

Simulación Disco de Acreción Delgado usando FLASH

Pinzón A.F. Zhahid P. Parales

Departamento de Física, Universidad Nacional de Colombia
apinzonh@unal.edu.co, jpenato@unal.edu.co, jparales@unal.edu.co

7 de marzo de 2025

Índice

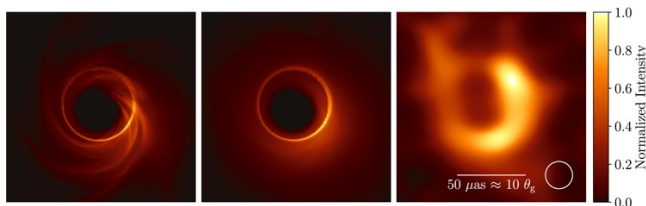
- 1 Introducción
- 2 Marco Teórico
- 3 Simulación
- 4 Análisis y Resultados
- 5 Conclusiones

Introducción

- La astrofísica computacional permite estudiar bajo principios físicos los detalles de la astrofísica observacional, generando un entorno experimental virtual.
- El estudio de los discos de acreción es fundamental para comprender fenómenos en sistemas como agujeros negros, estrellas de neutrones y binarias.
- Nuestro trabajo se centra en la simulación de un disco de acreción delgado utilizando el código **FLASH**.

Motivación

- La modelación de discos de acreción requiere el uso de la mecánica de fluidos y la integración de parámetros astrofísicos.
- Ejemplo de observación relevante: la imagen del disco de *Sagitario A** (1), el agujero negro supermasivo del centro de la Vía Láctea.



- Un disco de acreción es una estructura de gas formada cuando materia del medio interestelar es atraída por un objeto central (estrella, agujero negro, estrella de neutrones) y se organiza en un plano orbital.
- Durante el proceso, la materia pierde parte de su energía y momento angular, lo que permite que se acomode en órbitas estables.
- Según Hirsch (2), bajo condiciones generales, el gas de acreción adopta una dinámica orbital descrita por la tercera ley de Kepler, cumpliendo la relación:

$$P_e^2 = \frac{4\pi^2 r^3}{GM_*},$$

donde r es el radio, G la constante gravitacional y M_* la masa del objeto central.

- La acumulación de materia en el disco incrementa la densidad (ρ) y la temperatura (T), favoreciendo la aparición de torques viscosos (\mathcal{G}) entre capas adyacentes.
- Los torques viscosos permiten disipar energía y redistribuir el momento angular (J) mientras la materia se desplaza hacia el objeto central, emitiendo radiación en el proceso.
- Uno de los principales observables es la luminosidad del disco (L), relacionada con la conservación de masa y momento angular. Esta permite determinar parámetros como ρ y la velocidad radial (v_r)
- La aproximación de disco fino ,donde la altura $H \ll r$, simplifica el análisis teórico y numérico del sistema.

- En el régimen kepleriano, la materia se mueve con una velocidad angular (Ω_K) definida por:

$$\Omega_K = \sqrt{\frac{GM_*}{r^3}},$$

lo que establece la base para describir la dinámica del disco.

- Se introduce la densidad superficial (Σ) de esta manera:

$$\Sigma = \int_{-H}^H \rho dz.$$

- La evolución de la masa en el disco se rige por la ecuación de conservación de masa para la acreción como:

$$\frac{\partial \Sigma}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \Sigma v_r) = 0.$$

- Para que la materia pueda acercarse al objeto central es necesario que pierda parte de su momento angular, lo que se facilita mediante la acción de torques viscosos.
- La conservación del momento angular se expresa como:

$$\frac{\partial(r^3 \Sigma \Omega_K)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial r} (r^3 \Sigma v_r \Omega_K) = \frac{1}{2\pi} \frac{\partial \mathcal{G}}{\partial r}.$$

- Usando la conservación de masa, la ecuación de momento angular se reduce a:

$$r \Sigma v_r \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \Omega_K) = \frac{1}{2\pi} \frac{\partial \mathcal{G}}{\partial r}.$$

- Equilibrio gravitatorio-radiativo en la región interna del disco:

$$\frac{GM_* m_H}{r^2} = \frac{\sigma_T L}{4\pi r^2 c^2},$$

donde la fuerza gravitatoria se equilibra con la presión de radiación, m_H es la masa del hidrógeno, y σ_T es la sección eficaz de Thomson para dispersión de electrones.

