

Formación de Planetesimales

Dinámica del polvo

Primer: Estructura vertical

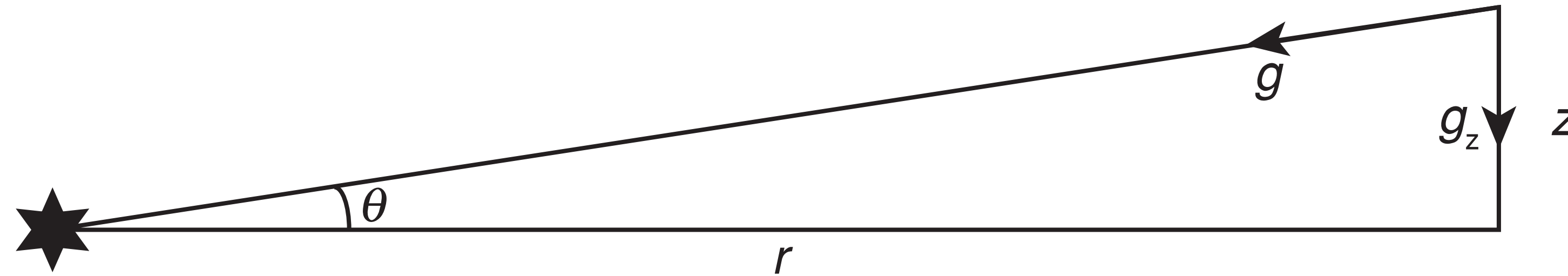


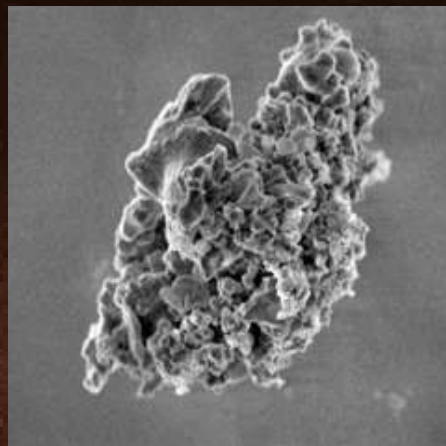
Fig. 2.2. The vertical structure of geometrically thin disks is set by a balance between the vertical component of the star's gravity g_z and a pressure gradient.

Equilibrio hidrostático

$$g_z = g \sin \theta = \frac{GM_*}{(r^2 + z^2)} \frac{z}{(r^2 + z^2)^{1/2}}, \quad \longrightarrow \quad c_s^2 \frac{d\rho}{dz} = -\frac{GM_* z}{(r^2 + z^2)^{3/2}} \rho. \quad \longrightarrow \quad \rho = C \exp \left[\frac{GM_*}{c_s^2 (r^2 + z^2)^{1/2}} \right],$$

$$\rho = \rho_0 e^{-z^2/2h^2}$$

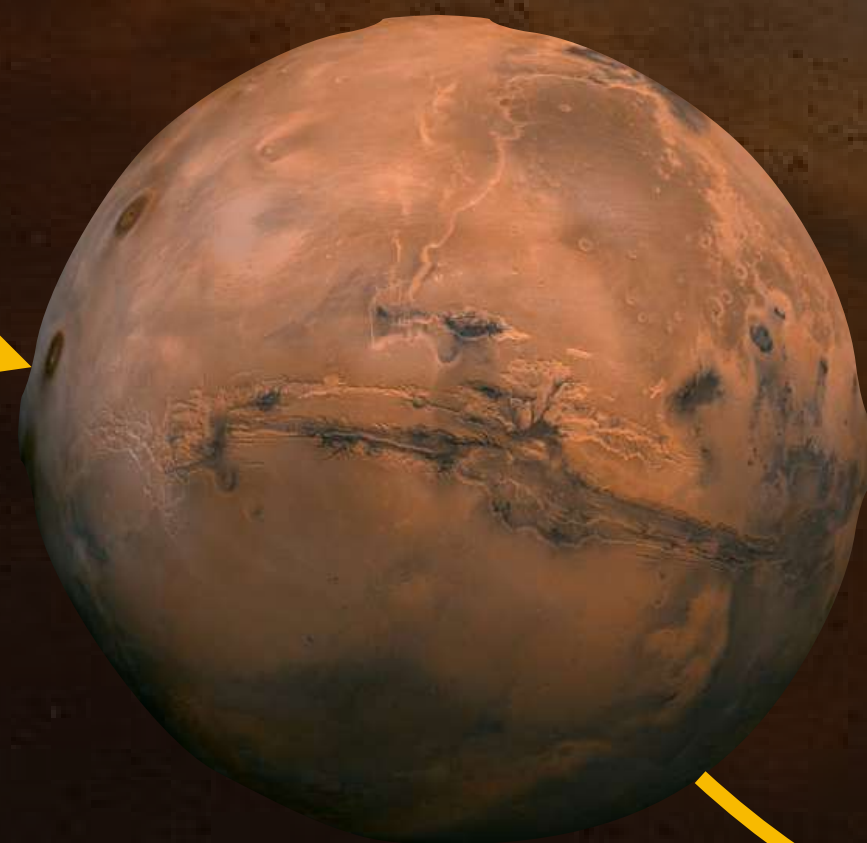
La densidad varía verticalmente como una gaussiana en z .



