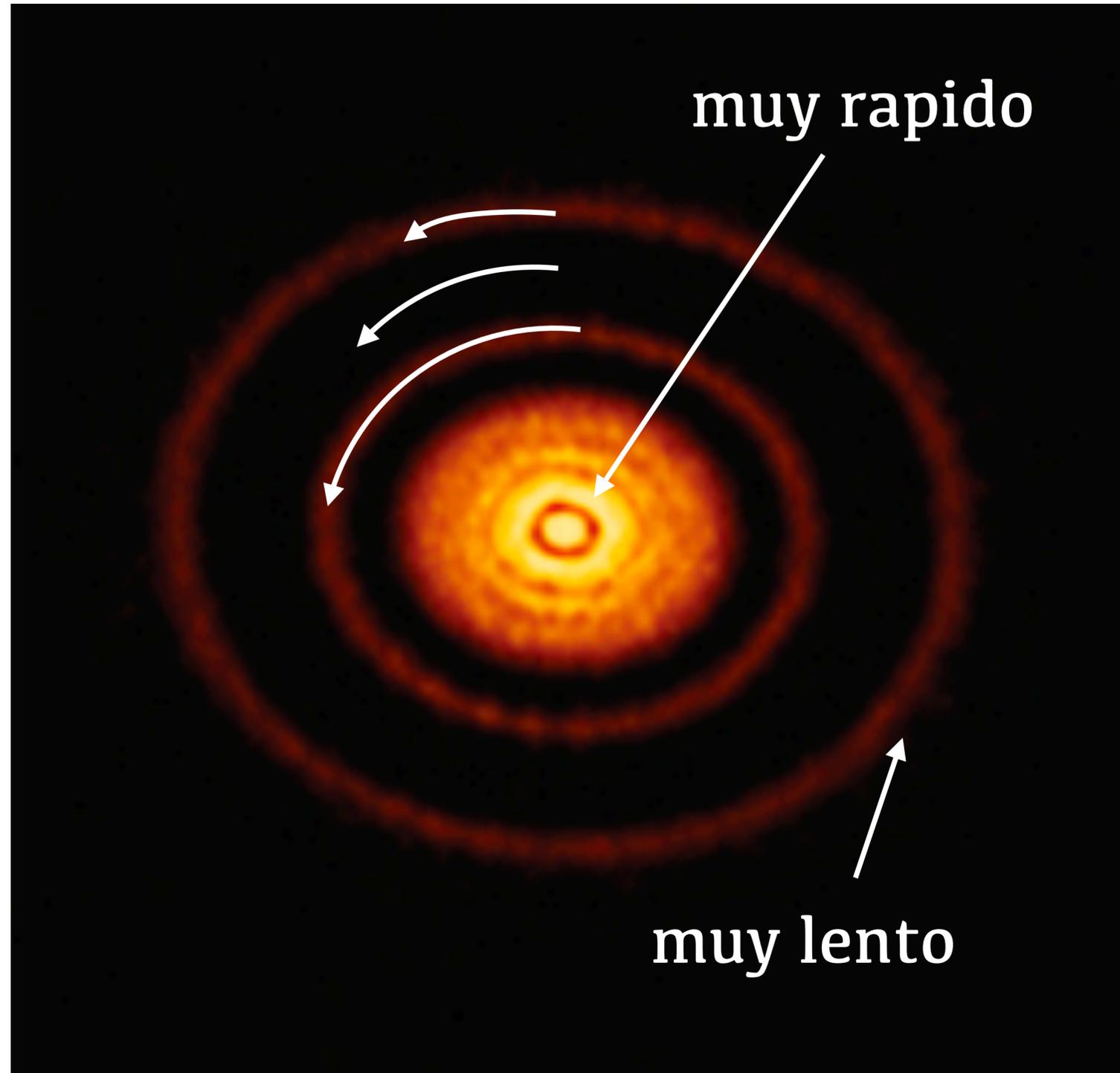
Si el fluido es rápido, el paso de tiempo tiene que ser pequeño

$$\frac{v\Delta t}{\Delta x} \leq 1$$

Esto hace que la simulación sea más lenta 😞



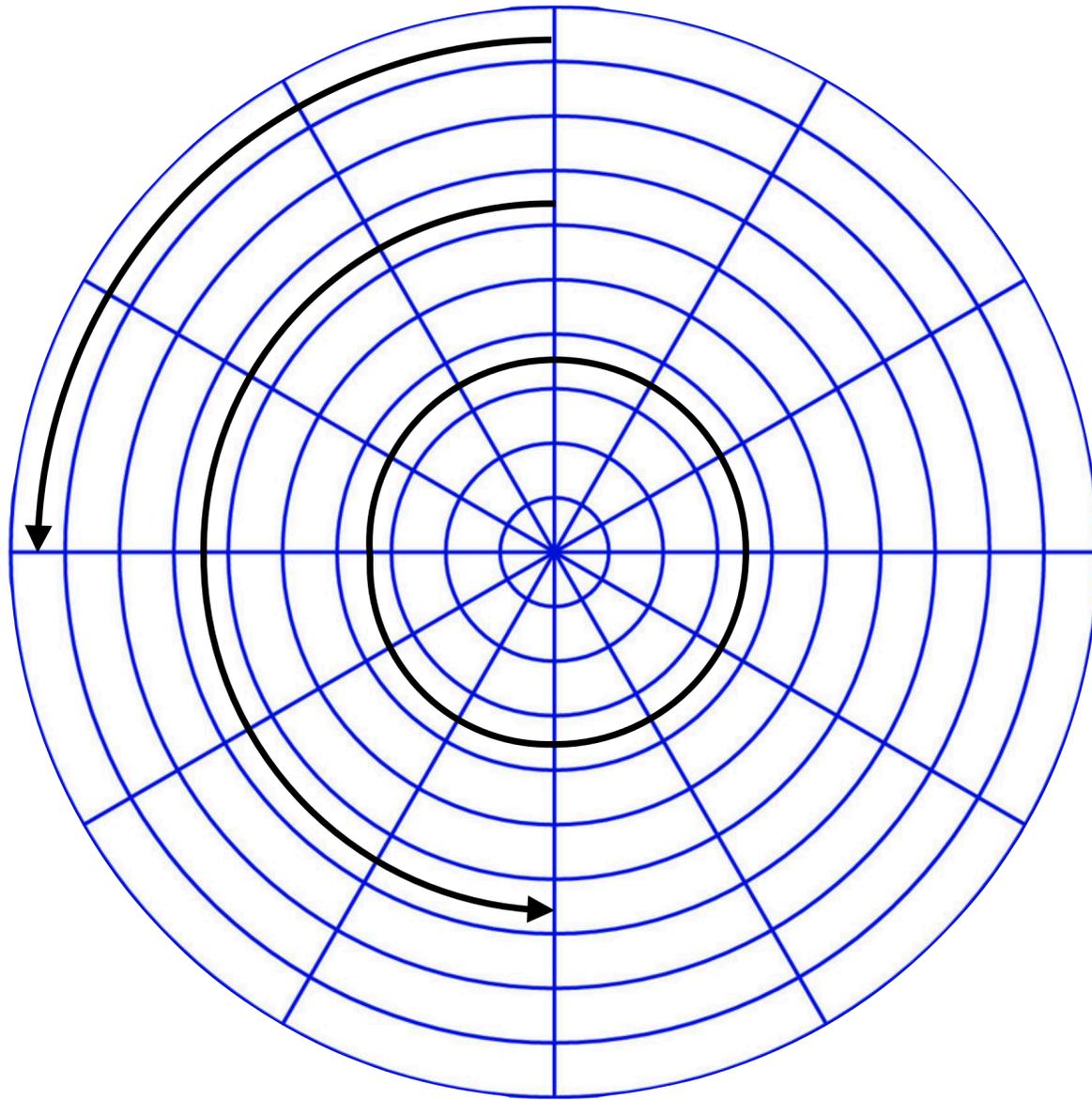
# El disco protoplanetario:



