

Visualización de la Sombra y Lente Gravitacional en la Métrica de Schwarzschild

Maxi

Estudiante de Astronomía - Pontificia Universidad Católica de Chile

2025

Resumen

Este reporte presenta una simulación numérica de la apariencia óptica de un agujero negro de Schwarzschild inmerso en un campo estelar de fondo. El código implementado combina la determinación exacta del parámetro de impacto crítico (la “sombra”) con una aproximación de campo débil para la deflexión de la luz de las estrellas circundantes. Se discuten los fundamentos relativistas que dan origen al anillo de fotones y se describe el algoritmo de trazado de rayos inverso utilizado para la generación de la imagen.

1. Introducción

La predicción más visual de la Relatividad General es la existencia de agujeros negros y su capacidad para curvar la trayectoria de la luz. Para un observador distante, un agujero negro no es simplemente un disco oscuro; presenta una estructura definida por la última órbita estable de fotones, conocida como la *sombra* del agujero negro, rodeada por un anillo brillante de luz acumulada. Este trabajo busca replicar visualmente este fenómeno mediante técnicas computacionales.

2. Marco Teórico

2.1. La Métrica de Schwarzschild

El espacio-tiempo alrededor de una masa esférica estática y sin carga se describe mediante la métrica de Schwarzschild. En unidades naturales ($G = c = 1$), el elemento de línea es:

$$ds^2 = - \left(1 - \frac{2M}{r}\right) dt^2 + \left(1 - \frac{2M}{r}\right)^{-1} dr^2 + r^2 d\Omega^2 \quad (1)$$

donde $r_s = 2M$ es el radio de Schwarzschild (radio del horizonte de eventos).

2.2. Geodésicas Nulas y la Sombra

La luz sigue geodésicas nulas ($ds^2 = 0$). Analizando el potencial efectivo para fotones, se encuentra que existe una órbita circular inestable para la luz en $r_{ph} = 1,5r_s$ (o $3M$).

Cualquier fotón que pase cerca del agujero negro con un parámetro de impacto b menor a un valor crítico b_{crit} será capturado por el horizonte de eventos. Este valor crítico define el tamaño aparente de la sombra vista por un observador en el infinito:

$$b_{crit} = \frac{3\sqrt{3}}{2} r_s \approx 2,598 r_s \quad (2)$$

En la simulación, esta región ($b < b_{crit}$) se renderiza como oscuridad absoluta, representando la ausencia de flujo luminoso proveniente de detrás del horizonte.

2.3. Lente Gravitacional en Campo Débil

Para los rayos de luz que pasan lejos del agujero negro ($b \gg b_{crit}$), la curvatura del espacio-tiempo actúa como una lente. El ángulo de deflexión $\hat{\alpha}$ en la aproximación de campo débil está dado por:

$$\hat{\alpha} \approx \frac{4M}{b} = \frac{2r_s}{b} \quad (3)$$

Esta fórmula se utiliza en el código para desplazar la posición aparente de las estrellas de fondo, creando el efecto de distorsión característico (lente gravitacional) alrededor de la sombra.

3. Implementación Computacional

El software fue desarrollado en Python utilizando las librerías NumPy y Matplotlib. El algoritmo principal se basa en la técnica de *Inverse Ray-Shooting* (Trazado de Rayos Inverso):

1. **Generación del Fondo:** Se crea proceduralmente un campo estelar sintético utilizando distribuciones aleatorias y Funciones de Dispersión de Punto (PSF) gaussianas para simular estrellas distantes.
2. **Mapeo de Lente:** Para cada píxel en el plano del observador (imagen), se calcula el parámetro de impacto b . Se aplica la deflexión $\hat{\alpha}$ para encontrar la coordenada original en el plano fuente ($\vec{\beta} = \vec{\theta} - \vec{\alpha}$).
3. **Determinación de la Sombra:** Se verifica la condición $b < b_{crit}$. Los píxeles que cumplen esta condición se establecen a valor cero (negro).
4. **Anillo de Fotones:** Se añade artificialmente un aumento de luminosidad en la región $|b - b_{crit}| < \epsilon$ para simular la acumulación de fotones que orbitan múltiples veces cerca de la esfera de fotones.

4. Resultados y Discusión

La imagen resultante <https://github.com/mmmaxii/ProyectosU-2025> muestra claramente la "sombra circular", que es significativamente más grande que el horizonte de eventos geométrico (2,6 veces el radio de Schwarzschild). Alrededor de esta sombra, el campo estelar se curva, creando arcos tangenciales debido al efecto de lente gravitacional, consistente con las predicciones teóricas de la Relatividad General para un observador distante.

Agradecimientos

El desarrollo de este proyecto y la comprensión de los fenómenos físicos subyacentes fueron posibles gracias a los conocimientos adquiridos en el curso de **Relatividad y Gravitación**, impartido por la Facultad de Física de la Pontificia Universidad Católica de Chile.

Asimismo, agradezco la disponibilidad de material audiovisual educativo de libre acceso en plataformas como YouTube, que complementaron mi proceso de aprendizaje autodidacta. Finalmente, se reconoce la asistencia de herramientas de Inteligencia Artificial en la optimización técnica de los scripts de visualización en Python, lo que facilitó la implementación de los modelos matemáticos descritos.