

Más allá del siglo de Einstein: Relatividad General en la frontera de la ciencia





- Formulada por Einstein en 1915 como una teoría geométrica de la gravedad.
- Reemplaza la fuerza gravitacional de Newton por curvatura del espacio-tiempo.
- Las masas y energías le dicen al espacio-tiempo cómo curvarse, y la curvatura le dice a las masas cómo moverse.

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$



- **Geometría diferencial:** variedad lorentziana, métrica $g_{\mu\nu}$, conexión.
- **Ecuaciones de campo:** relación entre geometría y energía.
- **Soluciones exactas:**
 - Schwarzschild (agujeros negros no cargados ni rotantes)
 - Kerr (agujeros negros rotantes)
 - FLRW (cosmología homogénea e isotrópica)



Predicciones únicas de la RG

- Dilatación temporal gravitacional
- Desviación de la luz por cuerpos masivos
- Ondas gravitacionales
- Agujeros negros y horizontes de eventos
- Expansión del universo



RG como base para teorías futuras

- RG no es cuántica: se busca unificarla con la mecánica cuántica.
- Inspiración para:
 - Gravedad cuántica de lazos
 - Teoría de cuerdas
 - Gravedad fraccional o emergente
 - Modificaciones a gran escala ($f(R)$, campos escalares)



Dónde se usa hoy la RG

Área	Aplicación
Cosmología	Modelo de expansión del universo (Λ CDM)
Astrofísica	Agujeros negros, ondas gravitacionales
Tecnología	GPS, relojes atómicos
Teoría	Modelos alternativos, agujeros negros cuánticos



Planck

- Misión de la ESA (2009–2013), aún es el mapa más preciso del CMB.
- Observó anisotropías de temperatura y polarización en todo el cielo.
- Las interpretaciones usan RG: modelo FLRW, perturbaciones métricas y espectro de potencias.
- Establece valores para H_0 , Ω_m , Ω_Λ , entre otros.



Euclid

- Mide la expansión del universo y la distribución de materia oscura.
- Observa lentes gravitacionales débiles y clustering de galaxias.
- Las distorsiones ópticas se interpretan con la curvatura del espacio-tiempo (RG).
- Evalúa si la expansión acelerada requiere energía oscura o modificaciones de la gravedad.



James Webb Space Telescope

- Observa galaxias muy lejanas en el infrarrojo, hasta corrimientos al rojo $z > 10$.
- El corrimiento al rojo se interpreta mediante expansión relativista (modelo FLRW).
- También observa lentes gravitacionales fuertes: arcos y múltiples imágenes.
- Apoya el modelo de evolución del universo basado en RG.



LIGO–Virgo–KAGRA

- Detectan ondas gravitacionales de fusiones de agujeros negros y estrellas de neutrones.
- Funcionan como interferómetros láser que miden variaciones minúsculas de distancia.
- Las formas de onda detectadas concuerdan con simulaciones numéricas de RG.
- Permiten estudiar RG en el régimen altamente no lineal y dinámico.



LISA

- Conjunto de tres satélites en órbita heliocéntrica, separados por millones de km.
- Detectará ondas de baja frecuencia: fusiones de agujeros negros supermasivos, binarias compactas, etc.
- Permitirá estudiar RG en escalas cosmológicas y nuevos regímenes.
- En 2025, está en fase de desarrollo y prueba de tecnologías clave.



Intereses de Investigación

- Agujeros negros rotantes y estáticos en relatividad general y teorías modificadas.
- Agujeros de gusano atravesables y su viabilidad física.
- Estudio de soluciones analíticas y numéricas a las ecuaciones de campo.
- Caracterización de soluciones mediante herramientas observacionales y espectrales.



Soluciones Analíticas

- Derivación de soluciones exactas usando el método de **desacople gravitacional**:
 - Permite generar nuevas soluciones anisotrópicas a partir de configuraciones conocidas.
 - Aplicado con éxito a agujeros negros con **pelos genéricos** (escalares, vectores).
- Construcción de **agujeros de gusano** mediante técnicas de **embedding diagram**:
 - Se analiza la forma del espacio en secciones espaciales mediante inmersión en 3D.
 - Identifica cuellos y regiones atravesables con energía exótica o efectiva.