- Esto nos lleva a la Luminosidad límite de Eddington (L_{edd}):

$$L_{\text{edd}} = \frac{4\pi GM_* m_p c}{\sigma_T},$$

que representa la máxima luminosidad permitida antes de que la presión de radiación domine e interrumpa el flujo de acreción, donde m_p es la masa del protón.

Marco Teórico - Parte 6

- La energía liberada por la acreción, que surge de la disminución de la energía potencial gravitacional del material que se aproxima al objeto central, se cuantifica mediante la luminosidad de acreción L_{acc} como:

$$L_{acc} = \frac{GM_* \dot{M}}{R_*},$$

donde \dot{M} es la tasa de acreción y R_* el radio del objeto.

- Teniendo en cuenta que $L_{acc} \leq L_{edd}$, se deduce la tasa máxima de acreción (\dot{M}_{edd}):

$$\dot{M}_{edd} = \frac{4\pi R_* m_p c}{\sigma_T}.$$

- Según (3), la tasa de acreción en un disco delgado es:

$$\dot{M} = -2\pi R \Sigma v_R$$

- Esta formulación ilustra cómo el flujo radial del gas impulsa la transferencia de masa hacia el objeto central, resaltando la interrelación entre la dinámica local del disco y el mecanismo viscoso que redistribuye el momento angular.

Marco Teórico - Fases del Disco Delgado

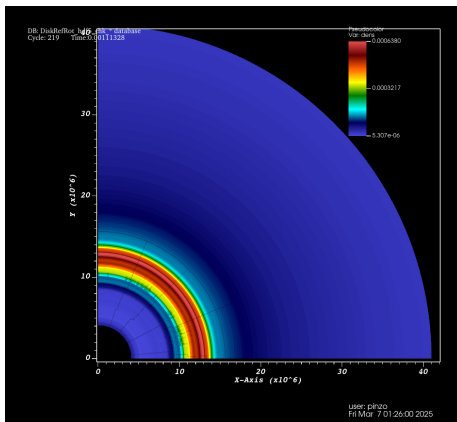
En un disco delgado se pueden identificar tres regiones con distintos regímenes de rotación:

- **Fase kepleriana:** En la zona externa, el gas orbita de manera predecible bajo la influencia dominante de la gravedad central.
- **Región sub-kepleriana:** A medida que el material se acerca al centro, la presión interna y la viscosidad alteran la distribución de velocidades, desviando la rotación del régimen kepleriano.
- **Fase de cuerpo rígido:** En la parte más interna, todas las capas rotan a la misma velocidad angular, estableciendo un estado de rotación uniforme.

Este esquema es esencial para comprender la transición en la dinámica del disco y la disipación de energía, tal como se describe en Hirsch (2).

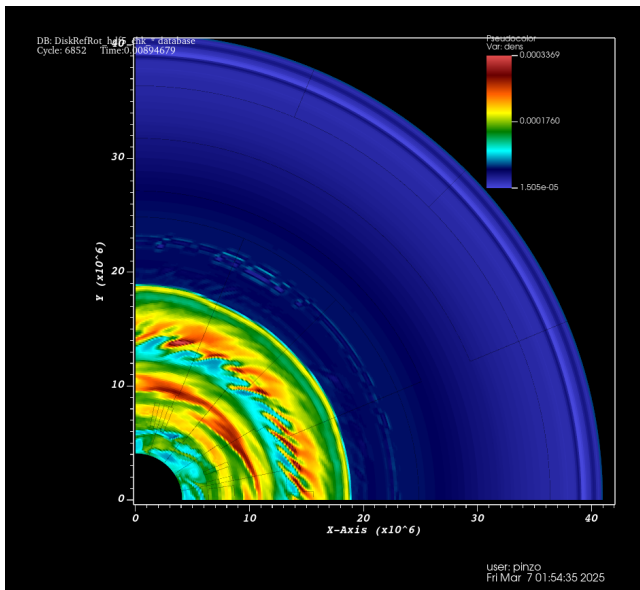
- Se utilizó el modelo base de *DoubleMachReflection* para representar la interacción del gas con diferentes condiciones de frontera en la región interna del disco.
- Se estudiaron dos escenarios: uno correspondiente a una estrella de neutrones (NS) y otro a un agujero negro (BH).
- En el caso de la NS, se aplica una condición de borde reflectivo que se implementa a través del factor $\Omega = v_\phi / R$.
- Para el BH, se define una frontera de tipo Outflow donde la materia es absorbida de acuerdo a la variación de masa \dot{M} .