$$v_K = \sqrt{\frac{GM_\star}{r}}$$

# Que significa FARGO3D?

Fast advection in rotating gaseous objects

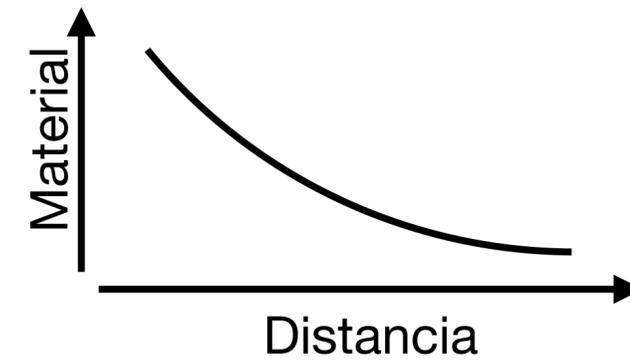
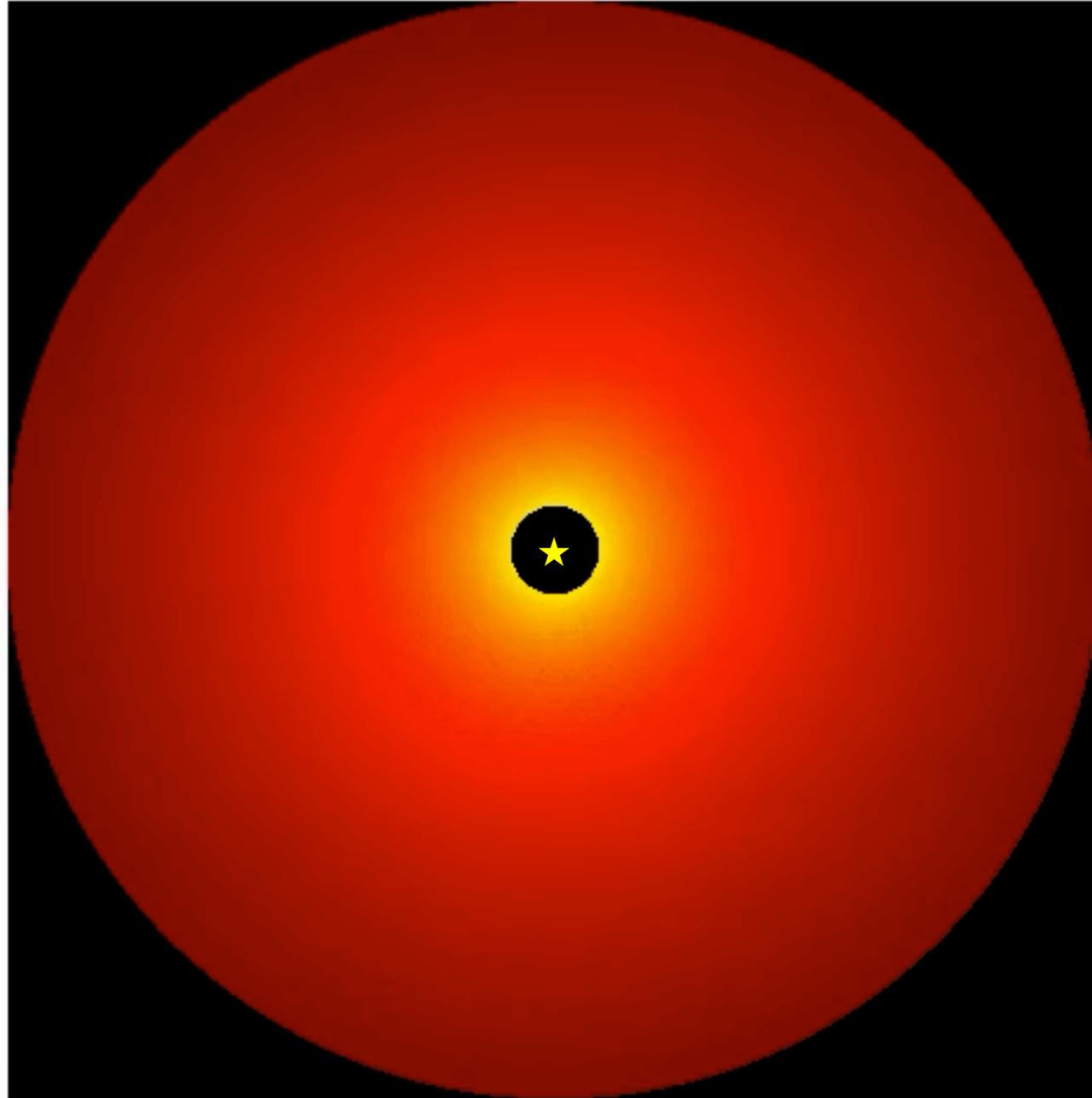


La velocidad cerca de la estrella es mucho mayor que lejos de ella

FARGO elimina esta desigualdad

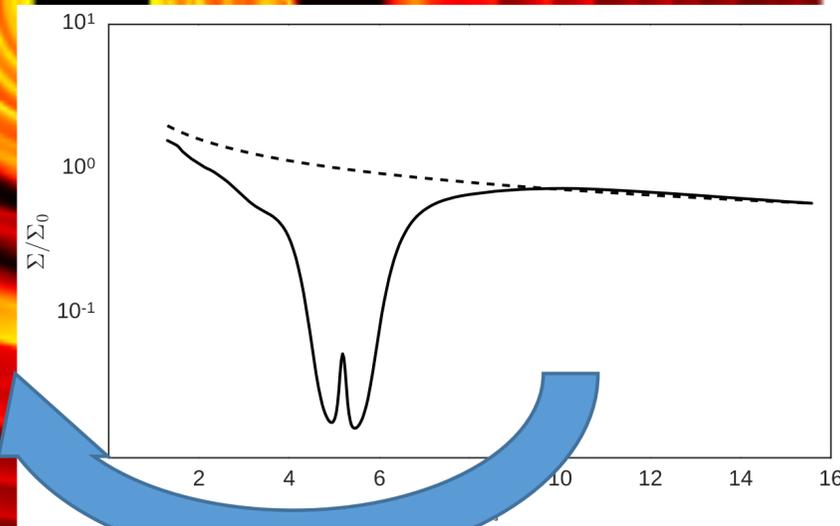
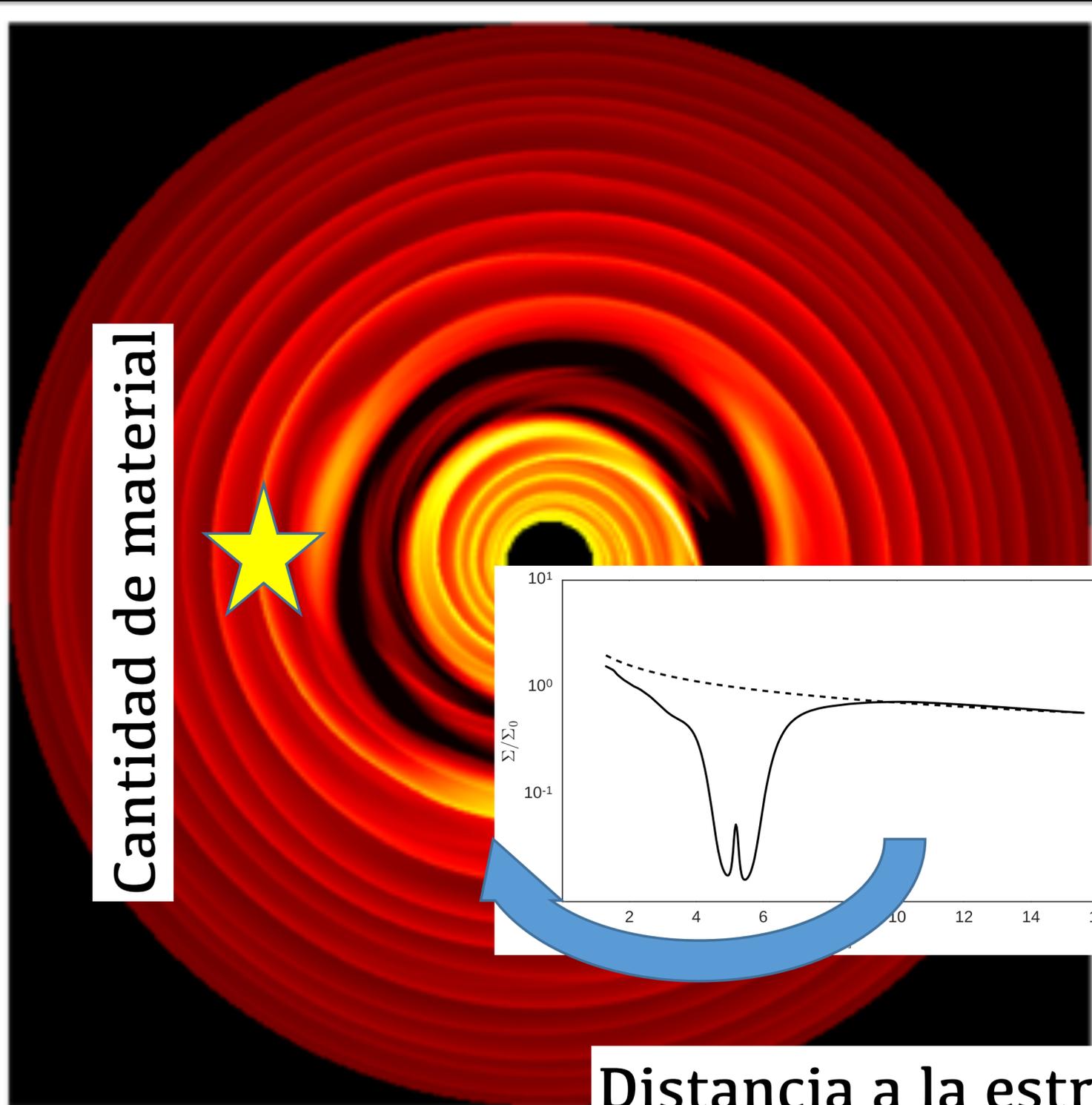
Esto acelera considerablemente la simulación.

