Proyectos – Física Computacional IV

Astrofísica con mención en ciencia de datos

Profesor: *Omar Fernández Olguín* – omar.fernandez.o@usach.cl

Ayudante: *Nicolás Campos Agusto* – nicolas.campos.a@usach.cl

Departamento de Física, Facultad de Ciencias, Universidad de Santiago de Chile

14 de enero de 2026

Migración Orbital de Partículas en Discos Protoplanetarios Huecos

En este proyecto se estudiará la migración de partículas sólidas inmersas en un disco protoplanetario que rodea a una estrella central. El disco presenta un **hueco interno**, es decir, no hay gas dentro de un radio $r_{\min}$ alrededor de la estrella. El gas ejerce dos efectos principales sobre las partículas:

1. Su **gravedad**, que contribuye al potencial total del sistema.
2. Su **arrastre**, que tiende a acelerar o frenar a las partículas hasta que se adapten a la velocidad local del gas.

El objetivo es simular de forma numérica cómo estas partículas evolucionan radialmente en el disco debido a estas interacciones.

Etapas del proyecto:

1. **Cálculo del potencial gravitatorio del disco y estrella**
   - Considerar una densidad de masa radial del disco, expresada en función del radio $r = \sqrt{x^2 + y^2}$:
   $$\rho_{\text{disk}}(r) = \begin{cases} 0 & r < r_{\min}, \\ \rho_0 \left(\frac{r_0}{r}\right)^p & r \geq r_{\min}, \end{cases}$$
   donde $r_{\min}$ define el hueco interno y p es un índice de densidad radial.
   - La estrella central se modela como un núcleo compacto uniforme de radio $R_\star$:
   $$\rho_\star(x,y) = \begin{cases} \dfrac{M_\star}{\pi R_\star^2}, & \sqrt{x^2+y^2} \leq R_\star \\ 0, & \sqrt{x^2+y^2} > R_\star \end{cases}$$
   - Resolver la ecuación de Poisson en 2D cartesianas considerando ambas contribuciones:
   $$\nabla^2 \Phi(x,y) = 4\pi G \left[\rho_\star(x,y) + \rho_{\text{disk}}(x,y)\right]$$
   usando diferencias finitas.
   - Se obtiene el potencial $\Phi(x,y)$ en toda la malla.
2. **Cálculo del campo gravitatorio**
   - El campo se obtiene mediante:
   $$\mathbf{g}(x,y) = -\nabla\Phi(x,y) = -\left(\frac{\partial \Phi}{\partial x}, \frac{\partial \Phi}{\partial y}\right)$$
   - Discretizar el gradiente usando diferencias finitas centradas.
   - Este campo incluye tanto la gravedad de la estrella central como la del disco.
3. **Integración de las trayectorias de las partículas**
   - Cada partícula sigue la segunda ley de Newton con arrastre:
   $$\frac{d\mathbf{v}}{dt} = \mathbf{g}(x,y) - \gamma(\mathbf{v} - \mathbf{v}_{\text{gas}}(r)), \quad \frac{d\mathbf{r}}{dt} = \mathbf{v}.$$
   - El coeficiente de arrastre γ puede ser constante.
   - La velocidad del gas se define como un campo azimutal en función de r:
   $$\mathbf{v}_{\text{gas}}(r) = v_0 \left(\frac{r_0}{r}\right)^\alpha \hat{\boldsymbol{\phi}}, \quad \hat{\boldsymbol{\phi}} = \left(-\frac{y}{r}, \frac{x}{r}\right)$$
   - Integrar usando métodos numéricos como `Runge-Kutta 4` o `Verlet`.
   - Registrar la evolución radial y las trayectorias de las partículas.
4. **Visualización**
   - Mapas del potencial $\Phi(x,y)$ y del campo $\mathbf{g}(x,y)$.
   - Trayectorias de partículas mostrando la migración radial en el disco.
   - Comparación de diferentes perfiles de densidad del disco, radios del hueco interno y valores de arrastre.

Nota: Este modelo simplificado no considera la presión del gas ni efectos hidrodinámicos complejos; el objetivo es centrarse en la interacción gravitatoria y el arrastre básico para estudiar la migración de partículas.