Ejemplo de Simulación - Estrella de Neutrones



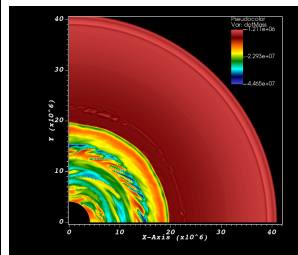
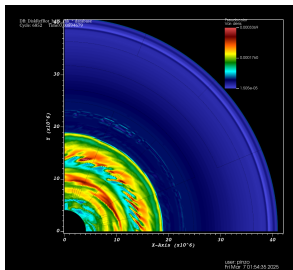
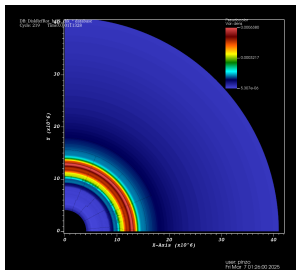
- Estado inicial: Se observa una expansión del gas hacia afuera.
- La solución adoptada fue asignar una velocidad inicial positiva al gas para evitar la acumulación excesiva sobre la NS.

Ejemplo de Simulación - Estado Evolucionado

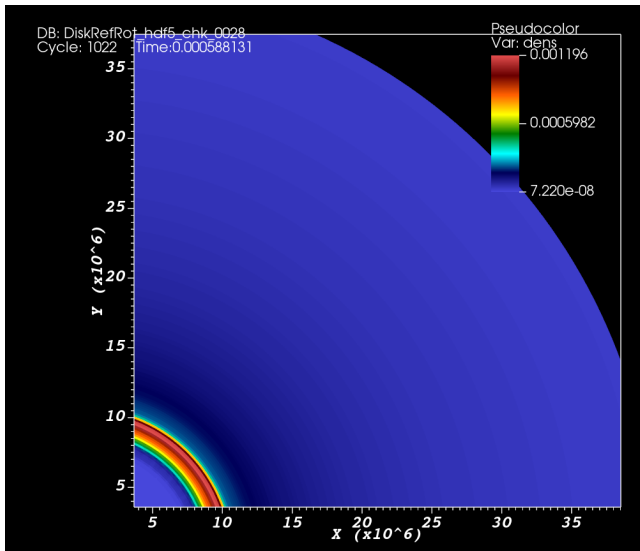


Análisis y Resultados - Estrella de Neutrones

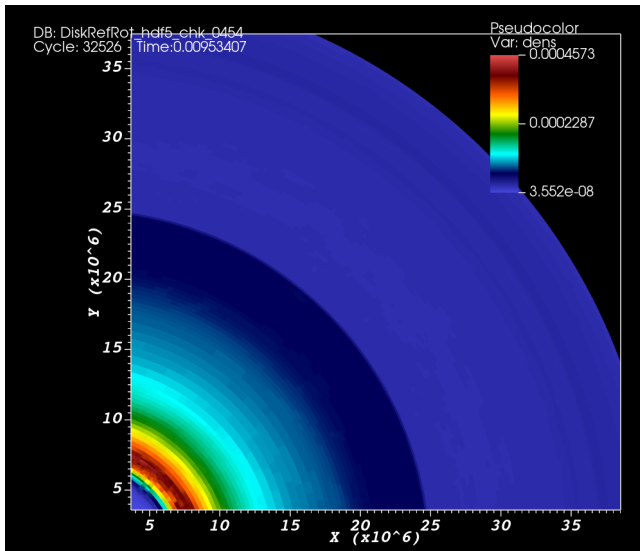
- Se observan variaciones en la presión y la densidad que permiten identificar las distintas regiones del disco.
- La variación de la tasa de masa \dot{M} según el radio R muestra la formación de anillos en el disco.