Dejate de wear, necesitamos un vídeo



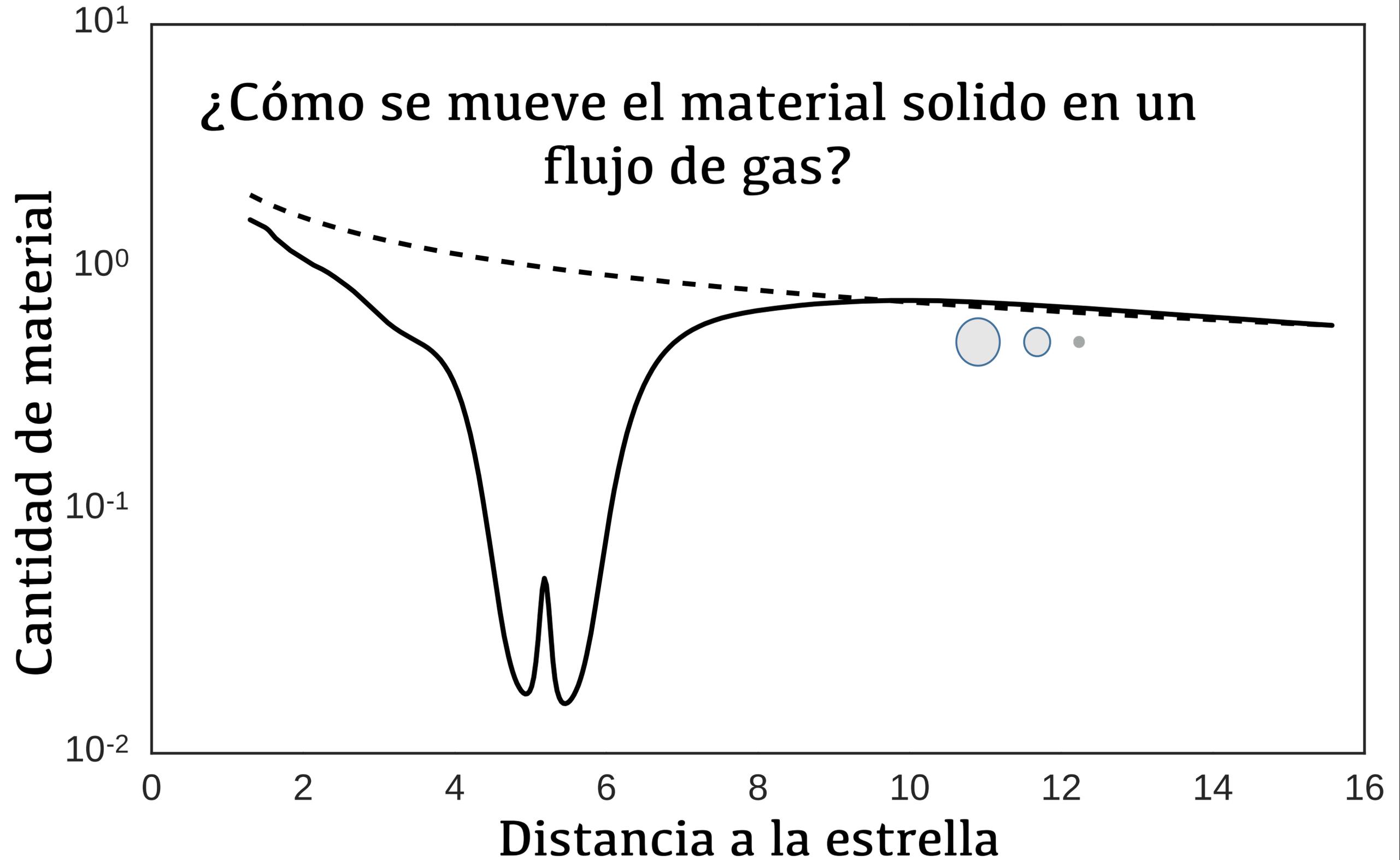
$$\Phi = -\frac{GM_{\star}}{r} - \frac{GM_{\text{P}}}{|r - r_{\text{P}}|}$$

Cantidad de material

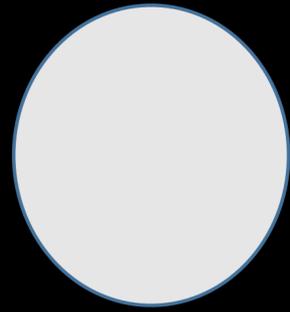


Distancia a la estrella

¿Cómo se mueve el material solido en un flujo de gas?



¿Cómo se mueve el polvo en un flujo de gas?



Grande



Medio

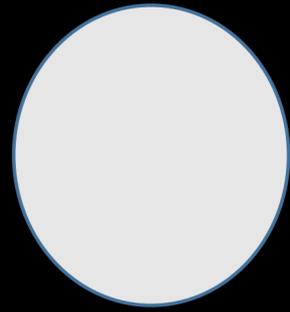


Pequeño

¿Cómo se mueve el polvo en un flujo de gas?



¿Cómo se mueve el polvo en un flujo de gas?