PHYSICAL REVIEW D **103**, 044020 (2021)

Gravitational decoupling for axially symmetric systems and rotating black holes

E. Contreras[†]

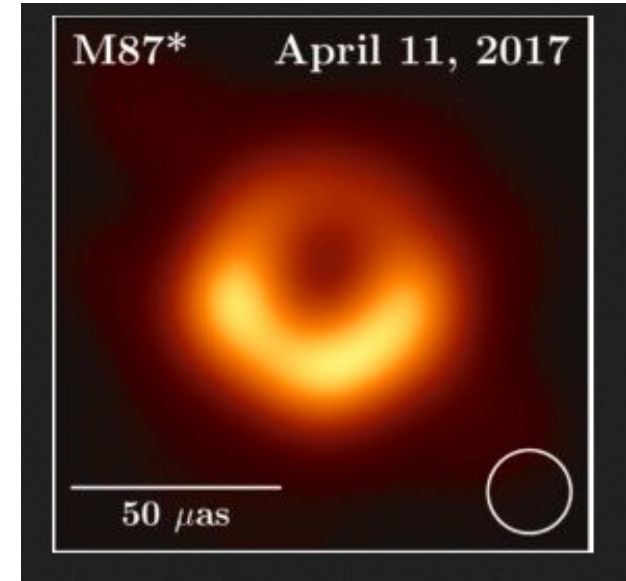
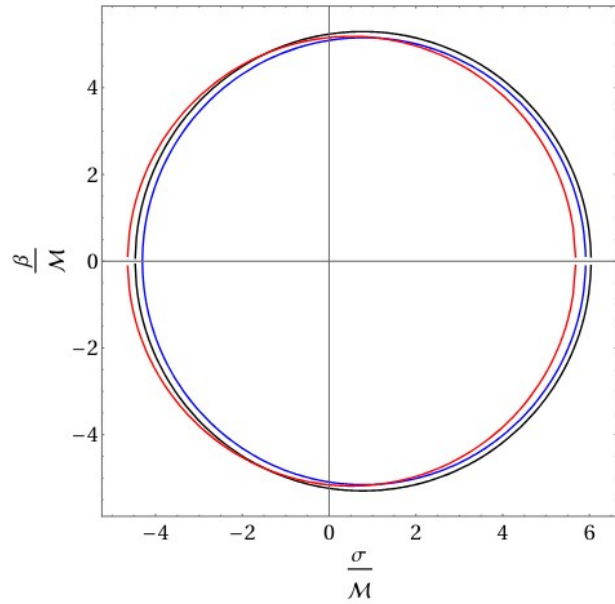
*Departamento de Física, Colegio de Ciencias e Ingeniería, Universidad San Francisco de Quito,
170901 Quito, Ecuador*

J. Ovalle^{*,}

*Research Centre of Theoretical Physics and Astrophysics, Institute of Physics,
Silesian University in Opava, CZ-746 01 Opava, Czech Republic*

R. Casadio[‡]

*Dipartimento di Fisica e Astronomia, Alma Mater Università di Bologna, 40126 Bologna, Italy
and Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Bologna, 40127 Bologna, Italy*





Soluciones Numéricas

- Implementación del **método de disparo (shooting method)**:
 - Técnica de integración numérica para problemas de valores en la frontera.
 - Se aplica a sistemas no lineales acoplados con condiciones físicas en el origen y el infinito.
 - Usado para encontrar **estrellas bosónicas** o **agujeros negros con pelo escalar**.
- Aplicación al estudio de la **escalarización espontánea**:
 - Fenómeno donde una solución trivial (sin campo escalar) se vuelve inestable.
 - Se generan soluciones con estructura escalar no trivial mediante ruptura espontánea de simetría.



- **Rompe la no-hair conjecture** de manera natural: se obtienen soluciones con pelo escalar estable, sin imponerlo ad hoc.
- Surge en teorías motivadas por la física fundamental: teorías escalares-tensoriales, teorías de dilatón, modelos de cuerdas, etc.
- Permite explorar nuevos regímenes de la gravedad **más allá de Einstein**, especialmente en contextos fuertes donde la Relatividad General podría fallar.
- Aparece también en **estrellas compactas**, como estrellas de neutrones o bosónicas, mostrando fenómenos de escalarización que podrían alterar sus propiedades macroscópicas.



Sistemas binarios con carga escalar

Cuando los objetos de una binaria tienen diferente carga escalar, se genera un momento dipolar no conservado.

Radiación dipolar escalar

Este momento dipolar produce radiación escalar adicional, más intensa que la cuadrupolar de GR, lo que acelera la pérdida de energía del sistema.

Consecuencias observacionales

Se espera un decaimiento orbital más rápido. Su no detección en binarias de púlsares impone límites fuertes a estas teorías.



