



ANÁLISIS NUMÉRICO DE LA INTERACCIÓN DEL SISTEMA AGUJERO NEGRO-CAMPO ESCALAR EN UN ESPACIO-TIEMPO DINÁMICO

Jennyfer Camila Acevedo Muñoz
Director: Fabio Duván Lora Clavijo, M.Sc, Ph.D.
(GIRG)

CONTENIDO

01

Motivación

Importancia

02

Herramientas

Formalismo 3+1 y ecuaciones ADM

03

Modelo en simetría esférica

04

Osiris

Código de trazado inverso de rayos

05

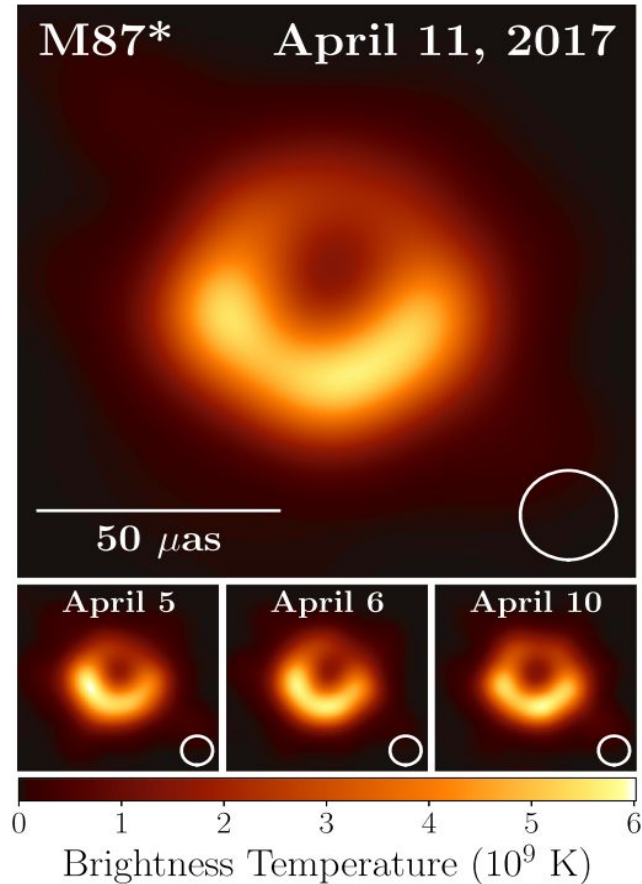
Resultados

Sombra y lente gravitacional

06

Conclusiones

¿QUÉ SABEMOS?



Los BH son objetos compactos que poseen una concentración de masa tan grande que generan campos gravitacionales muy intensos.

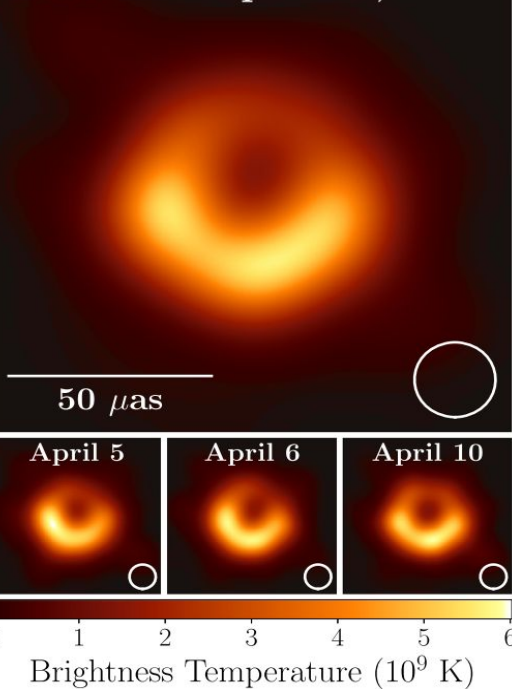
Según la teoría GR no existe un límite o restricción de qué tan grande debe ser la masa de estos objetos.

BH estelares, intermedios y supermasivos

La presencia de los agujeros negros supermasivos en el centro de las galaxias parecer ser un hecho bien establecido.

Observaciones

M87* April 11, 2017



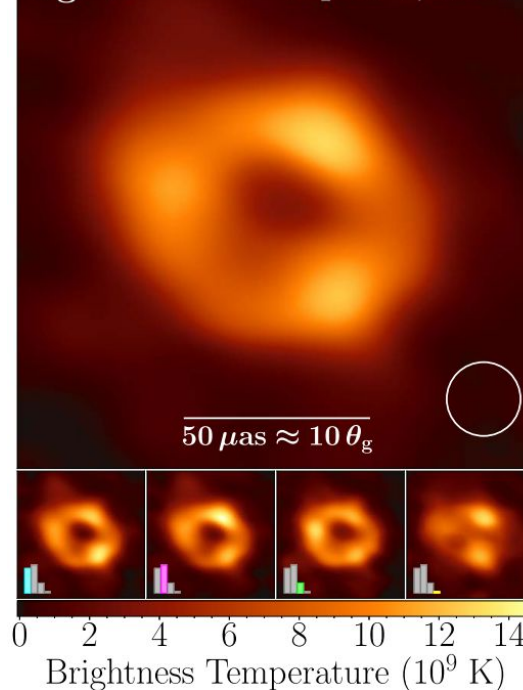
EHT Collaboration (2019). First M87 Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the Supermassive Black Hole. *The Astrophysical Journal Letter*, 875(1).

En 2019, el proyecto EHT logró obtener la primera imagen del BH que se encuentra en el centro de la galaxia M87.

El 12 de mayo de 2022 la Event Horizon Telescope Collaboration publicó la primera imagen de Sagitario A*

Detección de la señal de onda gravitacional en el año 2019, de lo que podría ser la fusión de dos agujeros negros.

Sgr A* April 7, 2017

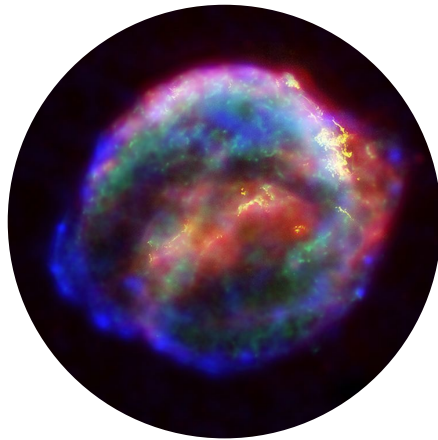


EHT Collaboration (2022). First Sagittarius A* Event Horizon Telescope results. I. The shadow of the supermassive black hole in the center of the Milky Way. *The Astrophysical Journal Letters*, 930(2), L12.