Grande



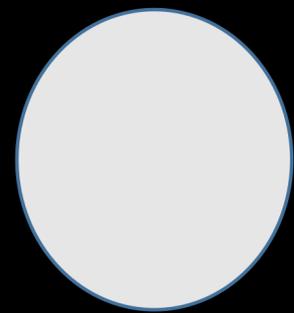
Medio



Pequeño

# ¿Cómo se mueve el polvo en un flujo de gas?

● Pequeño igual que el gas



Grande

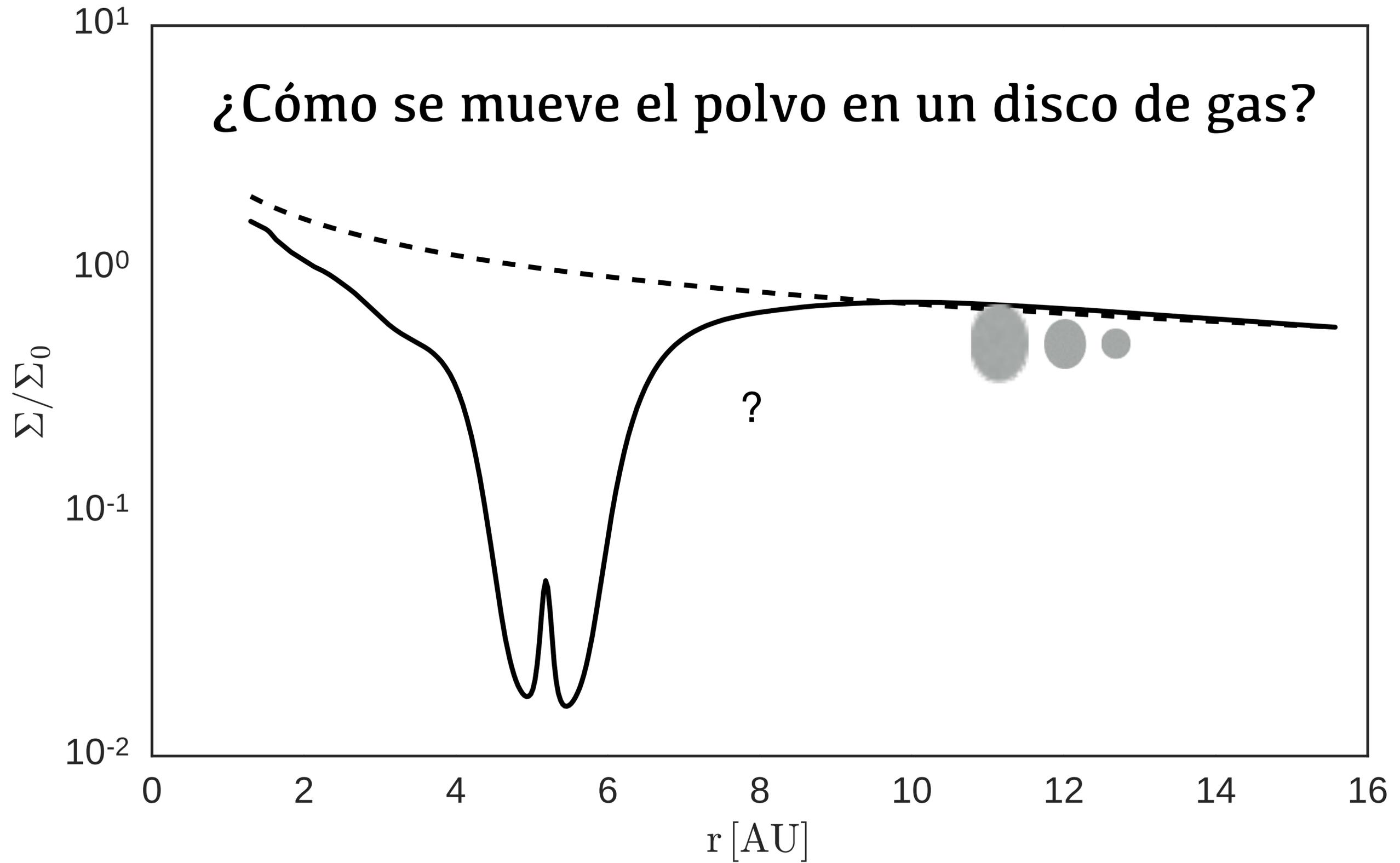
no le importa el gas



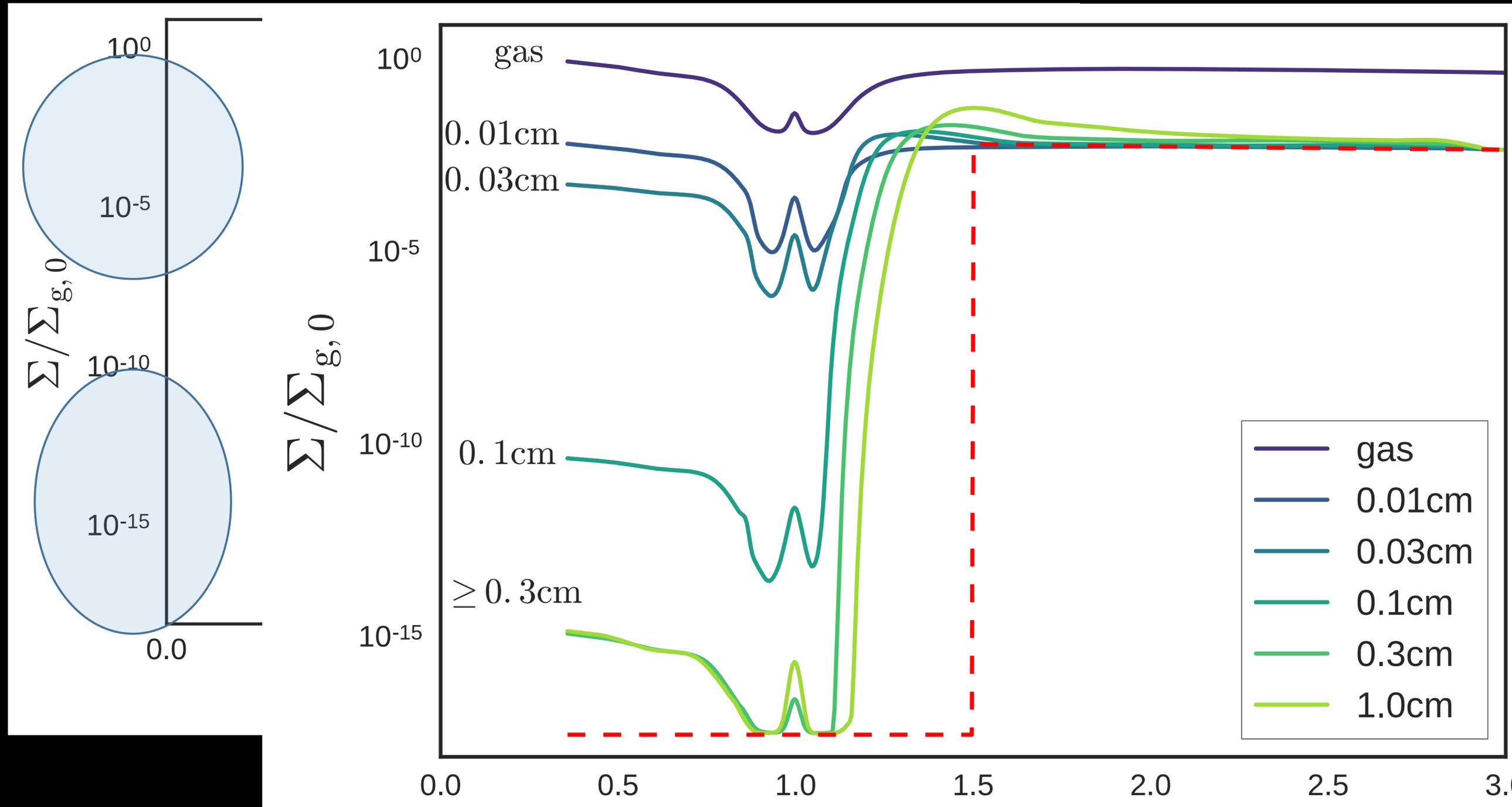
Medio

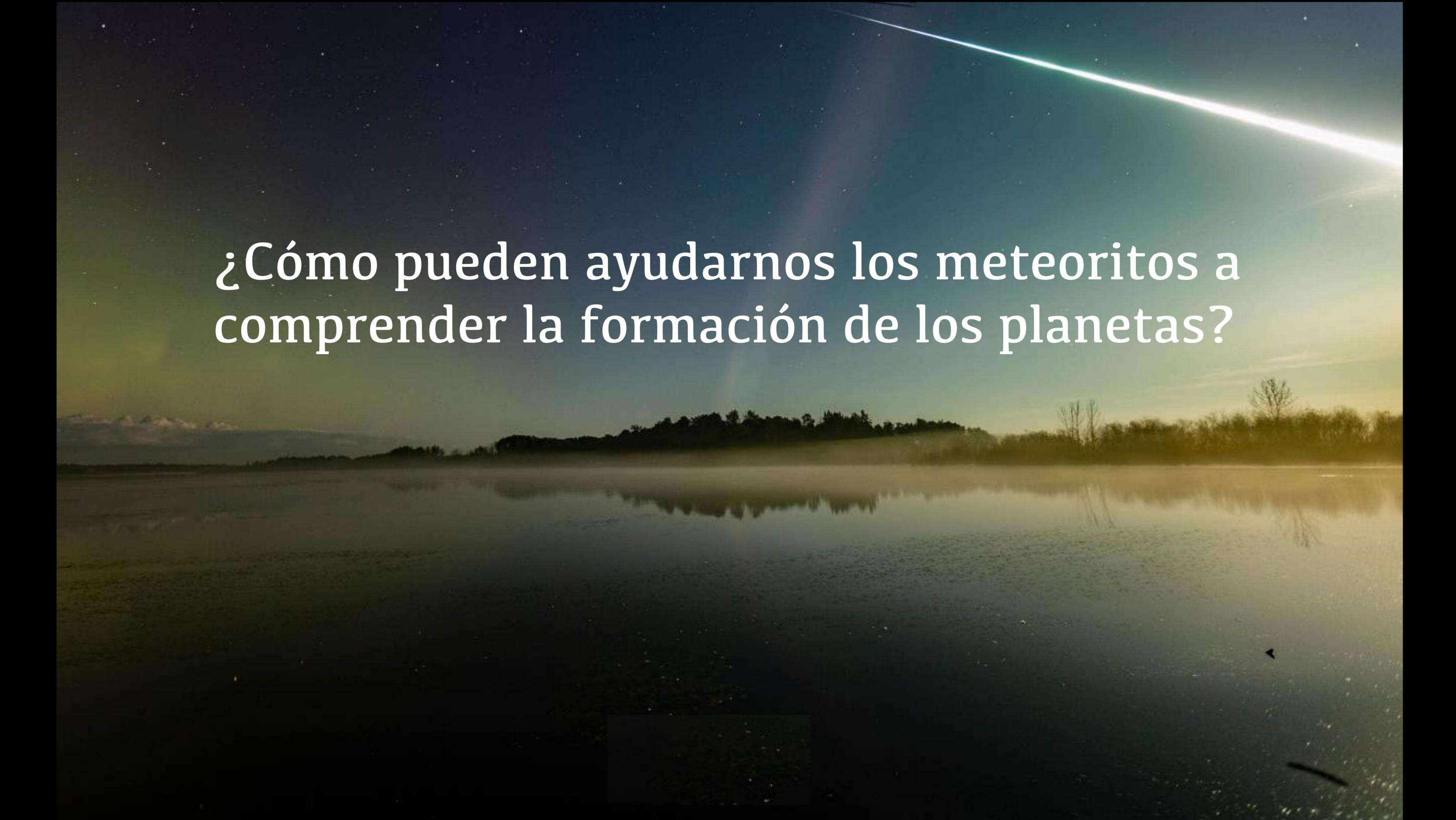
se pone complicado

# ¿Cómo se mueve el polvo en un disco de gas?



# Pongamos polvo en el disco:



The image is a composite. The top half shows a dark night sky with a bright, glowing greenish-white meteor streaking from the top right towards the center. The bottom half shows a calm lake at dawn or dusk, with a misty atmosphere and a line of trees on the far shore. The sky transitions from dark blue to a lighter, hazy yellow near the horizon.

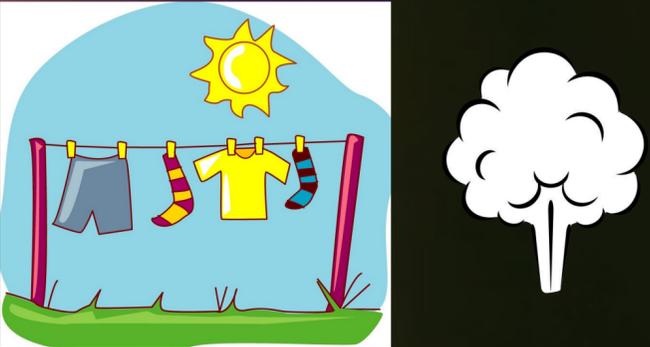
¿Cómo pueden ayudarnos los meteoritos a comprender la formación de los planetas?





Mercury  
Venus  
Earth  
Mars

...



**Sistema Solar Interior**

Jupiter

Saturn  
Uranus  
Neptune



**Sistema Solar Exterior**

# ¿Qué hay dentro de los meteoritos?

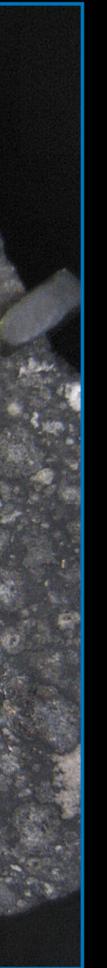
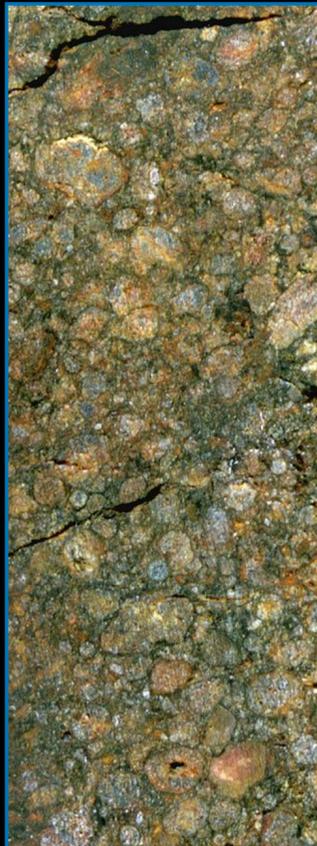
Cóndrulo

/

## Inclusiones ricas en calcio-aluminio

- Inclusion de Calcio-Aluminio típicos del Sistema Solar
- Sólo existen en meteoritos procedentes del Sistema Solar exterior