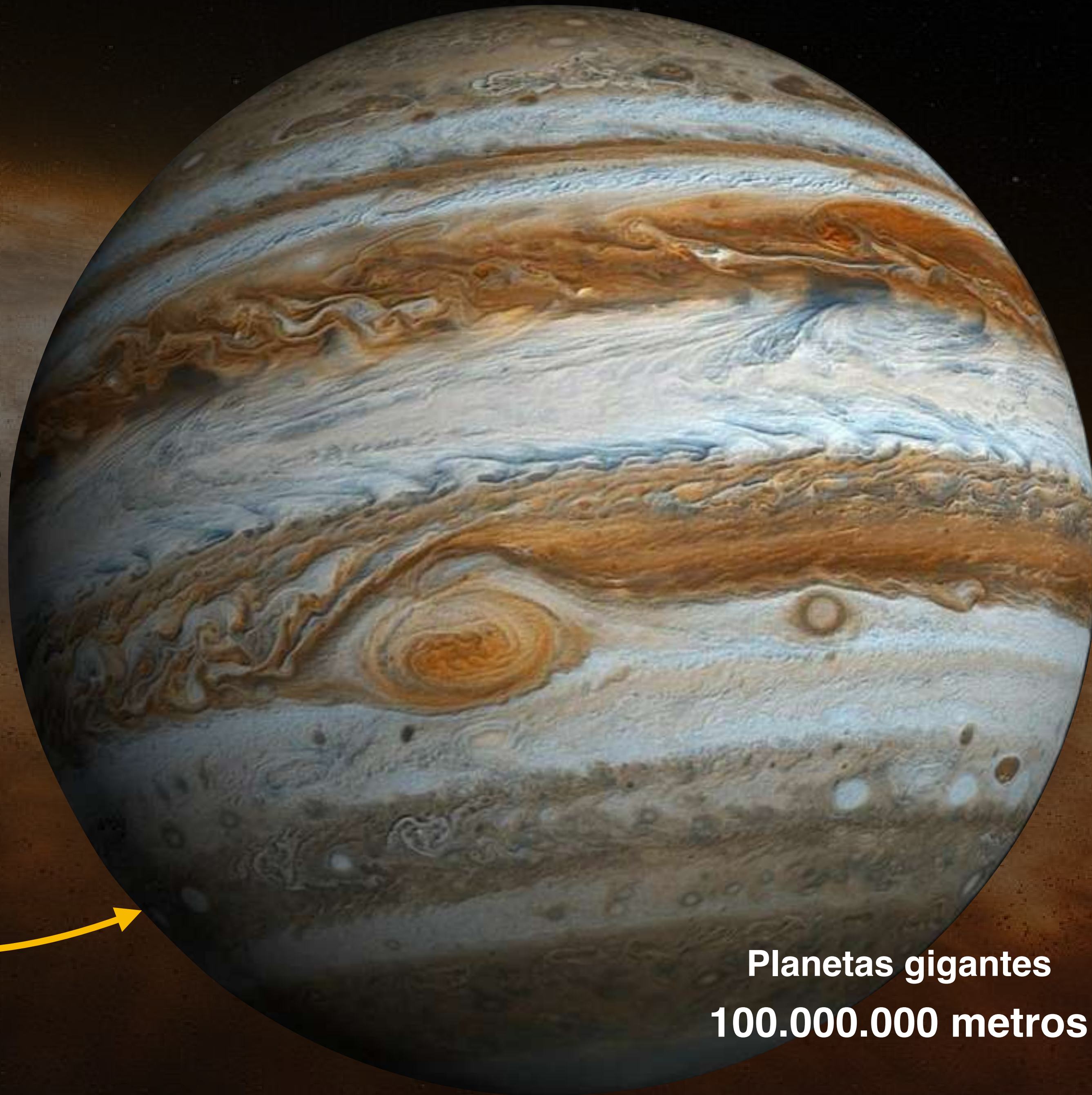
μm polvo
0.000001 metros



Asteroides



Planetas rocosos



Planetas gigantes
100.000.000 metros

Formación de planetas

3 etapas (a grandes rasgos)

1. **Proceso de coagulación**, donde la fuerza dominante es la fricción con el gas. Acá es donde se forman los *planetesimales* (~100 m - 100 km).
2. **Proceso de acreción**, donde la dominan fuerzas gravitatorias, se forman planetas terrestres y núcleos de planetas gigantes por acreción de planetesimales y *pebbles*.
3. **Formación de planetas gigantes y migración**. Una vez que los núcleos se vuelven lo suficientemente masivos (~10 M_{earth}), capturan gas del disco.



Formación de planetesimales

Roce aerodinámico!

- Suponemos la siguiente situación: tenemos una estrella central y un disco de gas y polvo orbitando a su alrededor
- El gas tiene presión y por ende no orbita de forma perfectamente Kepleriana.

$$\frac{v_{\phi}^2}{r} = \frac{GM_{\star}r}{(r^2 + z^2)^{3/2}} + \frac{1}{\rho} \frac{dP}{dr}$$

Gradiente de presión

$$v_{\phi}^{\text{gas}} \approx 98 \% v_{\text{Kep}}$$

Tres regímenes

1. Partículas muy pequeñas

Fricción de Epstein

$$s < \lambda_{\text{mfp}}$$

2. Partículas pequeñas

Fricción de Stokes

$$s > \lambda_{\text{mfp}}$$

3. Planetesimales



Regimen 1

Fricción de Epstein $s < \lambda_{\text{mfp}}$

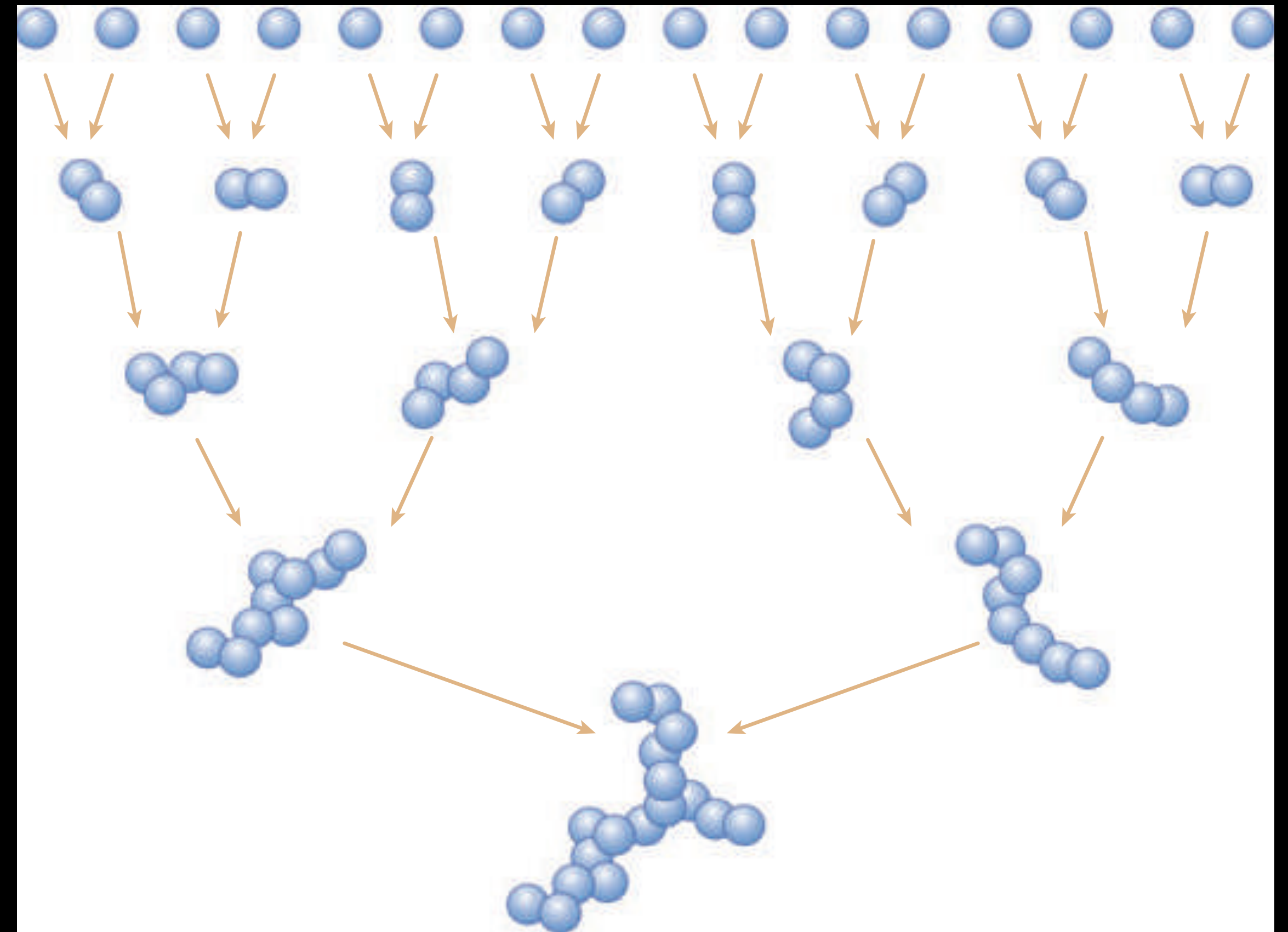
- Las partículas están bien acopladas al gas. El fluido (gas + polvo) se comporta como un gas sin colisiones con una distribución de velocidades Maxwelliana.
- Importante para interpretar observaciones en infrarrojo cercano por ejemplo.



Colisiones

Crecimiento fractal

- Cuando las partículas son muy pequeñas y acopladas al gas, el movimiento browniano domina las colisiones.
- Hay diferencias de velocidad pequeñas entre las partículas. El crecimiento funciona como un “hit-and-stick” y se forman agregados fractales.