¿QUÉ NO SABEMOS?

¿Cómo se formaron dichos agujeros negros?

¿De qué manera crecieron hasta llegar a tener las masas que se estiman hoy en día? Permite plantear escenarios astrofísicos para su nacimiento y evolución

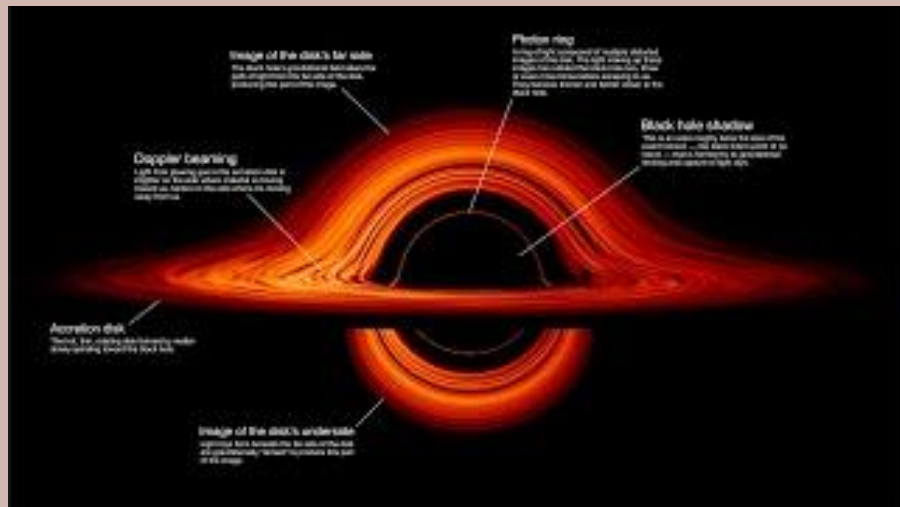


**BH estelares.
Colapso gravitacional**



BH supermasivos e intermedios

Una posible explicación a los SMBH es que estos evolucionan a partir un agujero negro semilla, los cuales ganan masa debido a un **proceso de acreción**.



¿Qué componentes podría estar acretando?

1. Materia bariónica

Materia oscura



Peirani, S., & de Freitas Pacheco, J. A. (2008). Dark matter accretion into supermassive black holes. *Physical Review D*, 77(6), 064023.

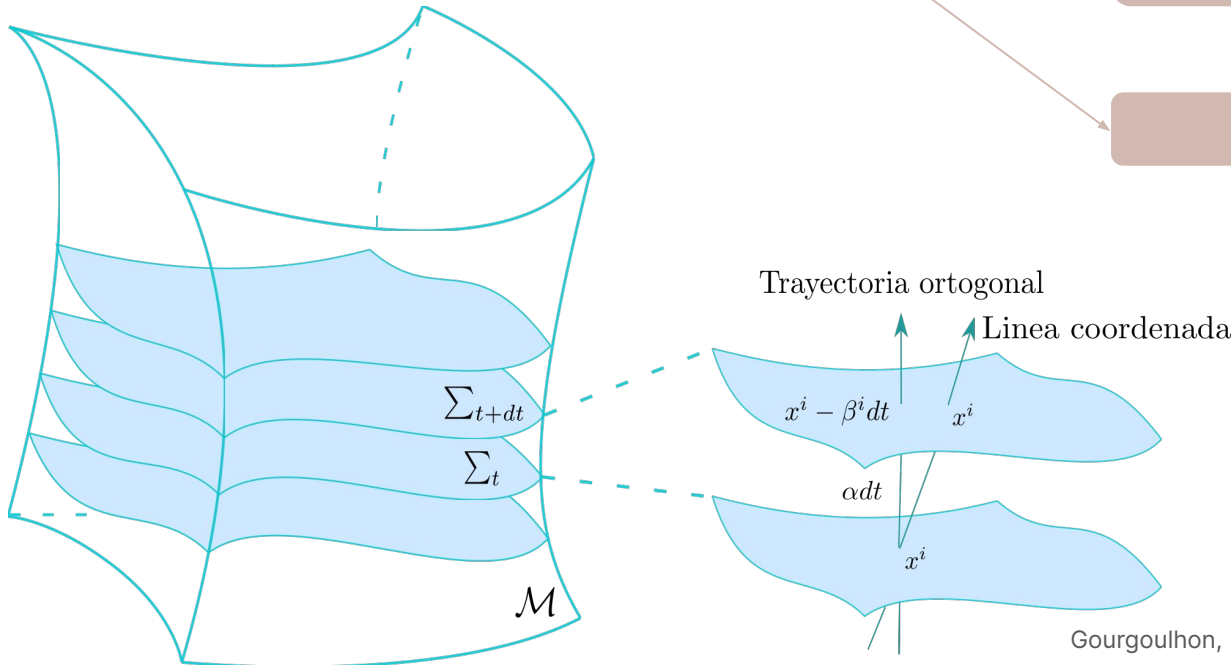
Ligo and Virgo Collaboration (2020). GW190521: a binary black hole merger with a total mass of $150 M_{\odot}$. *Physical review letters*, 125(10), 101102.

HERRAMIENTAS: FORMALISMO 3+1

La base geométrica en la cual está construido el formalismo 3+1 es una foliación del espacio-tiempo por una familia de hipersuperficies uniparamétricas.

Espacio-tiempo globalmente hiperbólico

Superficies de Cauchy

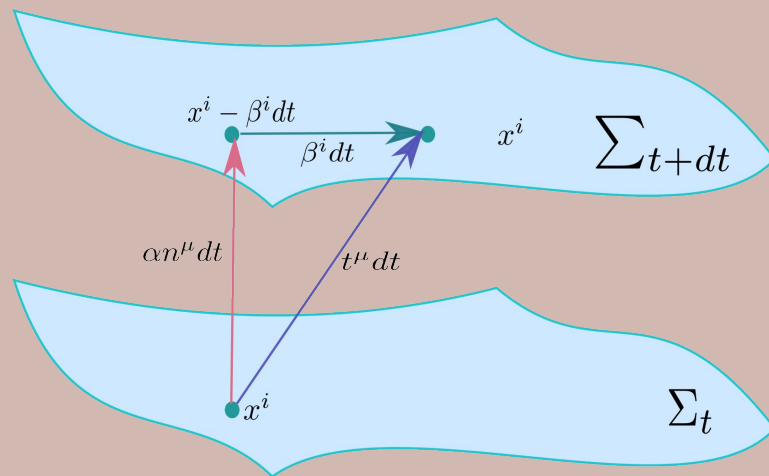


Utilidad del formalismo

Permite formular el problema como un problema de Cauchy.