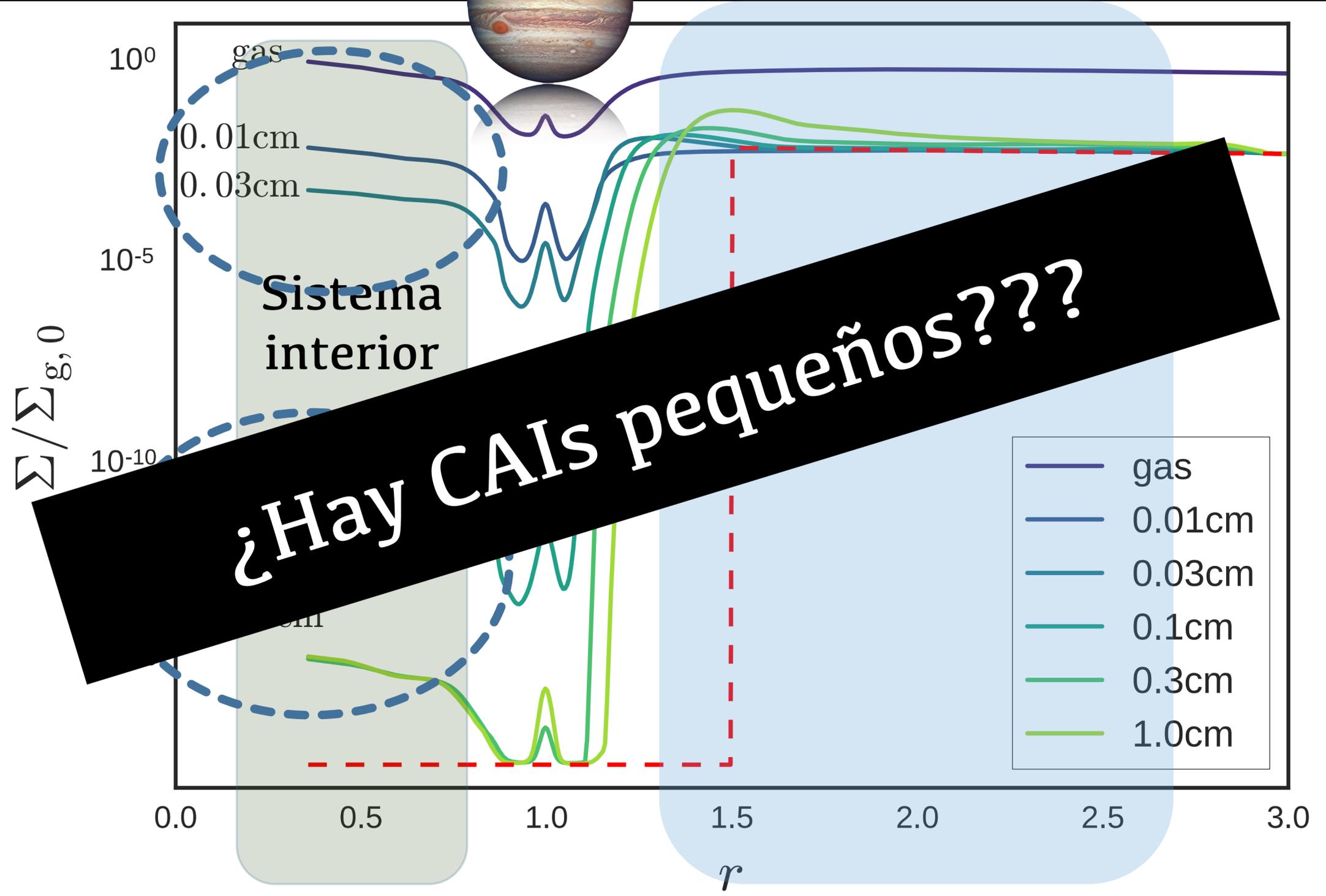
Matriz

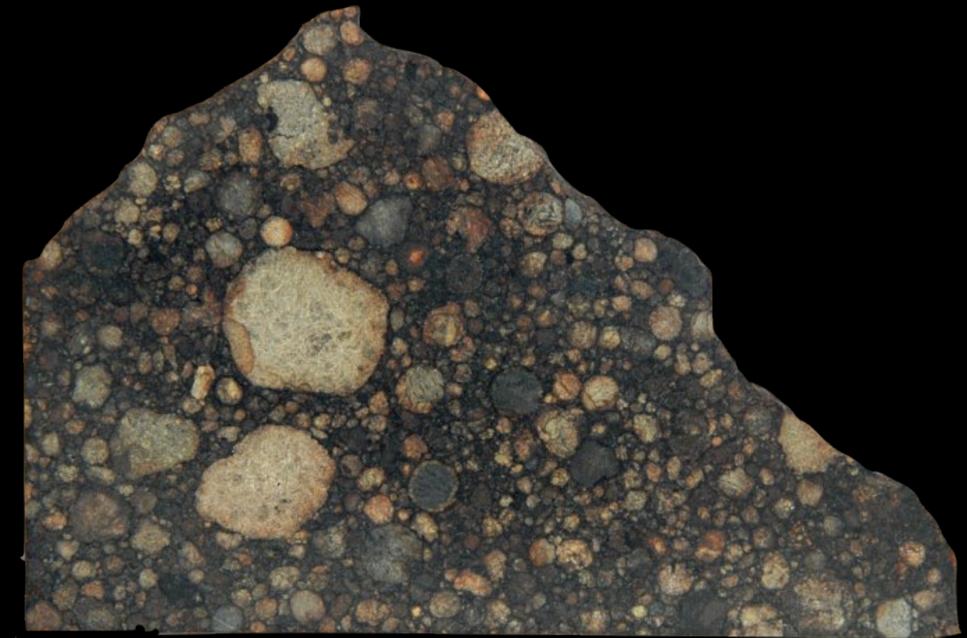


¿Por qué estas cosas de calcio-  
aluminio no están en el Sistema  
Solar interior?

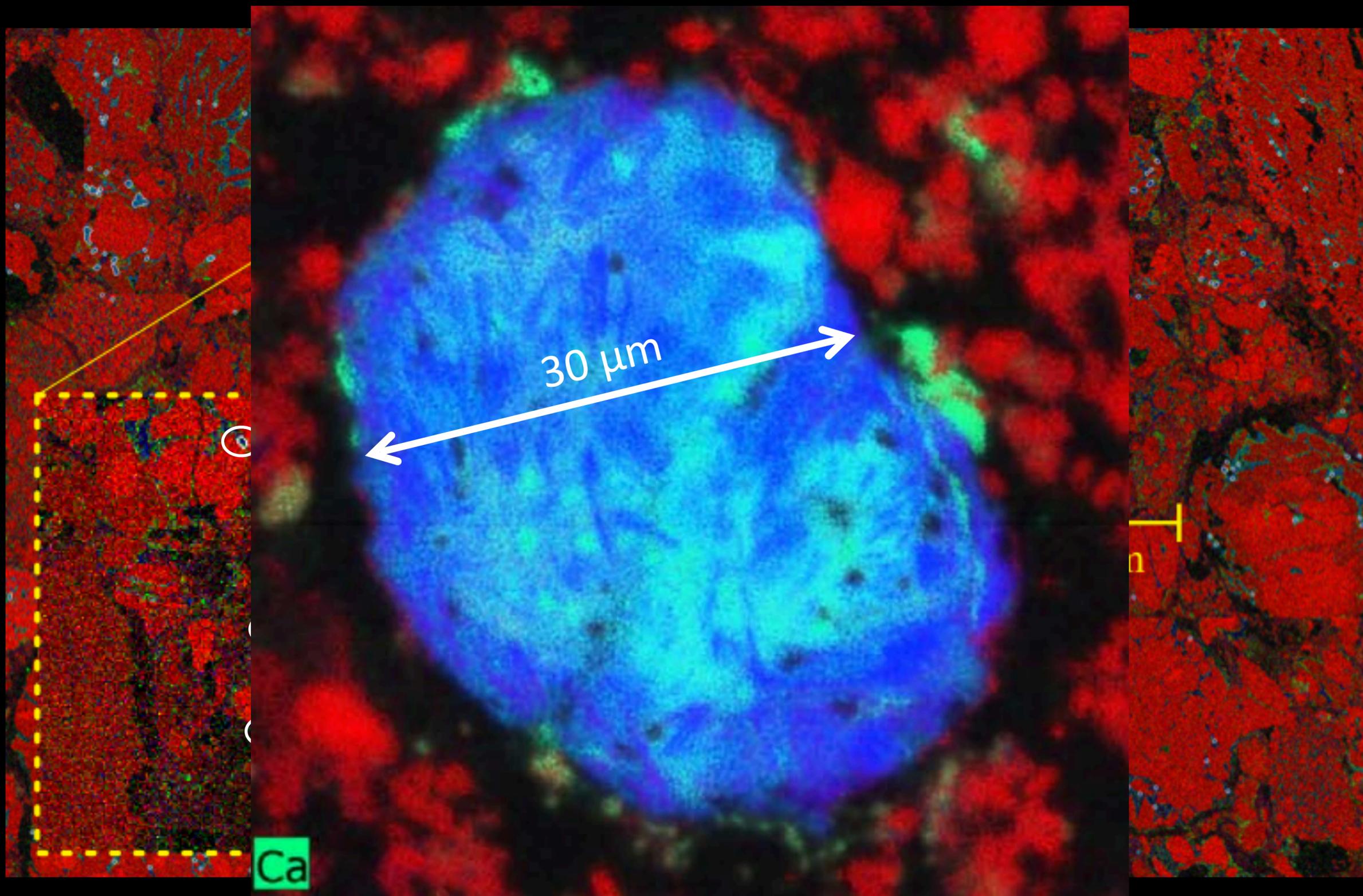
¿Es Júpiter el responsable de esto?