Blum & Wurm 2008

Colisiones

Crecimiento fractal

- Cuando las partículas son muy pequeñas y acopladas al gas, el movimiento browniano domina las colisiones.
- Hay diferencias de velocidad pequeñas entre las partículas. El crecimiento funciona como un “hit-and-stick” y se forman agregados fractales.



Regimen 2

Fricción de Stokes $s > \lambda_{\text{mfp}}$

- Las partículas no están del todo acopladas al gas. Se mueven con v_{Kep} , por lo que irán más rápido que el gas (que se frena por la componente de presión).
- El que el polvo y el gas tengan velocidades distintas hace que el polvo experimente un **roce aerodinámico**.
- Ese roce hace que las partículas migren hacia adentro, decayendo orbitalmente como una espiral a la estrella

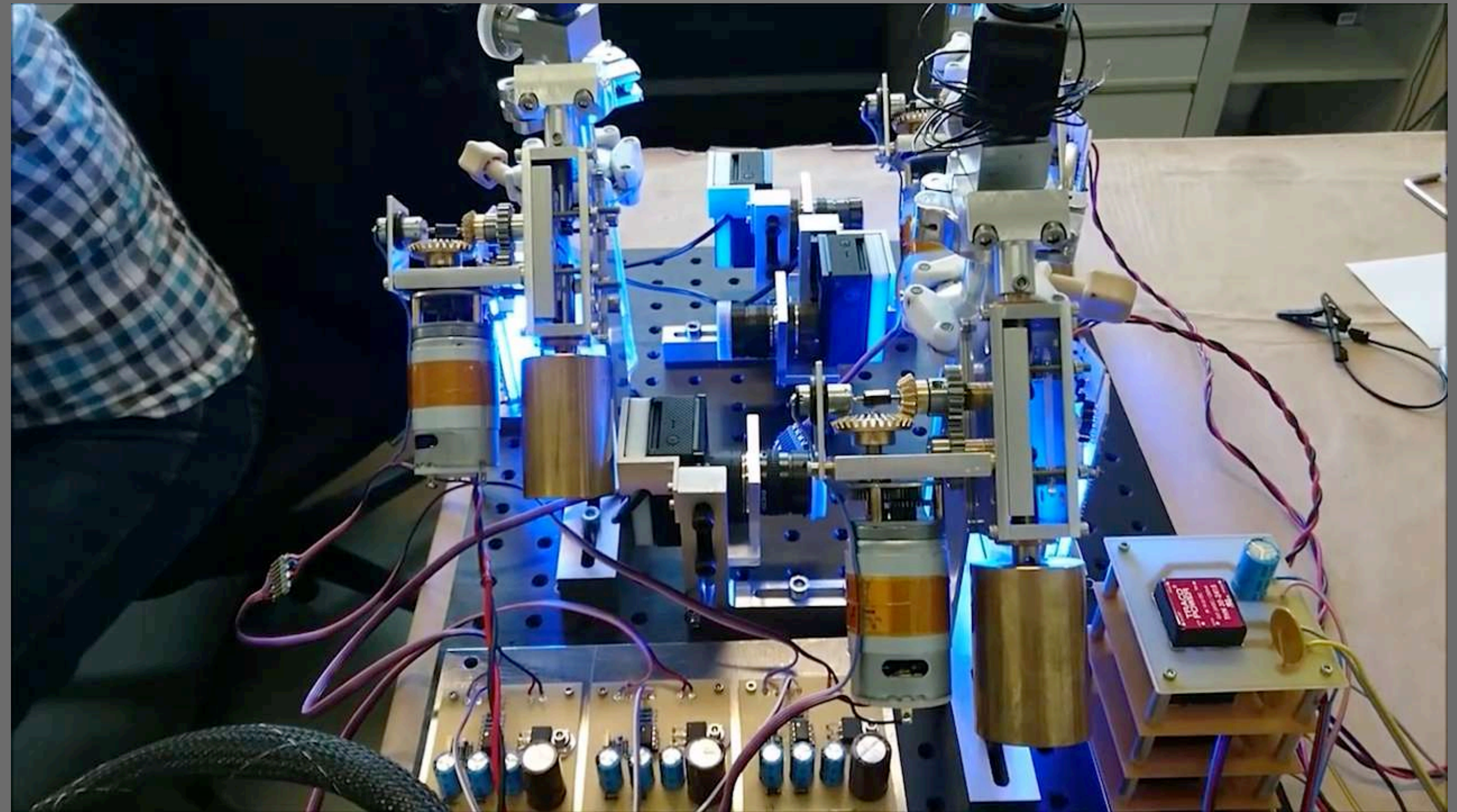


Importante: partículas de diferentes tamaños tienen diferentes velocidades relativas, lo que induce a colisiones mutuas, favoreciendo la coagulación.

Experimentos

En laboratorio

- Se necesita microgravedad



Team Blum et al.

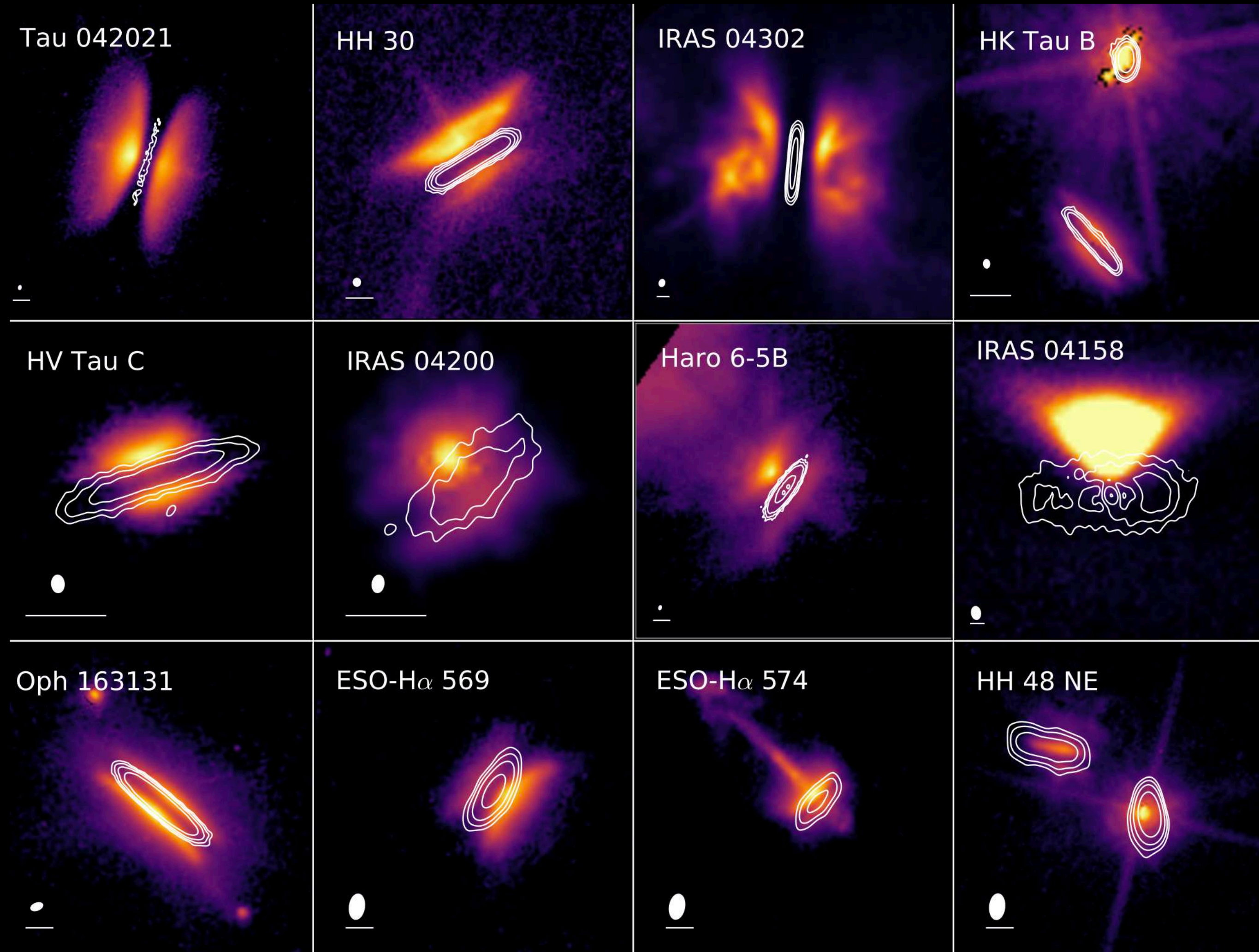
Regimen 3

- Cuando las partículas alcanzan un tamaño del orden de un planetesimal.
- Las fuerzas de roce con el gas y la aceleración causada por la fricción dejan de ser relevantes.