Separa el espacio del tiempo en las ecuaciones de Einstein.

Ingredientes



Métrica inducida, γ_{ij}

Función lapso, α

Vector de corrimiento, β^i

ECUACIONES ADM

Ecuaciones de evolución

$$\partial_t \gamma_{ij} = -2\alpha K_{ij} + D_i \beta_j + D_j \beta_i \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \partial_t K_{ij} = & \beta^k \partial_k K_{ij} + K_{ki} \partial_j \beta^k + K_{kj} \partial_i \beta^k - D_i D_j \alpha \\ & + \alpha \left[{}^{(3)}R_{ij} + K K_{ij} - 2K_{ik} K^k_j \right] + 4\pi\alpha [\gamma_{ij} (S - \rho) - 2S_{ij}] \end{aligned} \quad (2)$$

Ecuaciones de ligadura

$$R + K^2 - K_{ij} K^{ij} = 16\pi\rho \quad (3)$$

$$D_j (K^{ij} - \gamma^{ij} K) = 8\pi j^i \quad (4)$$

Funciones Gauges

$$\alpha \quad (5)$$

$$\beta^i \quad (6)$$

EVOLUCIÓN DEL CAMPO ESCALAR

Densidad lagrangiana

$$\mathcal{L}_\phi = -\frac{1}{2}g^{\mu\nu} (\partial_\mu\phi) (\partial_\nu\phi) - V(\phi) \quad (7)$$

Potencial

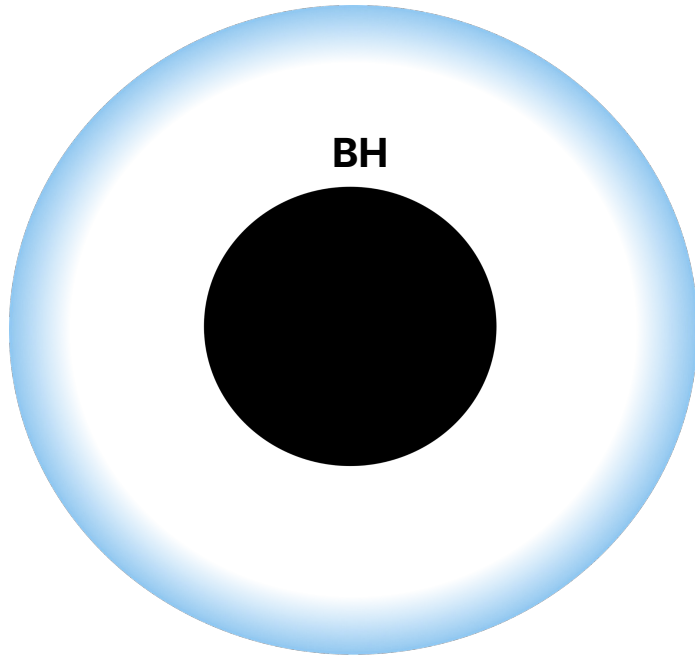
$$V(|\phi|^2) = \frac{m^2}{2}|\phi|^2 + \frac{m^2}{2}\lambda|\phi|^4. \quad (8)$$

Ecuación Klein-Gordon

$$\square\phi - 2V(|\phi|^2), \phi = 0 \quad (9)$$

MODELO EN SIMETRÍA ESFÉRICA

Campo escalar



- Se asume un ansatz en simetría esférica para las cantidades
- Se asume un perfil del campo escalar como

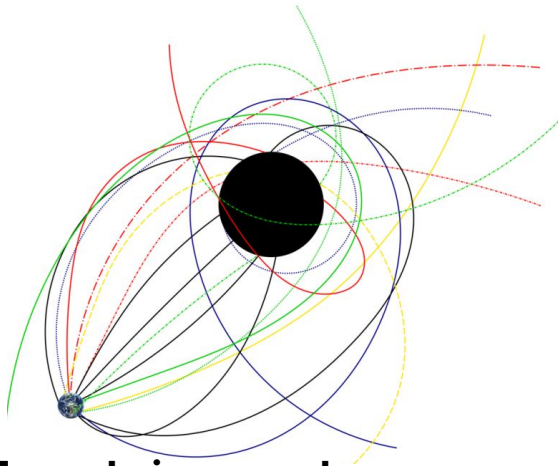
$$\phi(r) = A \frac{\cos(kr)}{r} e^{-(r-r_0)^2/\sigma^2} \quad (10)$$

- Funciones gauges: Condición generalizada de Eddington-Finkelstein y condición para el vector de corrimiento.

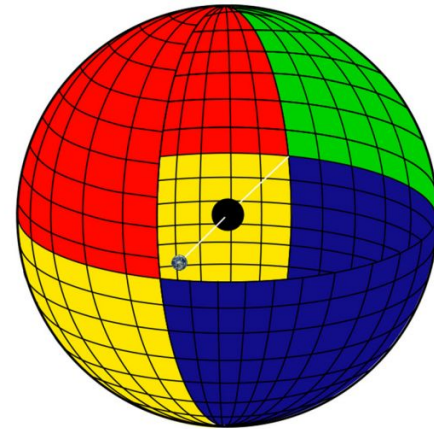
OSIRIS

- Permite calcular geodésicas nulas alrededor de objetos compactos. Utiliza el método de trazado inverso de rayos.
- Incluye efectos relativistas como: lente gravitacional, desplazamiento al rojo.
- **En este proyecto Osiris se extiende para espacio-tiempos dinámicos.**

Velásquez-Cadavid, J. M., Arrieta-Villamizar, J. A., Lora-Clavijo, F. D., Pimentel, O. M., & Osorio-Vargas, J. E. (2022). OSIRIS: a new code for ray tracing around compact objects. *The European Physical Journal C*, 82(2), 1-12.