NWA 5697



- Un planeta gigante como Júpiter influye mucho en su entorno
- Posiblemente dividió el Sistema Solar en una parte interior y otra exterior



Mercury  
Venus  
Earth  
Mars



Jupiter

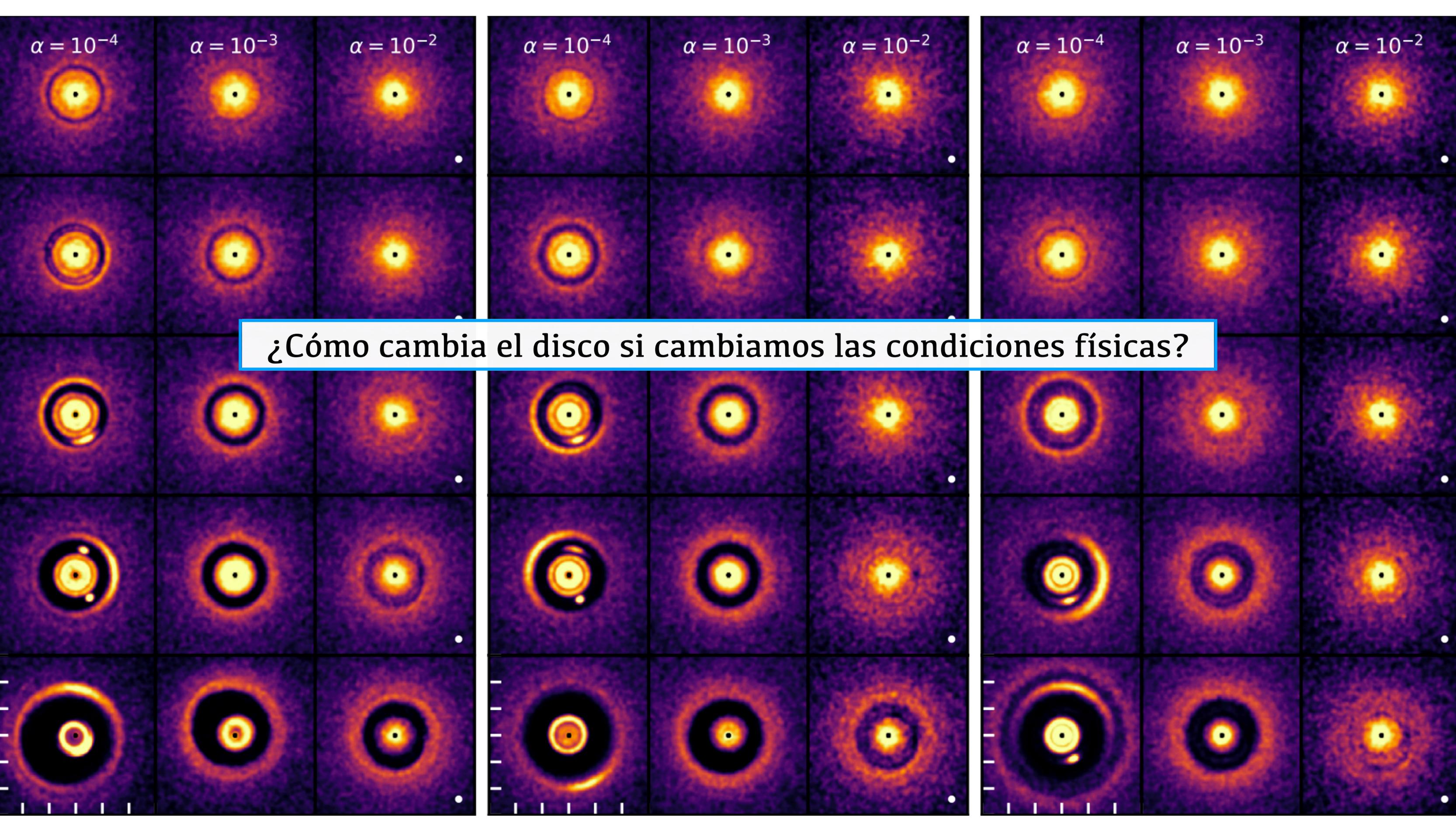
Saturn

Uranus

Neptune

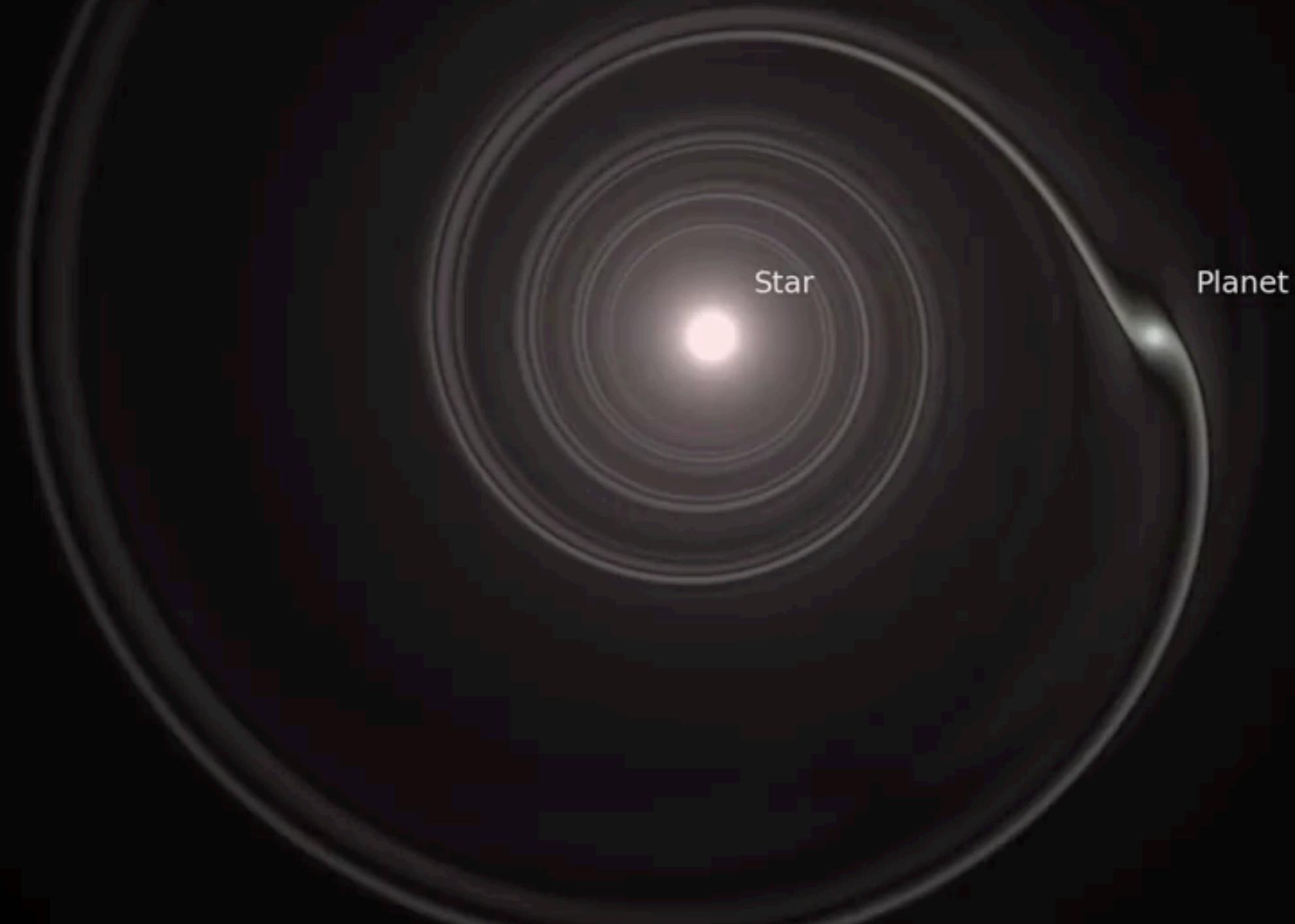


¿Es Júpiter la razón por la que la Tierra es como es?



También podemos preguntarnos cómo modifica el disco la órbita del planeta:

## NON-MIGRATING CASE



optical depth



0.0

0.5

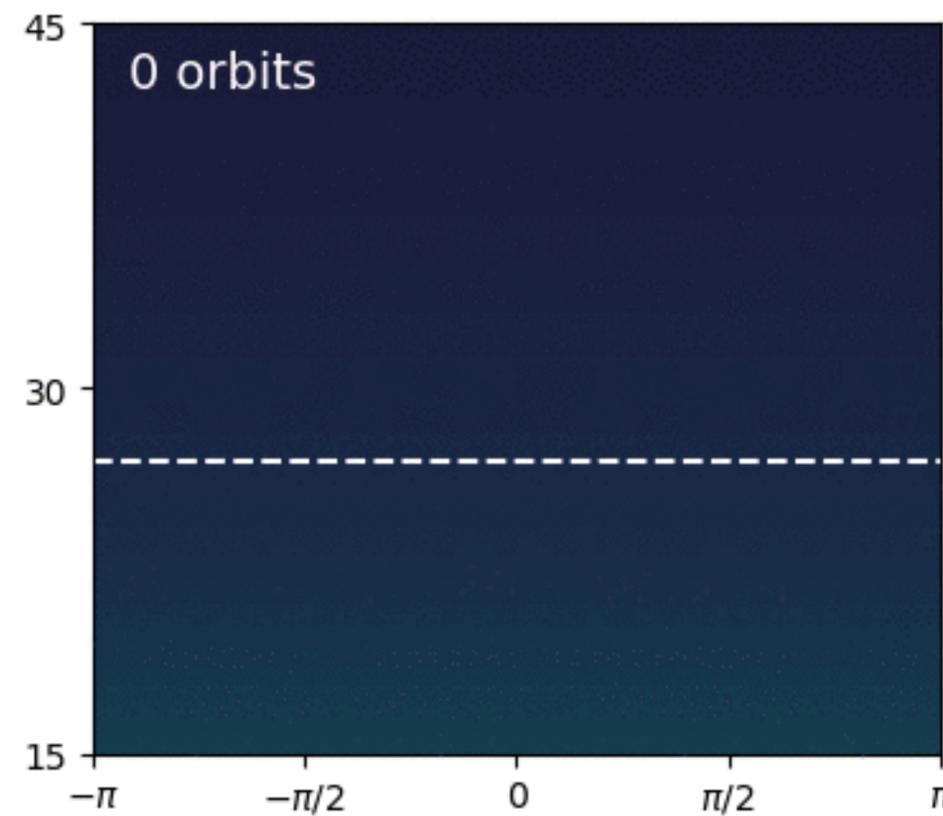
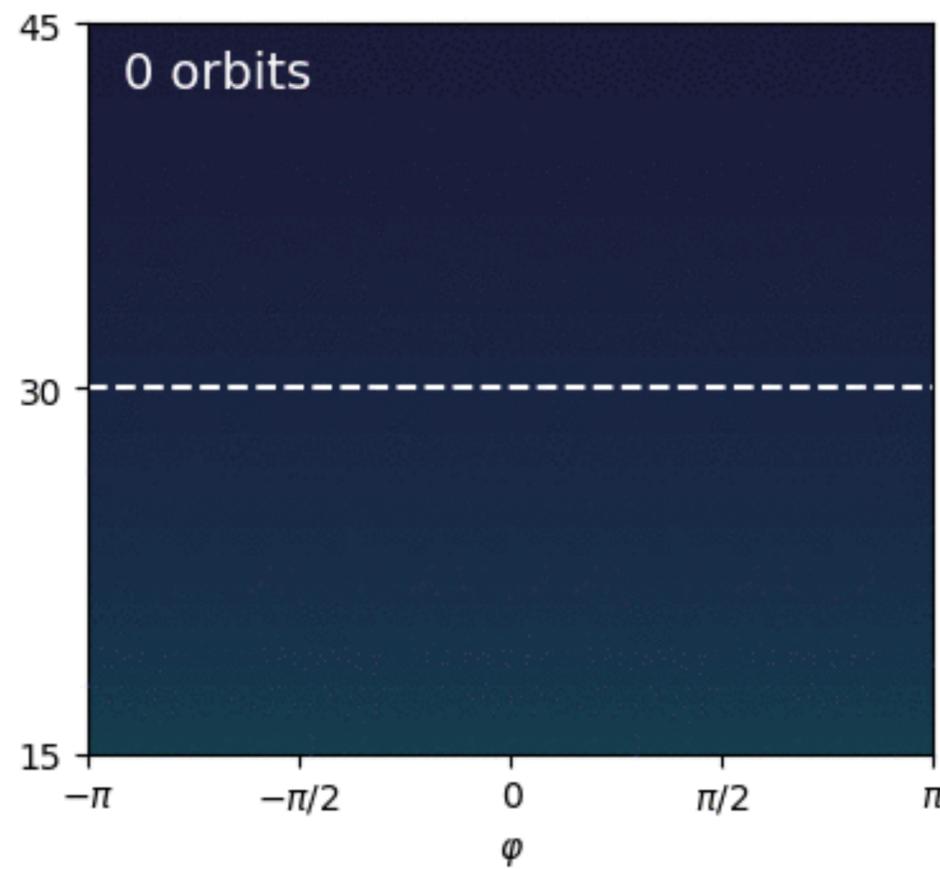
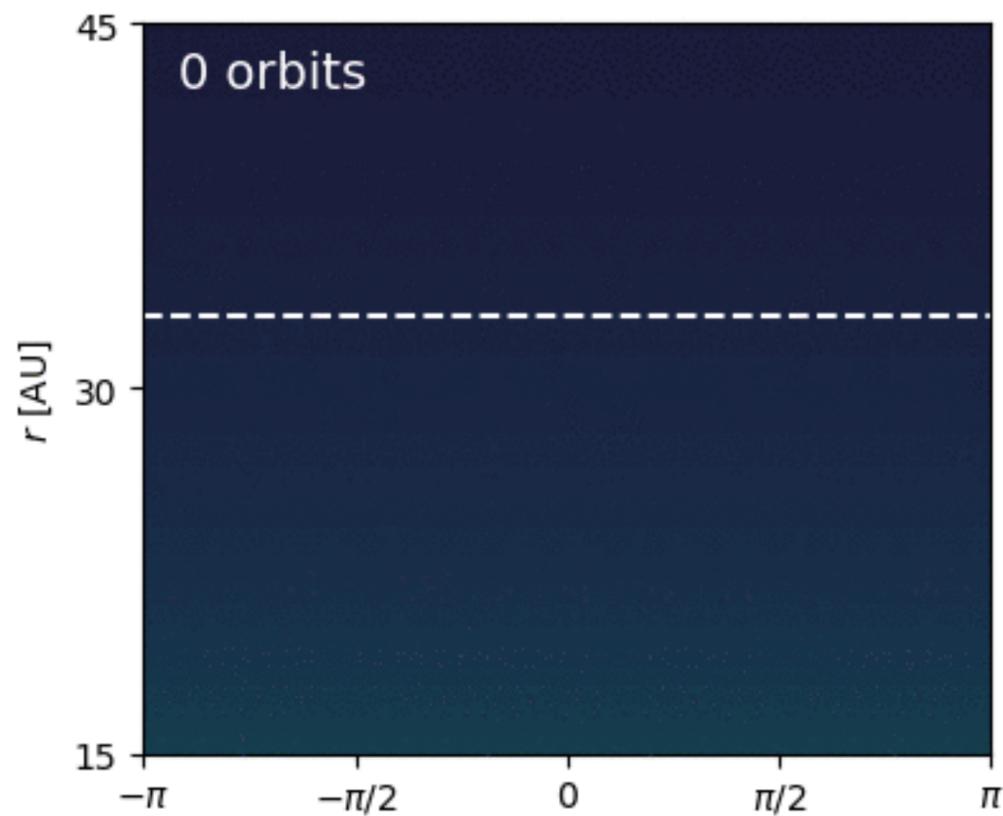
1.0