Contents lists available at ScienceDirect

Physics of the Dark Universe

journal homepage: www.elsevier.com/locate/dark



Full length article

Spontaneous scalarization in Einstein-power-Maxwell-scalar models

M. Carrasco-H. ^{a,1}, N.M. Santos ^{b,c,1}, E. Contreras ^{a,*,1}

^a Departamento de Física, Colegio de Ciencias e Ingeniería, Universidad San Francisco de Quito (USFQ), Quito 170901, Ecuador

^b Departamento de Física, Instituto Superior Técnico - IST, Universidade de Lisboa - UL, Av. Rovisco Pais 1, 1049-001 Lisboa, Portugal

^c Center for Research and Development in Mathematics and Applications (CIDMA), Department of Mathematics, University of Aveiro, 3810-193 Aveiro, Portugal



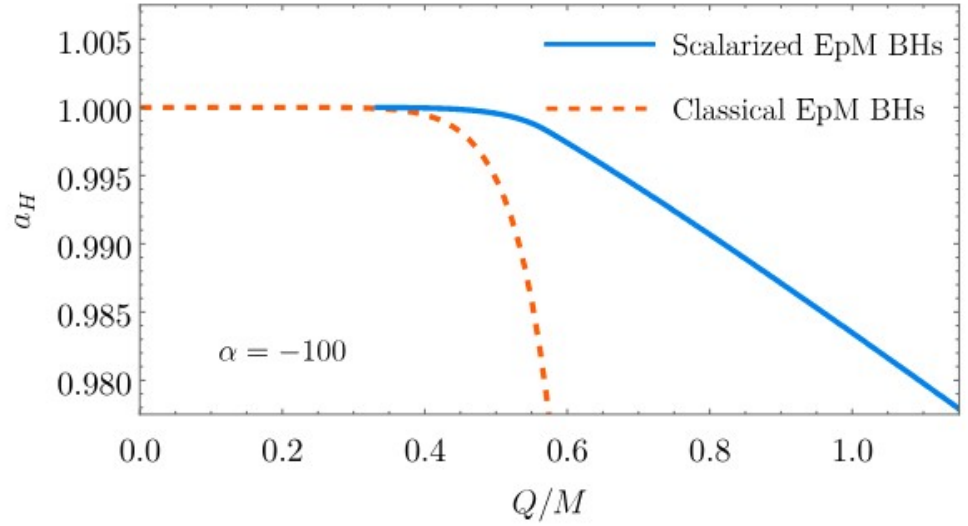
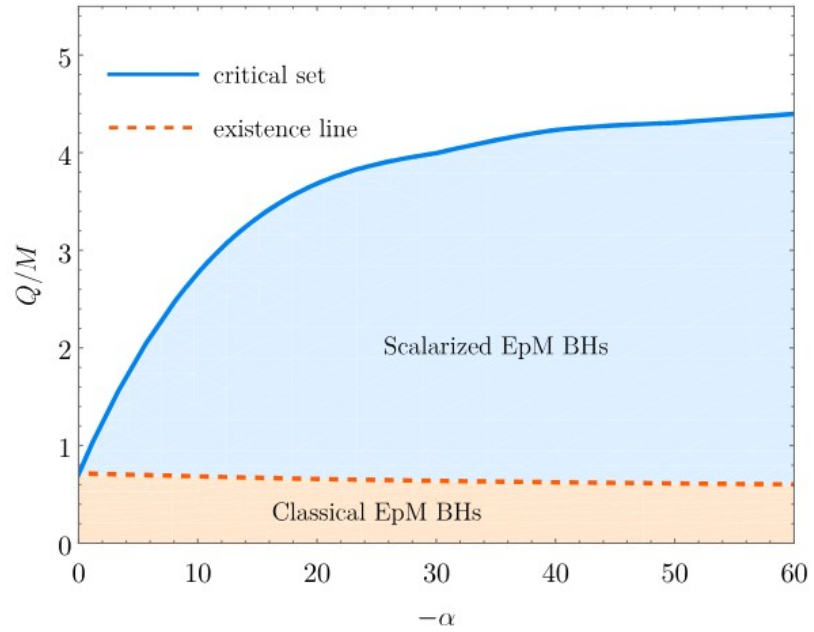
ARTICLE INFO

Keywords:

Hairy black holes
Spontaneous scalarization
Power-Maxwell models

ABSTRACT

We study the spontaneous scalarization of charged black holes in Einstein's gravity minimally coupled to power-Maxwell electrodynamics which, in turn, is non-minimally coupled to a real scalar field. We point out the existence of a specific power for which the scalarized solution is well-behaved, and entropically preferred in comparison to the scalar-free charged black hole solution.