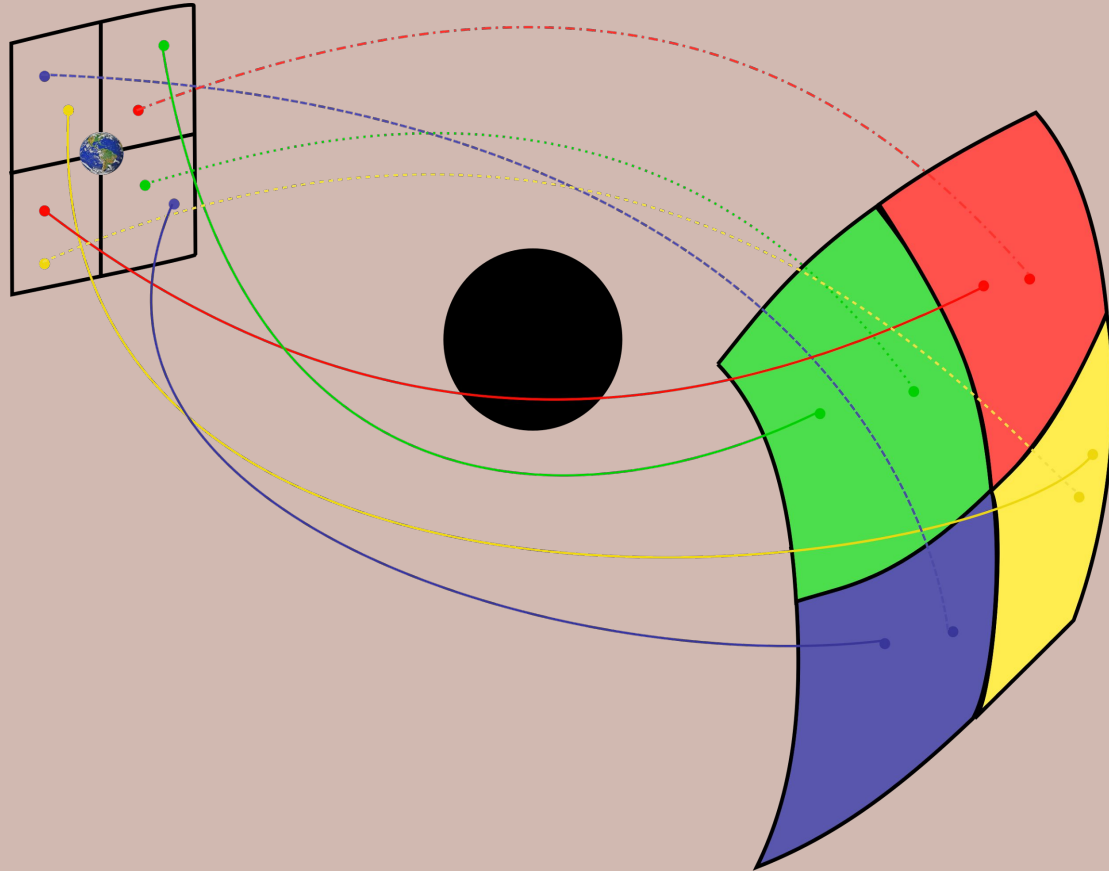


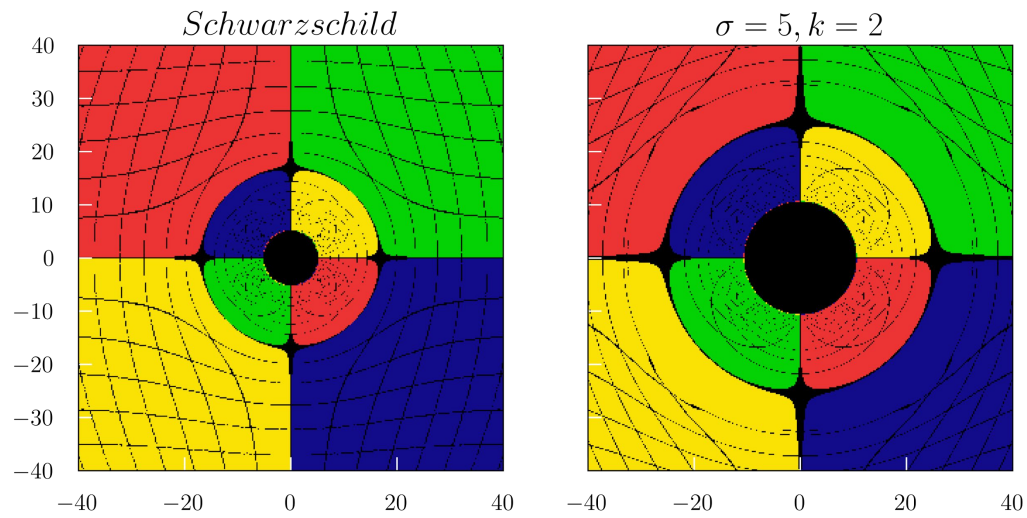
Trazado inverso de rayos



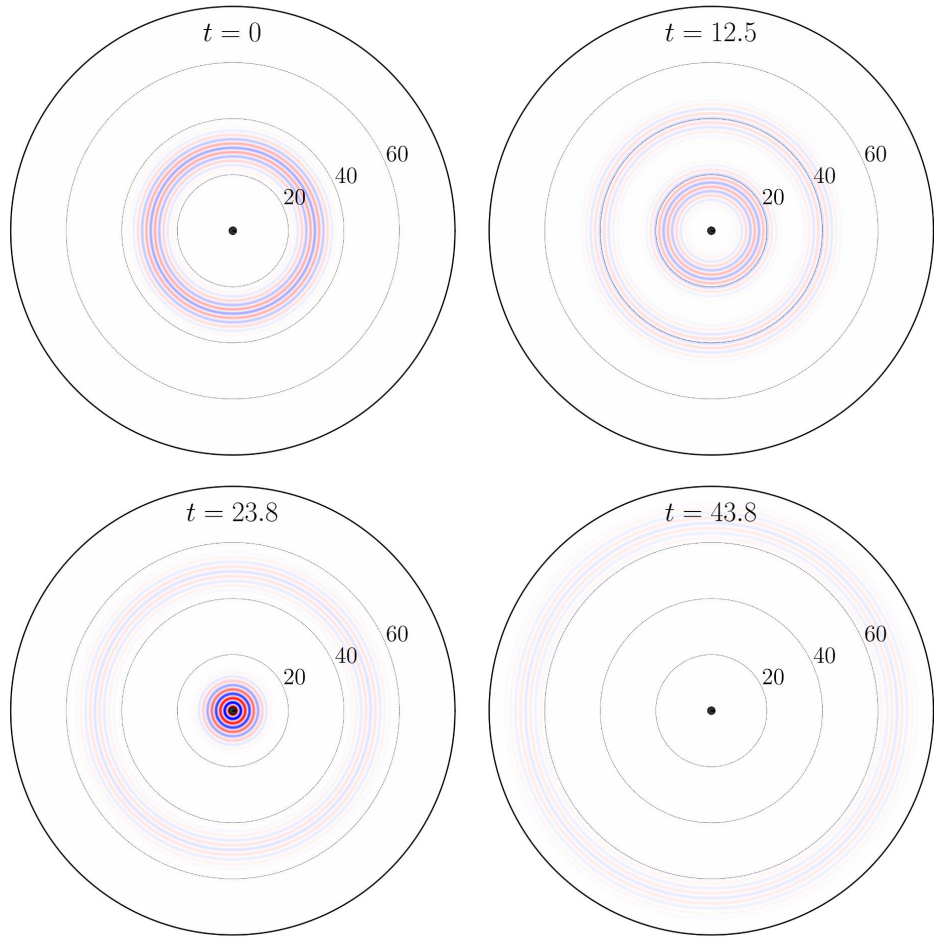
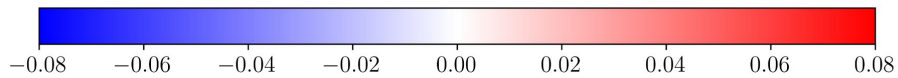
Esfera celeste