Simulación-Agujero negro

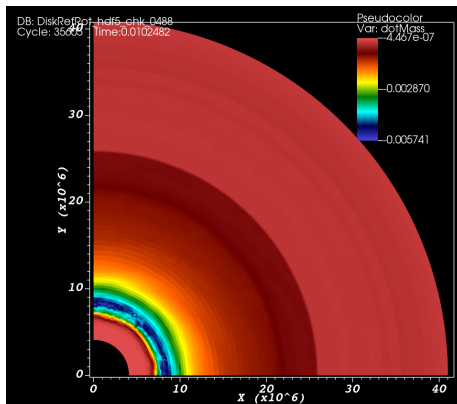


Agujero Negro- Estado evolucionado



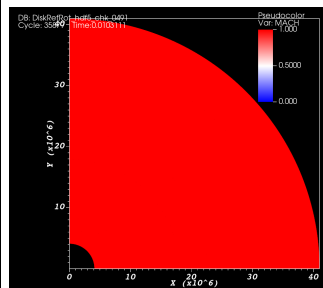
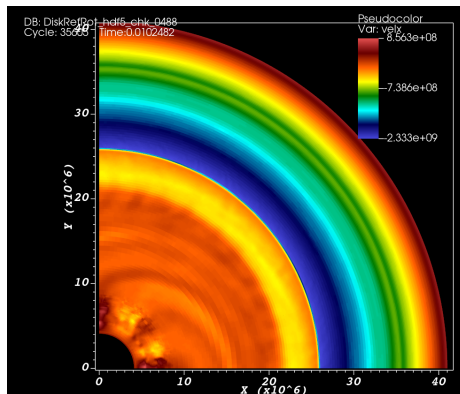
Análisis y Resultados - Agujero Negro

- En el escenario del agujero negro se establece una condición de frontera de tipo Outflow, donde la materia es absorbida.
- Los resultados preliminares indican que la variación en la tasa de masa y la evolución de la densidad son coherentes con las predicciones teóricas.

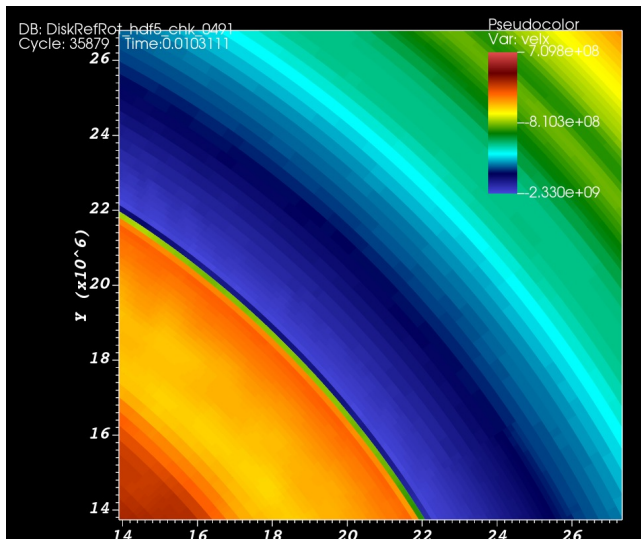


Análisis y Resultados - Agujero Negro

Se ve un comportamiento interesante de la velocidad angular. Numero de Mach en toda la superficie del disco.



Análisis y Resultados - Agujero Negro



Conclusiones

- **Modelación y Simulación:** La simulación del disco de acreción delgado usando FLASH permite explorar de forma numérica la dinámica interna y el transporte de masa en sistemas astrofísicos.
- **Equilibrio Hidrodinámico:** Las condiciones impuestas por la luminosidad límite y la tasa de acreción máxima son fundamentales para mantener la estabilidad del disco.
- **Fases del Disco:** La identificación de las fases kepleriana, sub-kepleriana y de cuerpo rígido proporciona una herramienta clave para interpretar los procesos de disipación de energía y la evolución del sistema.

- [1] E. H. T. Collaboration, "First sagittarius a event horizon telescope results. i. the shadow of the supermassive black hole in the center of the milky way," *Astrophysical Journal Letters*, vol. 930, no. 2, p. L12, 2022.
- [2] H. D. Hirsch and C. G. Bernal, "Introdução aos discos de acreção: Um estudo teórico e numérico." Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Rio Grande, 2023.
- [3] J. Frank, A. R. King, and D. J. Raine, *Accretion Power in Astrophysics*. Cambridge: Cambridge University Press, 3rd ed., 2002.