Traversable wormholes with multiple unstable critical curves

A. Rueda^{*}

Departamento de Física Teórica, Universidad Complutense de Madrid, E-28040 Madrid, Spain

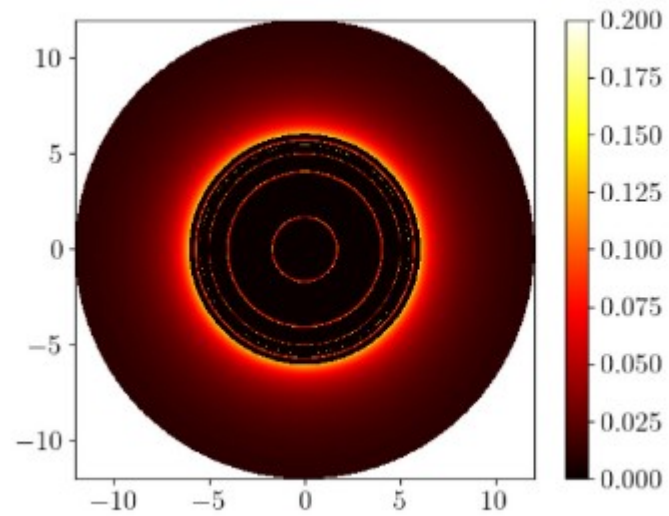
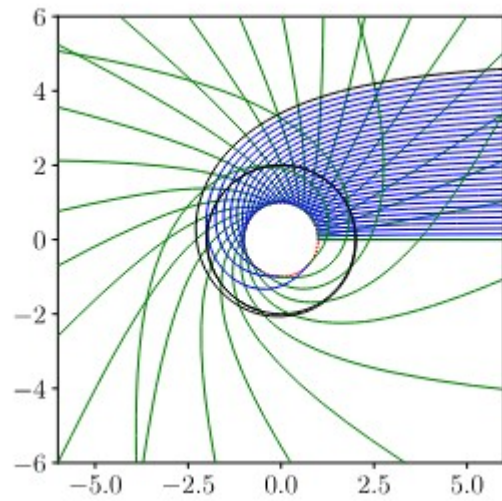
E. Contreras[†]

Departamento de Física Aplicada, Universidad de Alicante, Campus de San Vicente del Raspeig, E-03690 Alicante, Spain



(Received 16 December 2024; accepted 22 January 2025; published 7 February 2025)

The number and position of unstable critical curves, as well as the nature of the accretion disk around compact objects, play a fundamental role in their optical appearance. Identifying differences in the optical spectrum of various observed compact objects can help classify them as black holes or black hole mimickers, such as traversable wormholes. Although multiple unstable critical curves have been reported to appear in asymmetric traversable wormholes, in this work, we construct symmetric traversable wormholes with multiple unstable critical curves. We propose a general rational redshift function that allows us to trace the number of critical points of the effective potential and determine their nature as maxima or minima. The ray-tracing method is used to study the trajectories of massless particles, particularly their behavior near the unstable critical points. Finally, a thin accretion disk model is implemented to analyze the optical appearance of the solution.





Tema	Técnicas / herramientas
Soluciones analíticas	Mathematica, manipulación simbólica, teoría de simetrías
Soluciones numéricas	Python + SciPy, sistemas de EDOs, condiciones de frontera
Modos cuasinormales	Integración en coordenadas tortuga, métodos de dispersión, análisis espectral
Sombras y geodésicas	Python (integración de geodésicas), análisis de potencial efectivo
Back ray tracing	Simulación óptica en Python (o C++/Julia), integración inversa de rayos



Welcome To Colaboratory

File Edit View Insert Runtime Tools Help

Share



Sign in



+ Code + Text Copy to Drive

Connect

Editing



What is Colaboratory?

Colaboratory, or "Colab" for short, allows you to write and execute Python in your browser, with

- Zero configuration required
- Free access to GPUs
- Easy sharing

Whether you're a **student**, a **data scientist** or an **AI researcher**, Colab can make your work easier. Watch [Introduction to Colab](#) to learn more, or just get started below!

Getting started

The document you are reading is not a static web page, but an interactive environment called a **Colab notebook** that lets you write and execute code.

For example, here is a **code cell** with a short Python script that computes a value, stores it in a variable, and prints the result:

```
[ ] seconds_in_a_day = 24 * 60 * 60
    seconds_in_a_day
```

86400



Google Colab: Ventajas y Desventajas

✓ Ventajas

- **Accesibilidad total:** gratuito, basado en la web, sin necesidad de instalación.
- **Hardware potente:** acceso a GPU/TPU incluso en versión gratuita.
- **Entorno preconfigurado:** incluye librerías científicas comunes (NumPy, SciPy, matplotlib, etc.).
- **Ideal para docencia e investigación:** fácil de compartir, colaborativo, integrado con Google Drive.
- **Compatible con Jupyter:** usa el formato `.ipynb`, exportable/importable.
- **Visualización inmediata:** gráficos integrados y ejecución interactiva.

⚠ Desventajas

- **Tiempo de sesión limitado:** se desconecta tras cierto tiempo de inactividad.
- **Recursos compartidos:** el rendimiento puede variar según la demanda global.
- **Requiere conexión a internet:** no es funcional sin acceso en línea.
- **Restricciones de almacenamiento y ejecución prolongada** en la versión gratuita.



Gracias