Deflexión de la luz





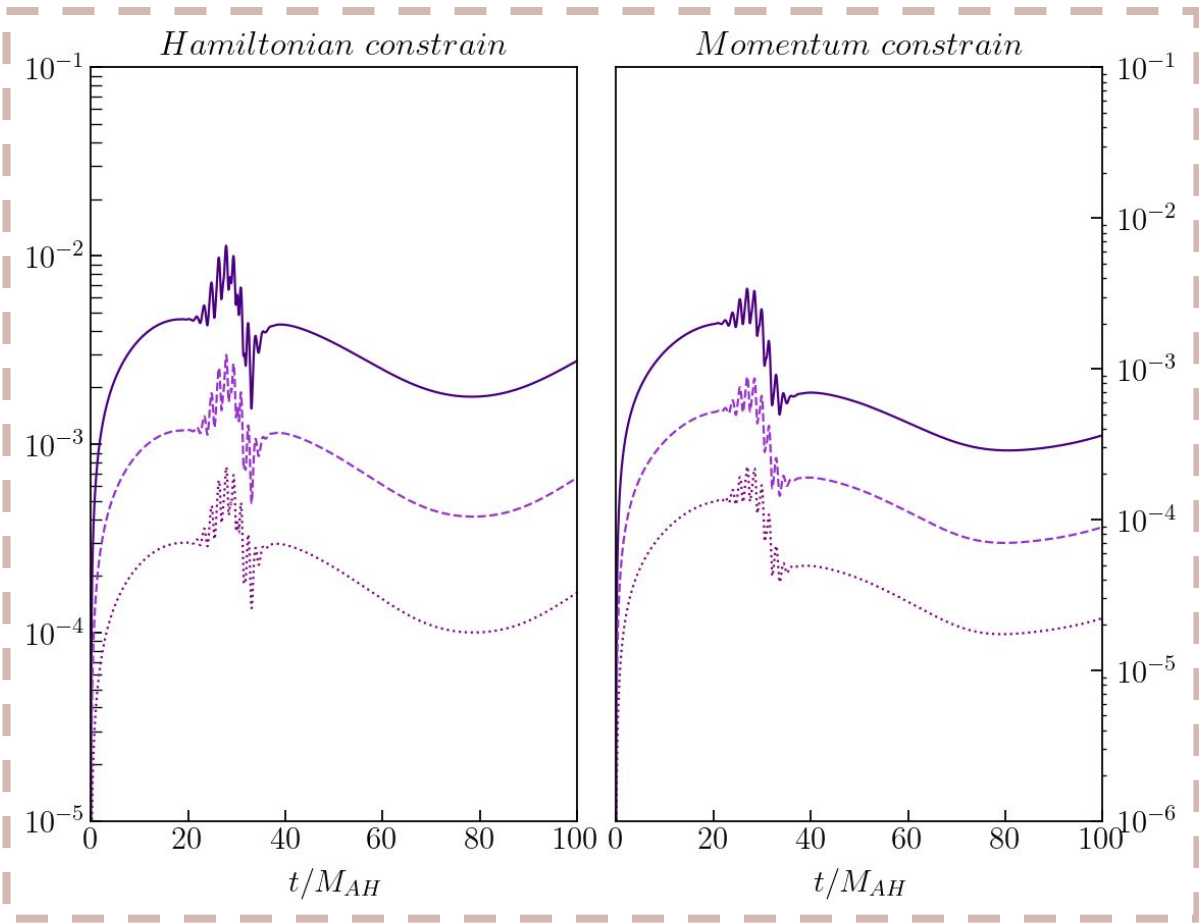
RESULTADOS



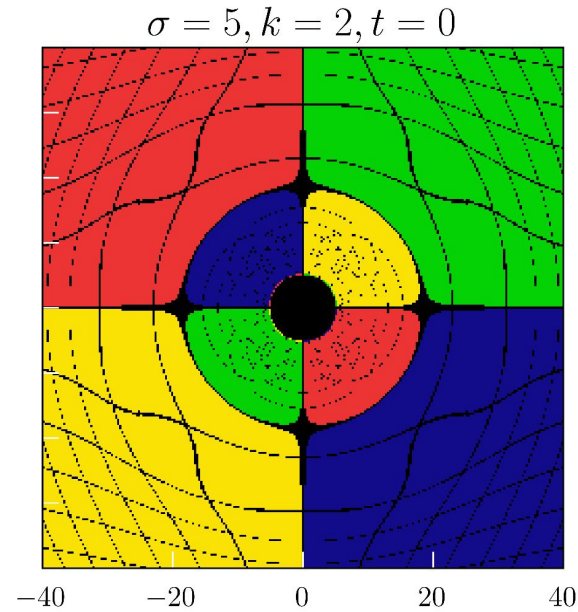
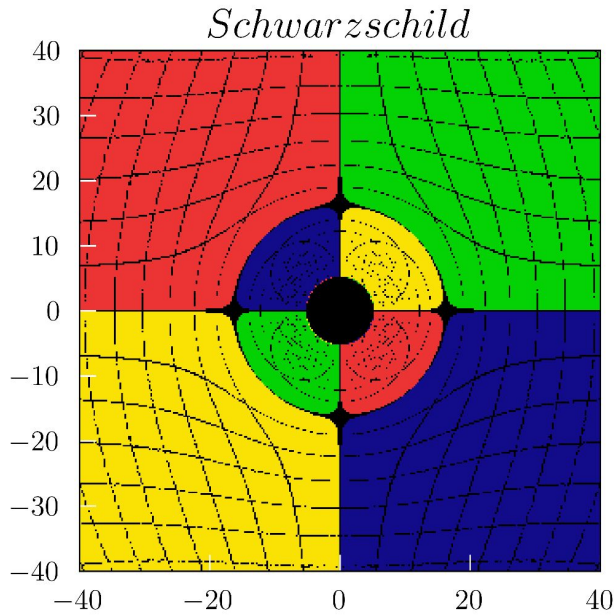
Comportamiento del SF

El pulso inicial ubicado en $r=30$ se divide en dos. Un pulso se mueve hacia el agujero negro, el otro se mueve hacia afuera.