Dust settling (Asentamiento)

- La fricción aerodinámica es importante para entender ambas, la distribución vertical y el movimiento radial del material sólido dentro del disco.



**Meter-sized barrier = Bouncing
Fragmentation
Drift**

Bouncing Fragmentation Drift

Solutions:

Porosity / fluffiness

Blum & Wurm 2008

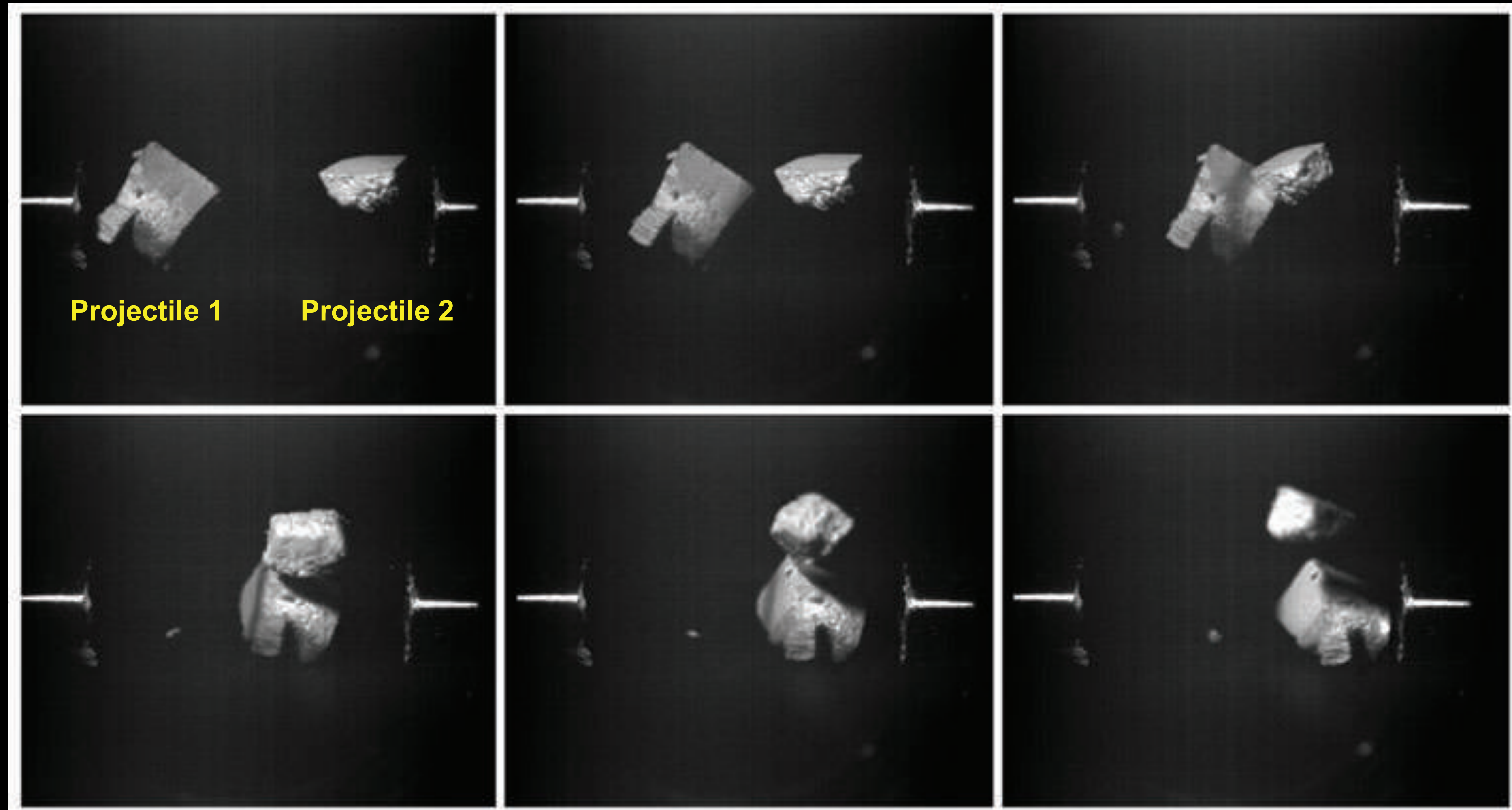


Figure 5

Bouncing of two irregular-shaped, nonfractal, but highly porous dust aggregates ($\phi = 0.15$) at a relative velocity of ~ 0.4 m s⁻¹ (see Section 5.3). The images were taken with a high-speed camera in a microgravity experiment onboard a parabolic-flight. The field of view is 24×20 mm². Figure by D. Heißelmann, H. Fraser & J. Blum (unpublished data).