1.5

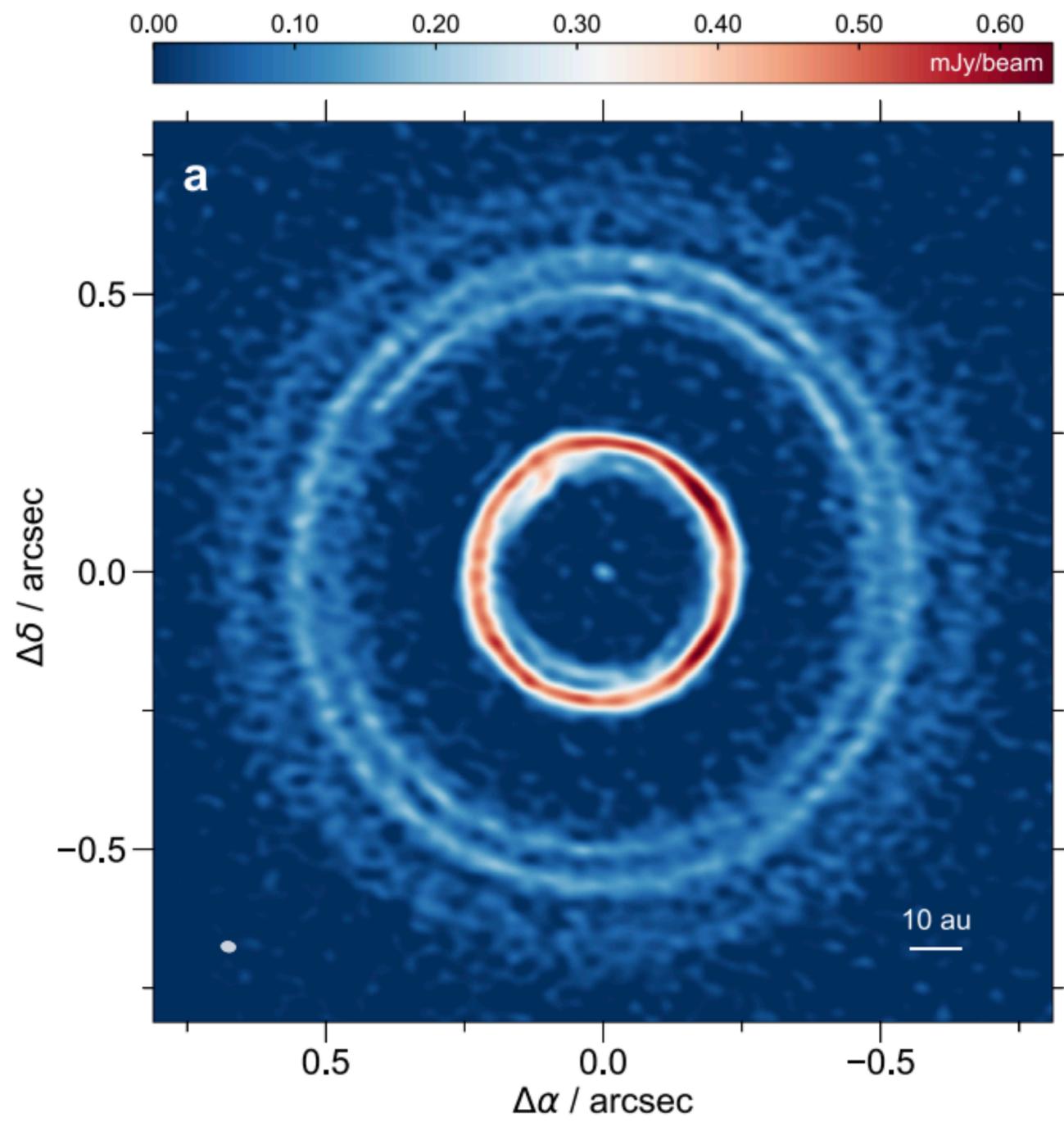
2.0

2.5

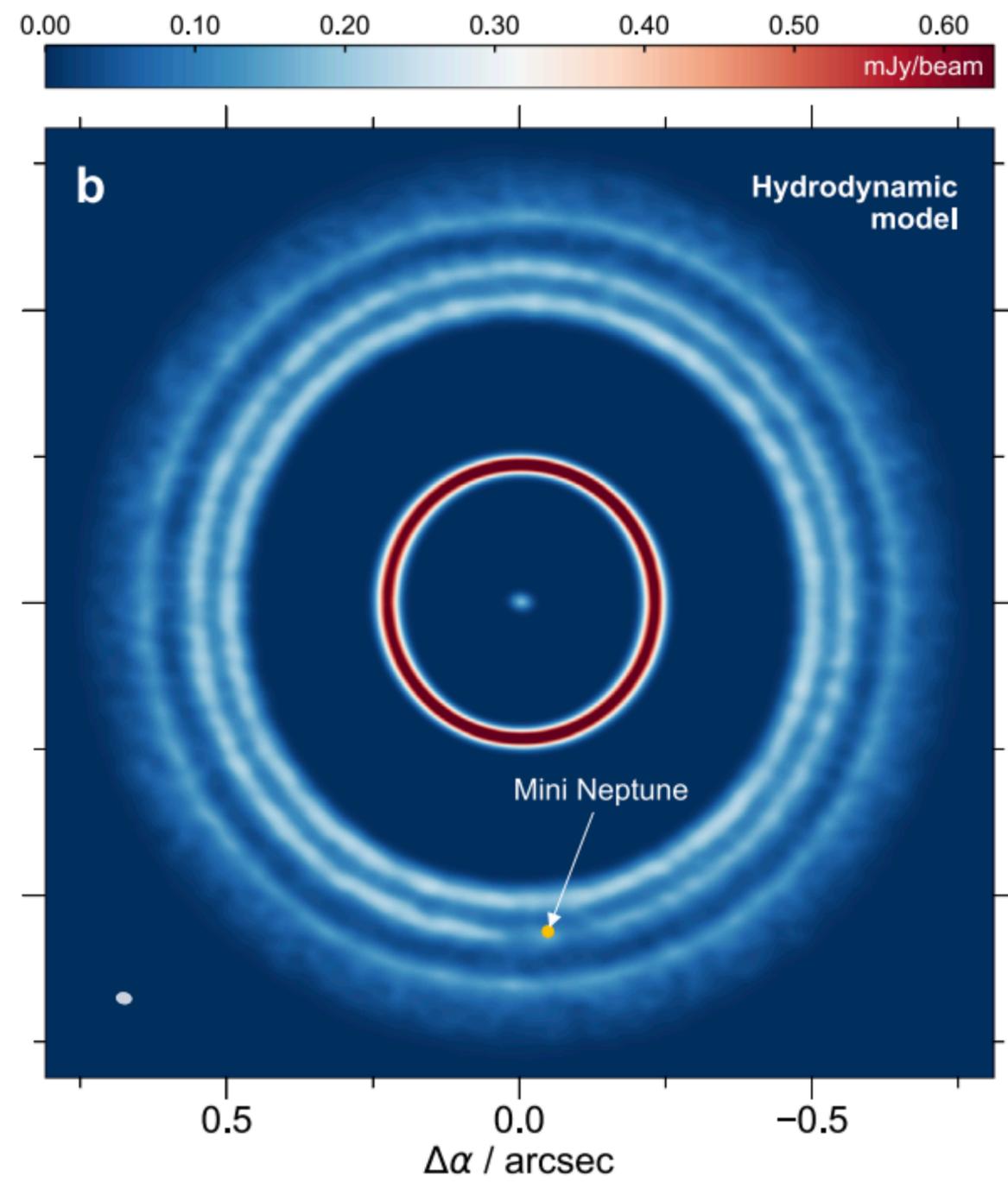
3.0



# Observación

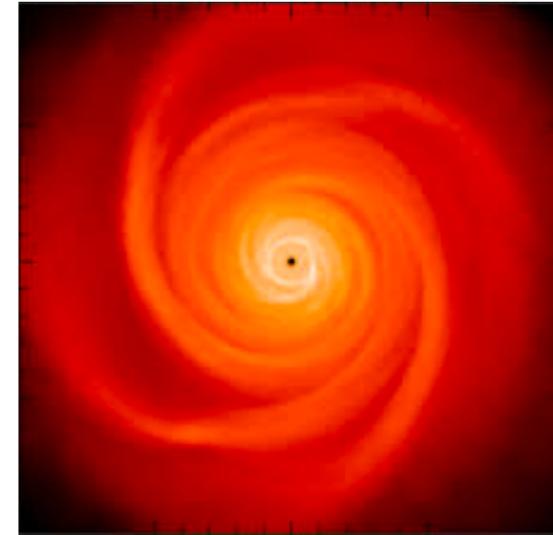


# Simulación

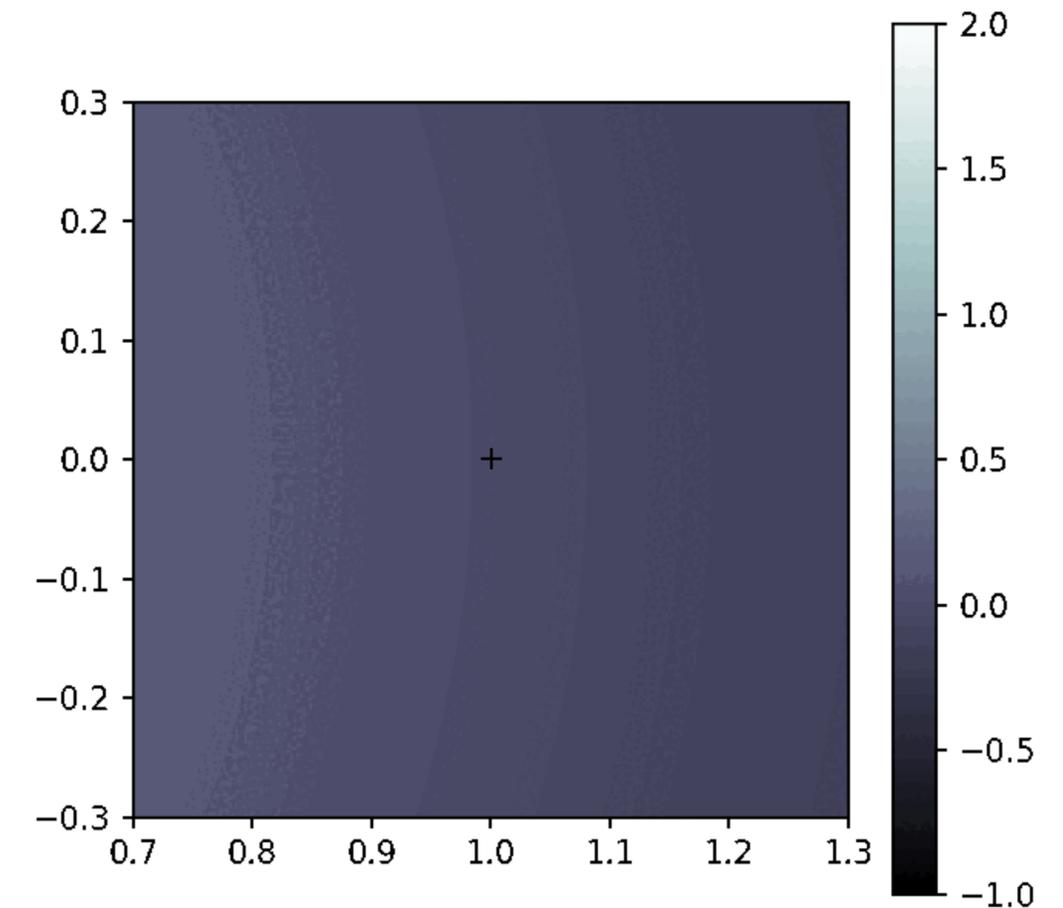
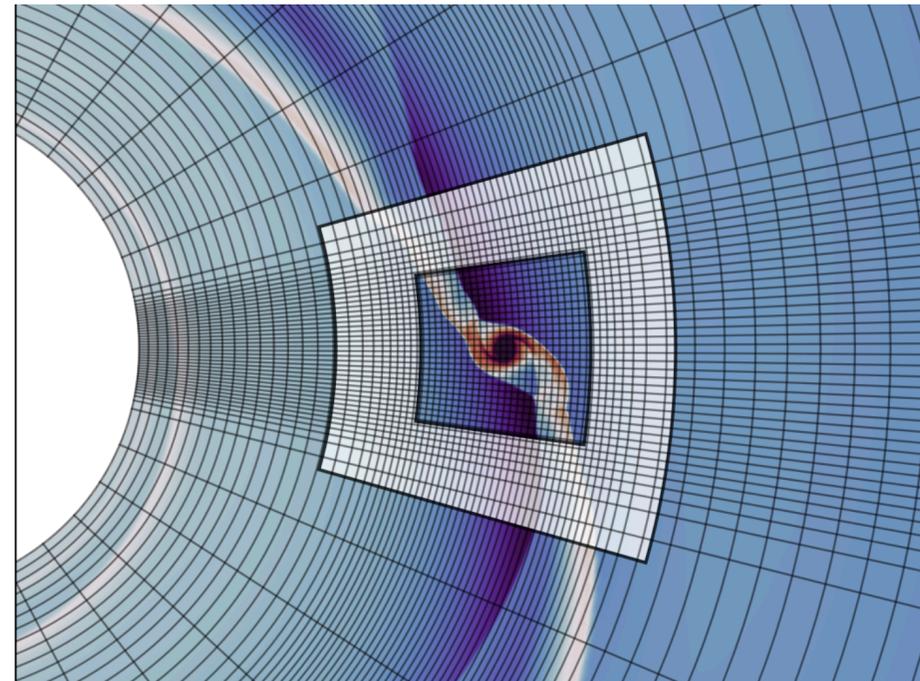


Nuestras preguntas siempre se transforman y, por tanto, también lo hace el código

¿qué ocurre si el disco pesa mucho y se rompe?



¿Cómo se forman las lunas?



## La próxima vez:

1. ¿Cómo puedo ejecutar FARGO3D yo mismo?
2. ¿Cómo puedo analizar/visualizar los resultados?
3. ¿Cómo puedo definir mi propia configuración?
4. ¡Juega con el código!

¿Cómo puedo obtener/instalar el código?

1. Ir a la pagina: <http://fargo.in2p3.fr/>
2. Pulse el botón de “Download” de la derecha
3. En el repositorio git pulsa "Clone"
4. Copiar-pegar el comando en un terminal

# Benchmarking diffusion