Gráfica correspondiente a instantáneas del campo escalar con $\sigma = 5$, $k = 2$ y $A = 0,8$.



Convergencia del código

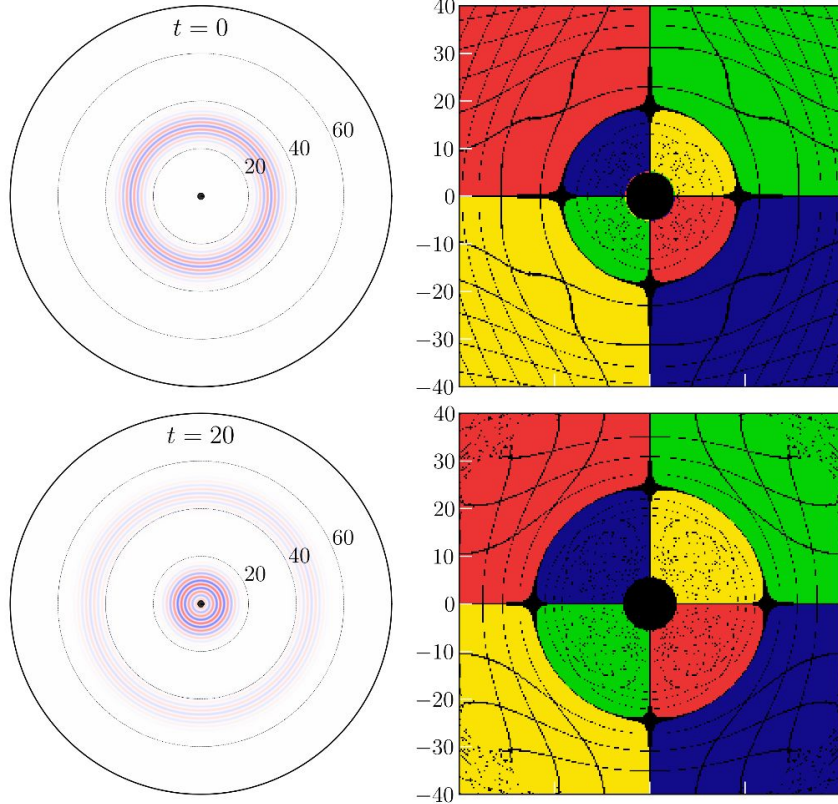


↓
Aproximadamente 1.04 veces más grande que el radio de Schwarzschild.

$$r_{ers} = 16.7$$

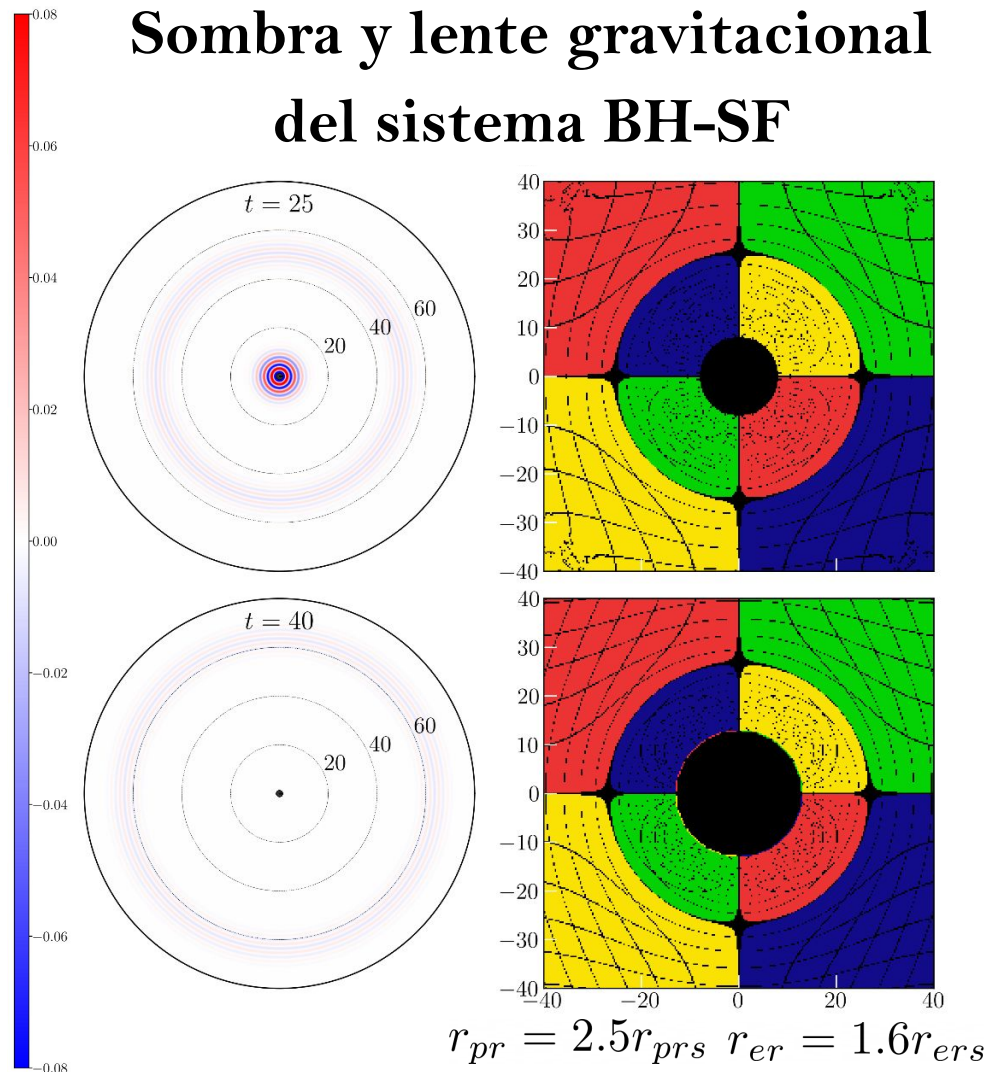
$$r_{er} = 1.15 r_{ers} \rightarrow \text{Aproximadamente 1.15 veces más grande que el anillo de Einstein para Schwarzschild.}$$