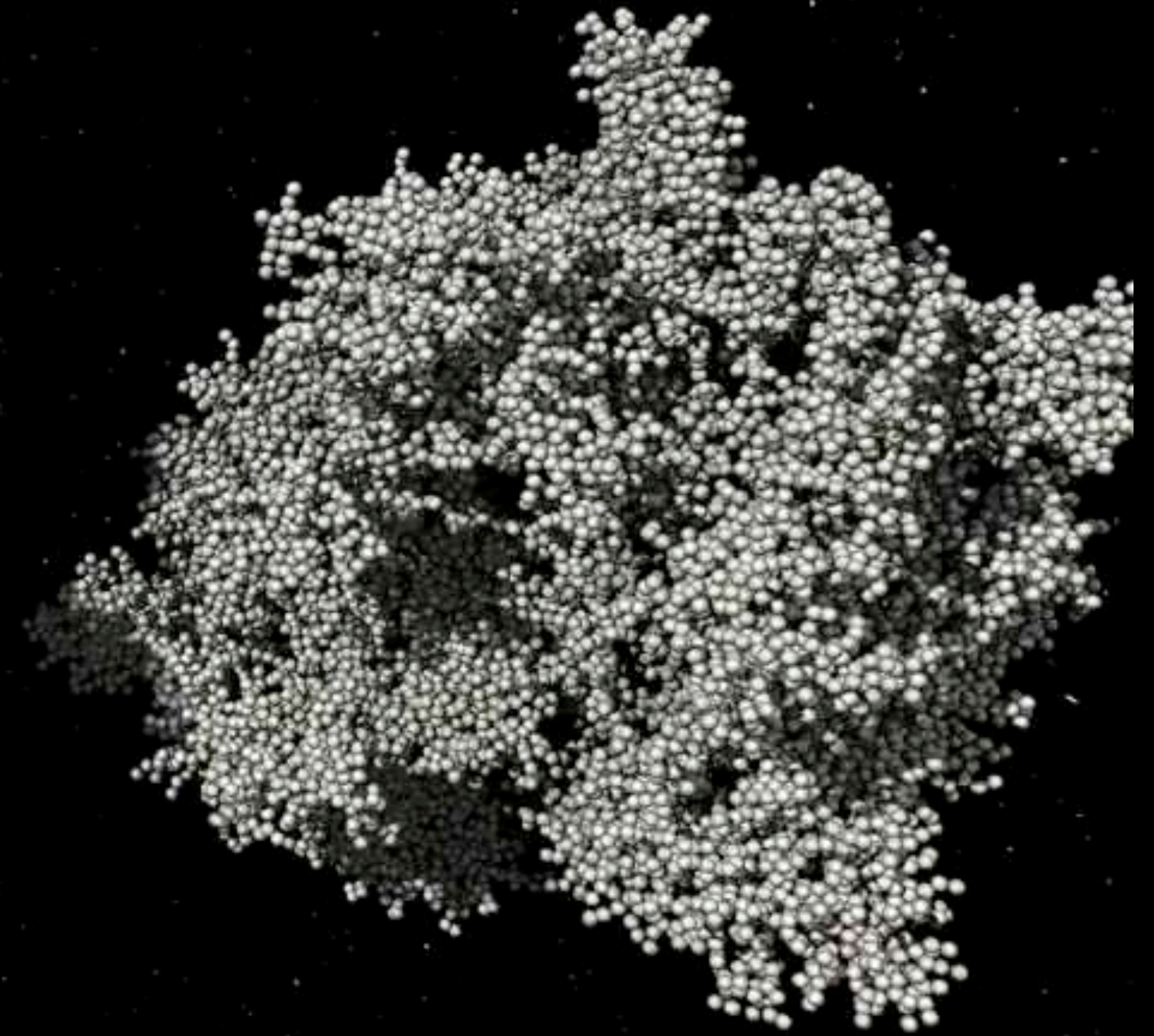
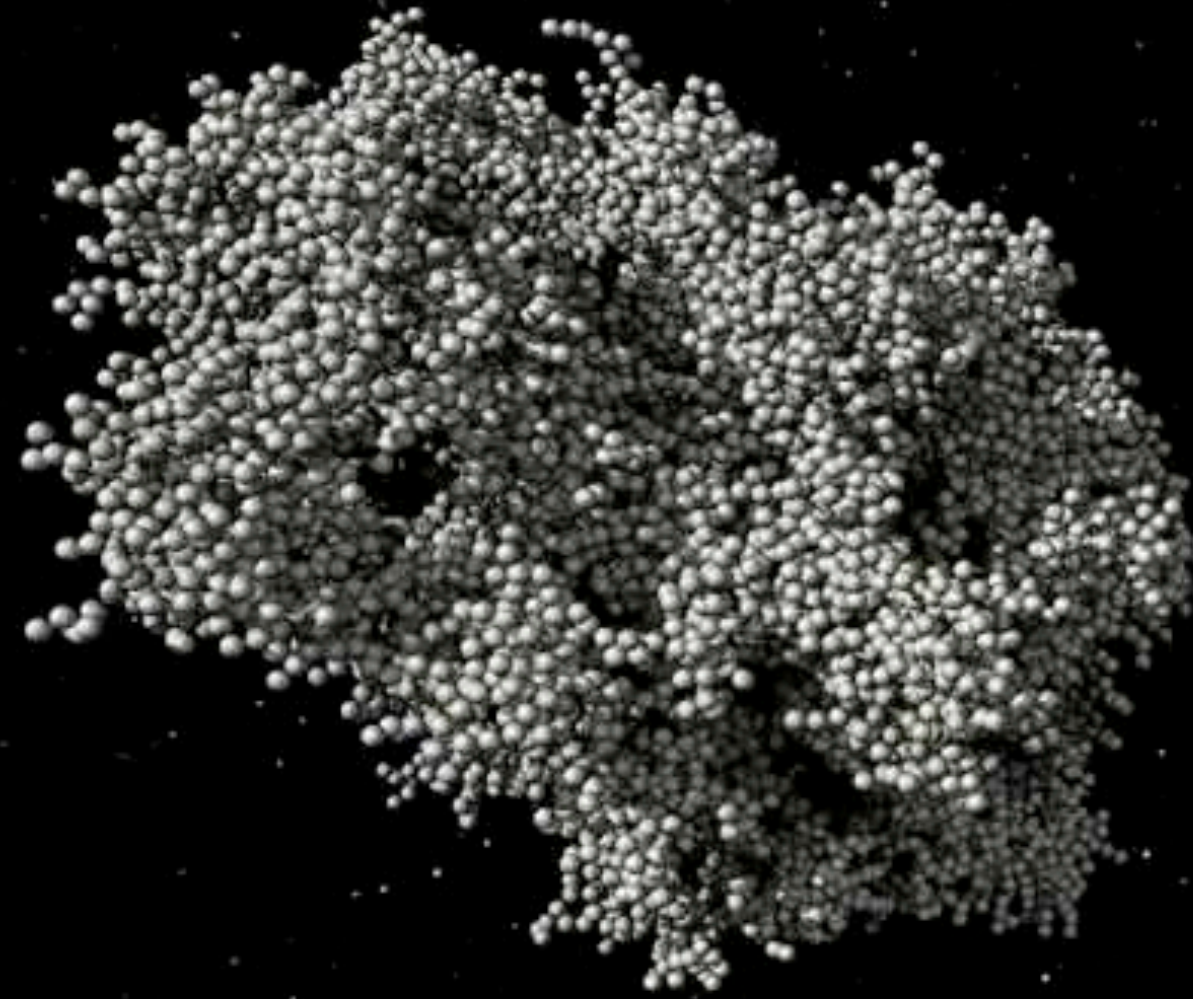
Bouncing Fragmentation Drift

Solutions:

Velocity distributions
Collisions between different sizes
(lucky particles)