Sombra y lente gravitacional del sistema BH-SF

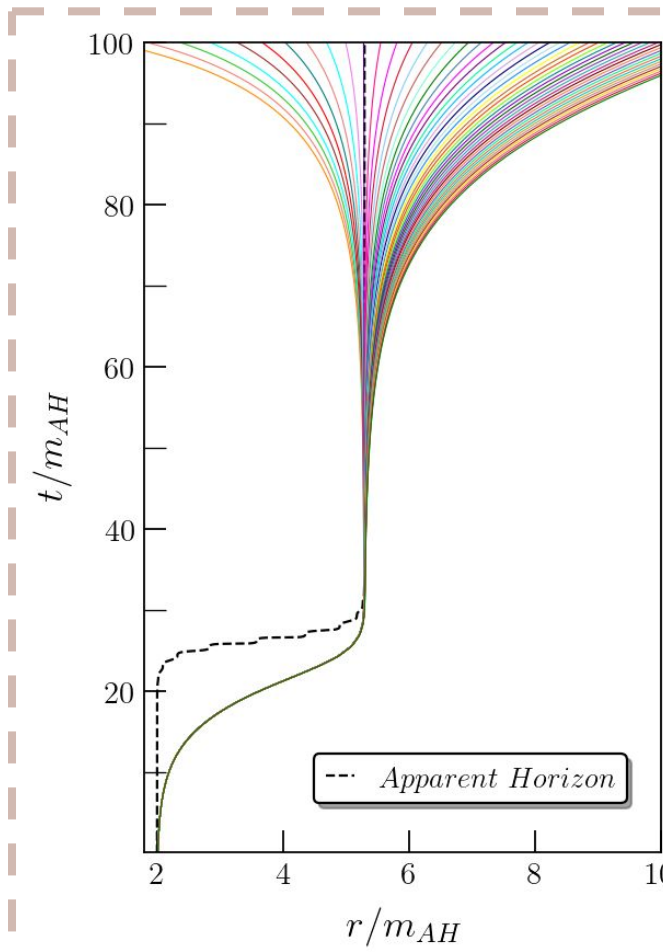


Se aprecian dos anillos de Einstein en la figura.

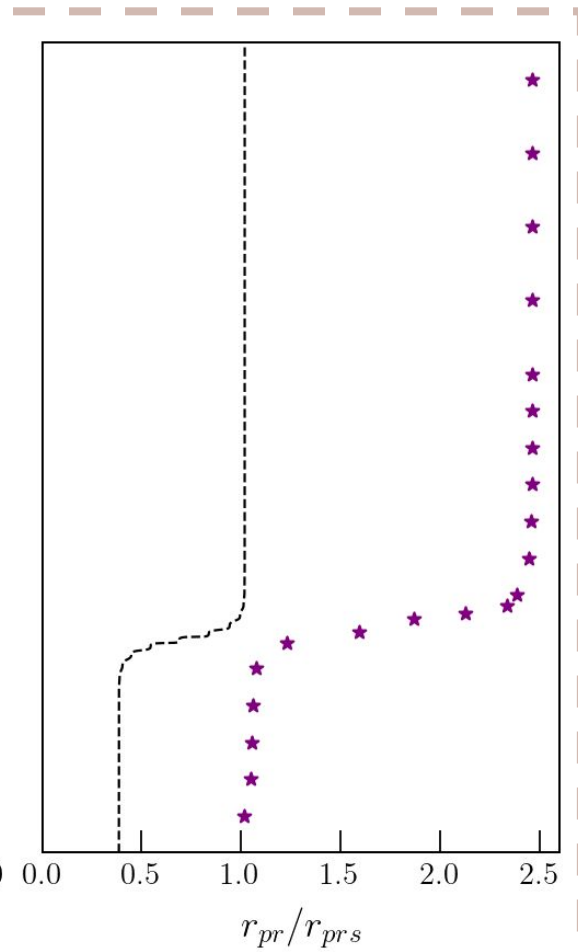
El tamaño del shadow y el anillo de Einstein aumentan hasta 2,5 y 1,6 veces sus valores iniciales, respectivamente.



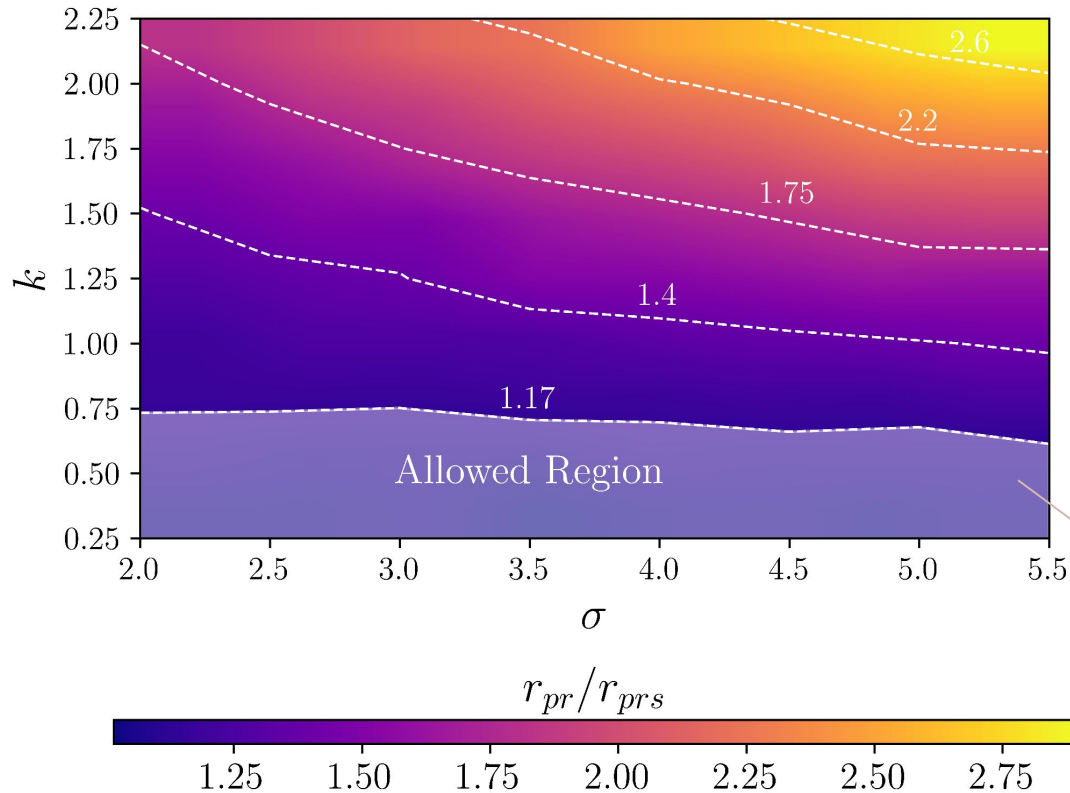
Izquierda: Evolución del horizonte de eventos.