Material: 1.2 μm amorphous silicate grains

Impact Velocity: 5 m/s



Initial Coordination Number: 2.44

© 2011 Alexander Seizinger

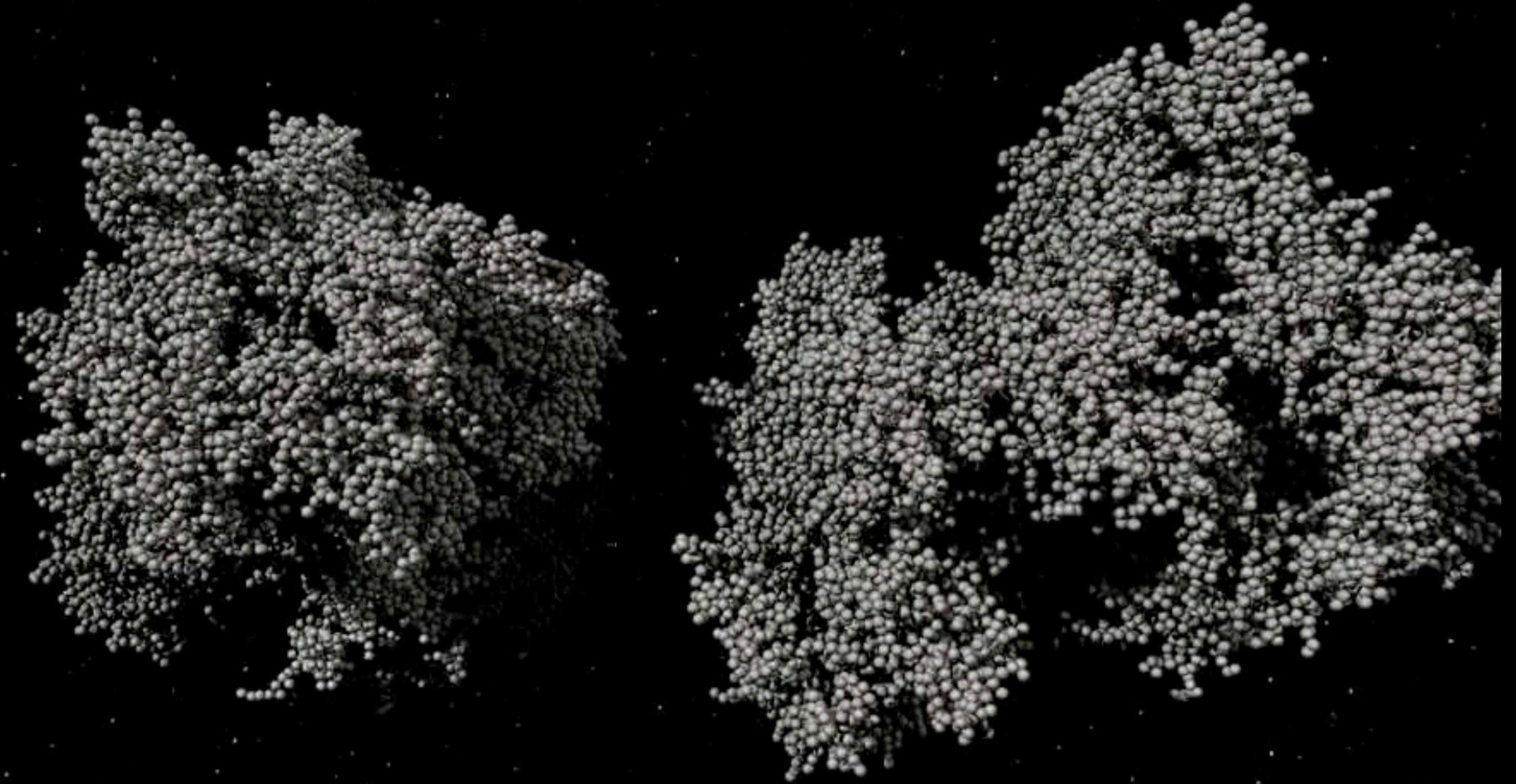
Bouncing Fragmentation Drift

Solutions:

Velocity distributions
Collisions between different sizes
(lucky particles)

Material: 1.2 μm amorphous silicate grains

Impact Velocity: 1 m/s



Initial Coordination Number: 2.44

© 2011 Alexander Seizinger

Bouncing Fragmentation Drift

Solutions:

Particle concentrations
dust traps

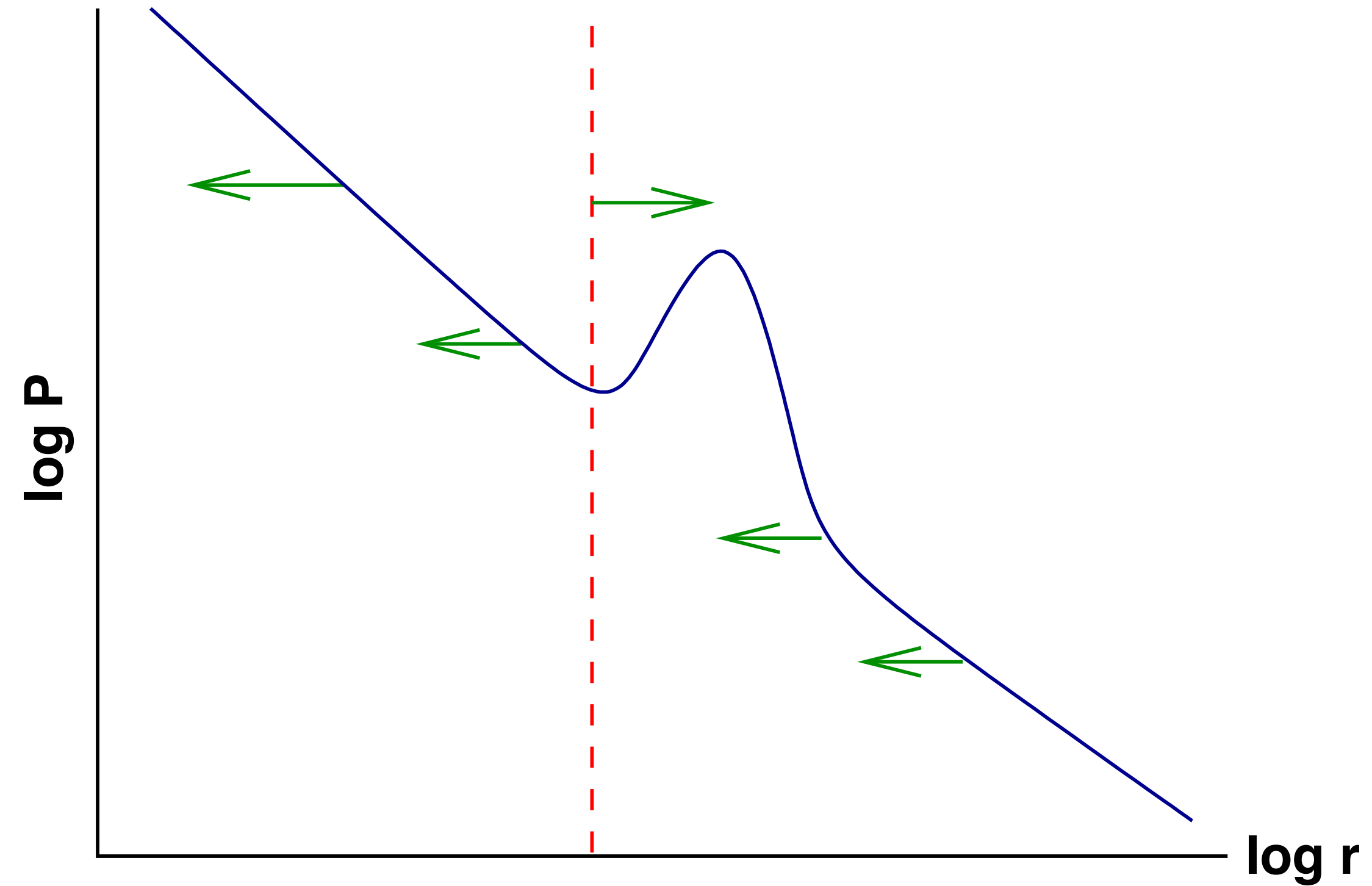
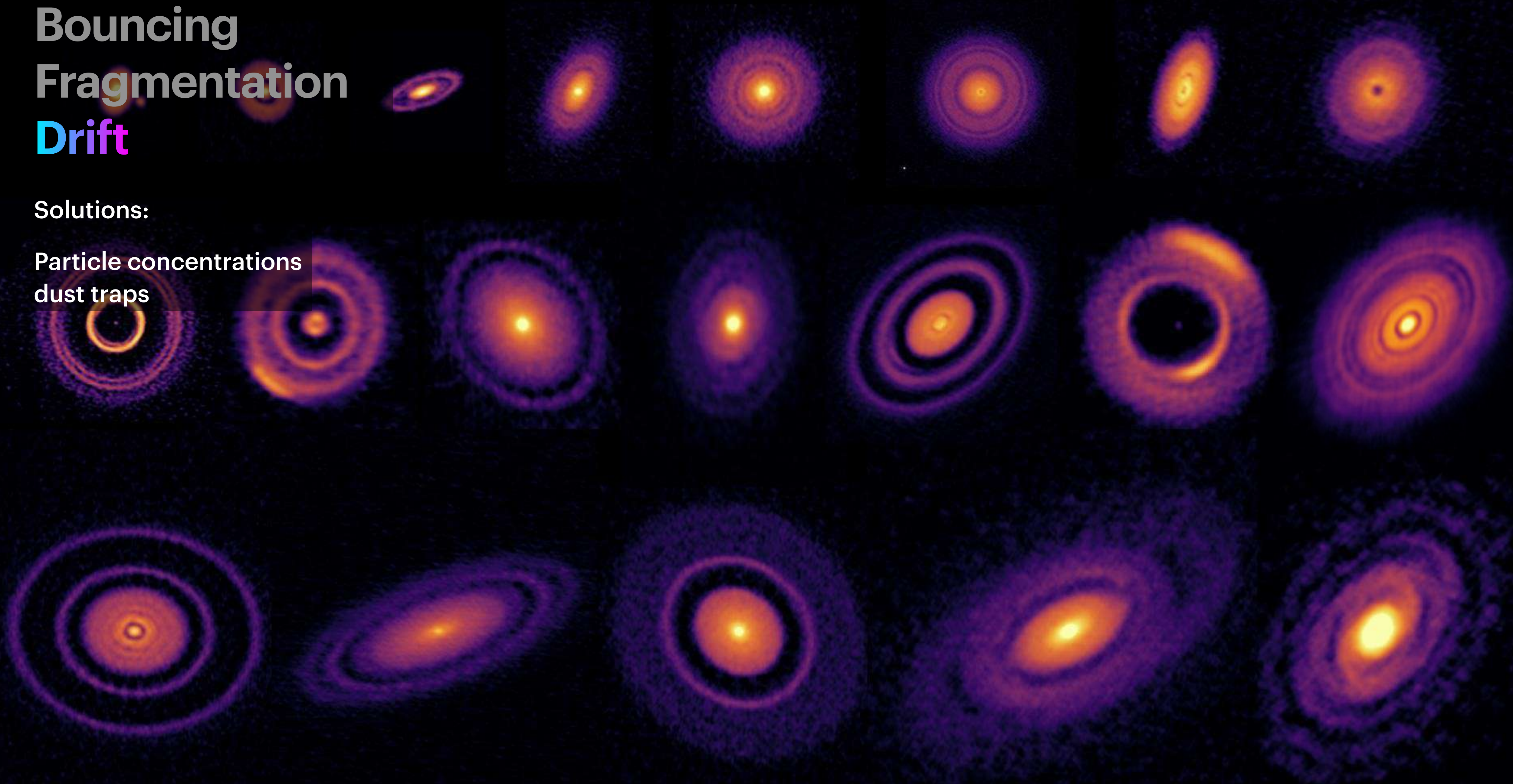