Derecha: Crecimiento del anillo de fotones.



Crecimiento del anillo de fotones para diferentes configuraciones del SF.



Para M87*:
 $4.31M \leq r_{pr} \leq 6.08M$

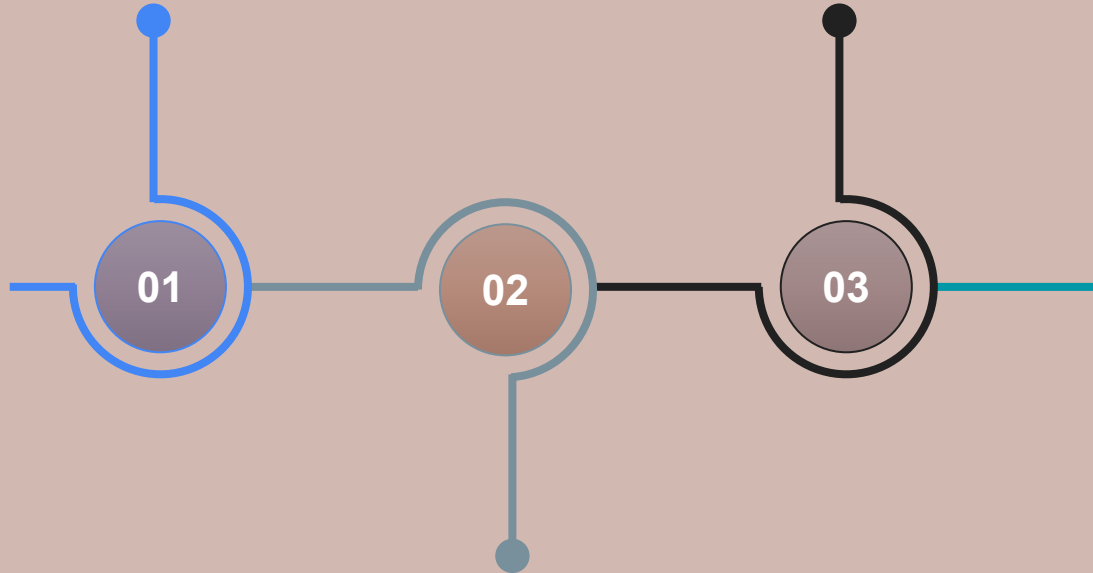
Comparando con M87*, esta es la región permitida. Es decir, el SF debe tener números de onda pequeños.

Radio final de los anillos de fotones para diferentes configuraciones del campo escalar. La región permitida corresponde a una comparación con el BH M87*.

CONCLUSIONES

Se modeló la dinámica del sistema agujero negro-campo escalar en un espacio-tiempo dinámico.

Se analizó el proceso de acreción del campo escalar en términos del ancho del paquete y el número de onda.

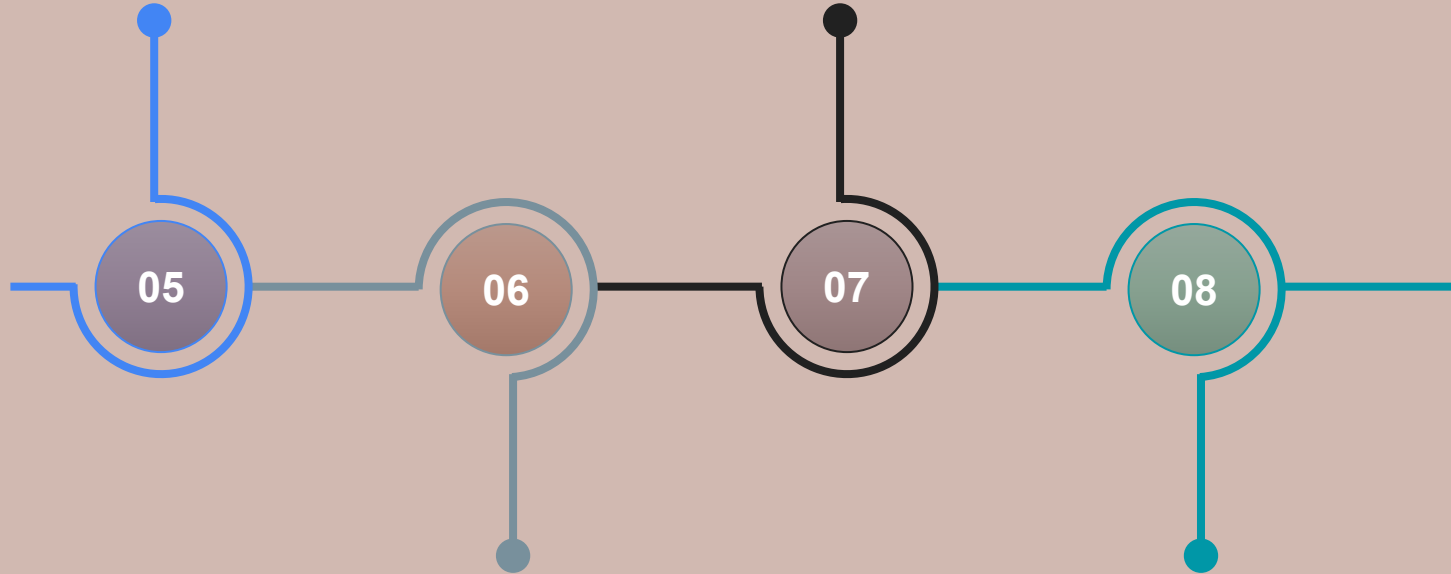


Se hizo uso de un código en simetría esférica que permite solucionar el sistema de ecuaciones.

CONCLUSIONES

Se confirmó el buen comportamiento del sistema a partir de realizar la evolución del horizonte de eventos.

El tamaño de la esfera de fotones puede aumentar casi 3 veces en comparación con Schwarzschild.



Se realizó una extensión de OSIRIS para espacio-tiempos dinámicos. Se utilizó para medir el shadow del agujero negro en presencia del campo escalar.

Comparando con M87*, los valores de k deben ser pequeños.

A cosmic scene featuring a glowing ring of light, possibly a ringed planet or a nebula, set against a dark starry background. A small, dark planet is visible in the distance. The text "GRACIAS POR SU ATENCIÓN" is overlaid in the bottom left corner.

**GRACIAS POR SU
ATENCIÓN**