FIG. 21 Illustration of how local pressure maxima within a disk could concentrate solid bodies, forming a ring in this idealized axisymmetric example. Local pressure maxima might arise as a consequence of turbulence within the disk.

Bouncing Fragmentation Drift

Solutions:

Particle concentrations
dust traps



Bouncing Fragmentation Drift

Solutions:

Particle concentrations
dust traps

Vortex / dust trap

HD 142527 visto por ALMA
(Casassus et al. 2013)

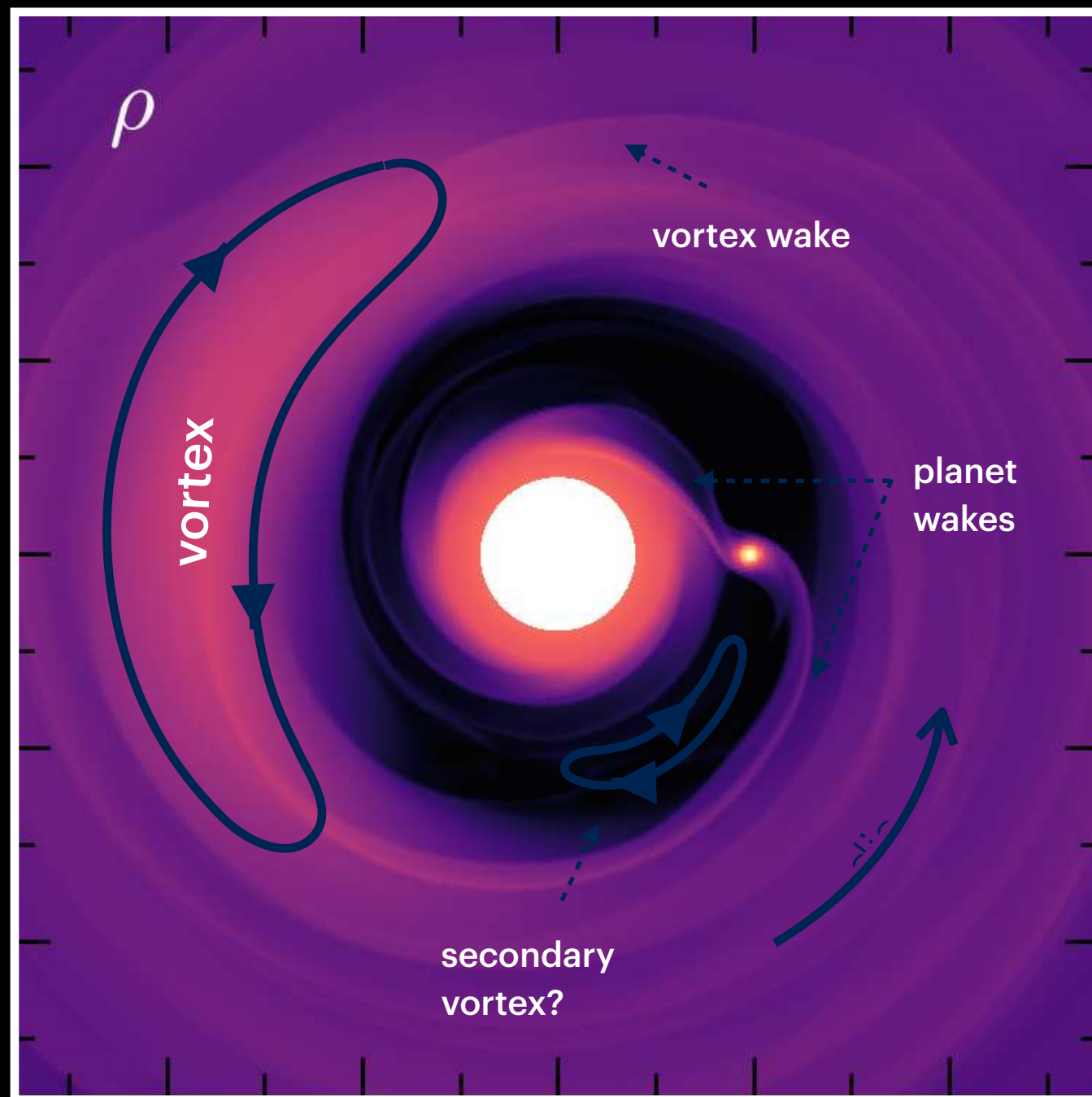


HD142527 is actually a circumbinary disk, with an inner binary in a polar orbit (Price et al. 2018)

Bouncing Fragmentation Drift

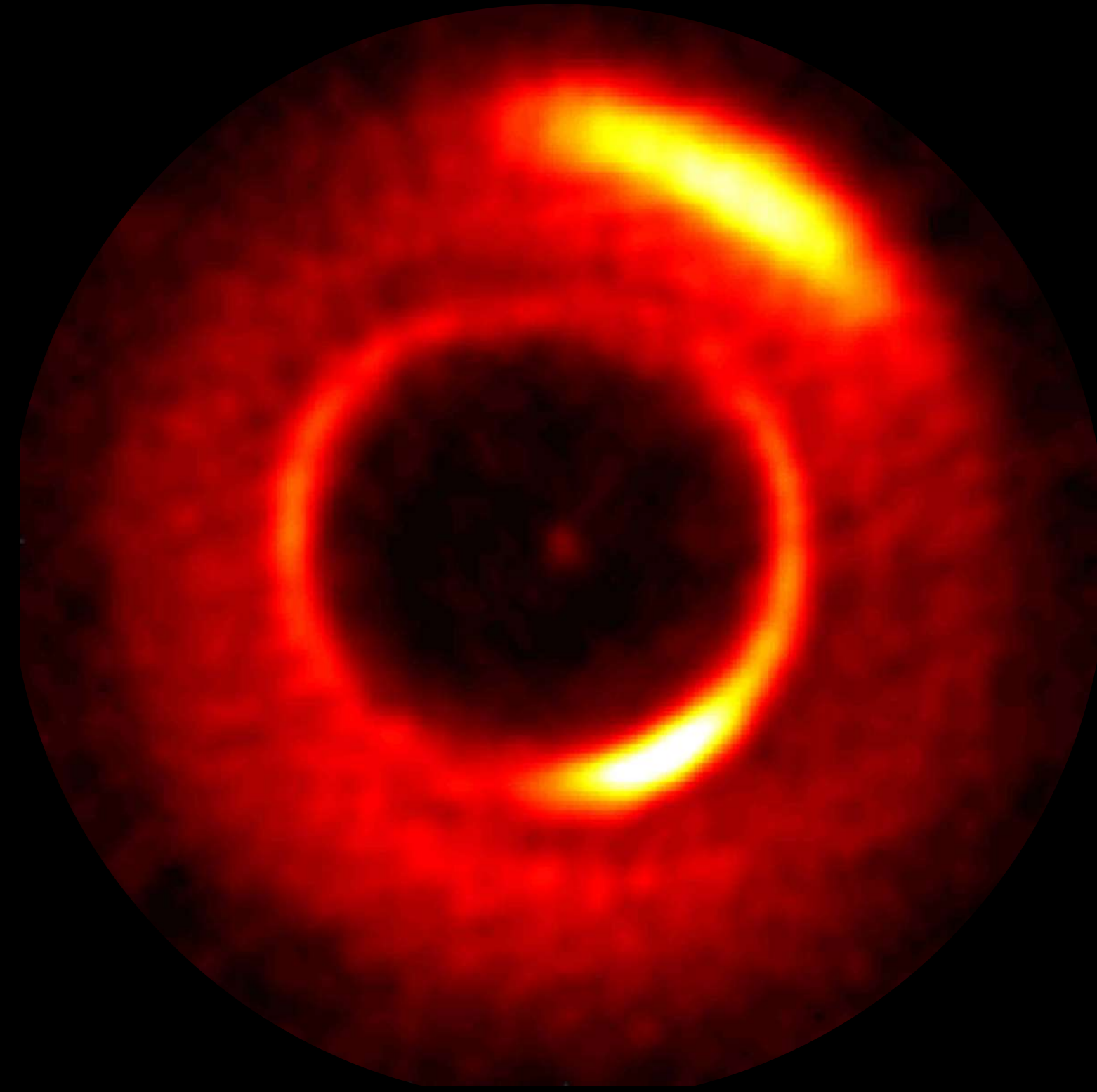
Solutions:

Particle concentrations
dust traps

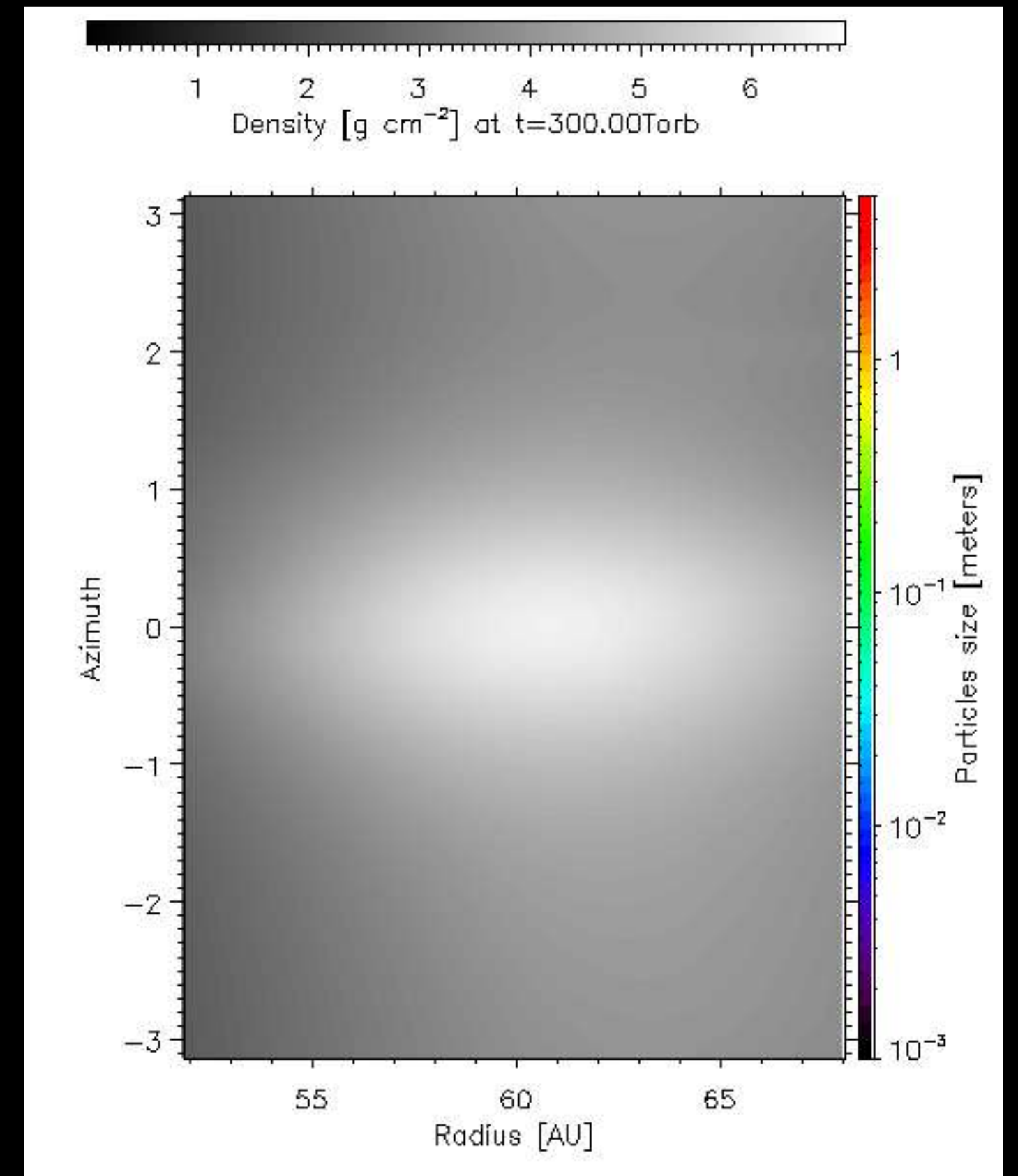


Pérez et al. 2018

Azimuthal dust trap / RWI vortex



Dong et al. 2018, Marino et al. 2015,
Baruteau et al. (2018)



Baruteau & Zhu (2016)