

XVIII Garcilaso de la Vega 2023-24

Ámbito científico

# AGUJEROS NEGROS

Hanka Partelová

I.A

Bilingválne slovensko-španielske gymnázium

Nové Mesto nad Váhom

## Índice

Introducción.....	1
Introducción al misterio de los agujeros negros.....	1
Formación de los agujeros negros.....	2
Clasificación de los agujeros negros.....	3
Agujeros negros microscópicos.....	3
Agujeros negros supermasivos.....	4
Algunos tipos de agujeros negros.....	4
Termodinámica de los agujeros negros - Entropía.....	5
Radiación Hawking.....	5
Dilatación del tiempo alrededor de los agujeros negros.....	6
CubeSats y agujeros negros.....	6
Notas explicativas.....	7
Conclusión.....	7
Recursos.....	7
Recursos bibliográficos.....	7
Recursos web.....	8

## Introducción

De niña solía flotar con la cabeza en las nubes. Mi mente vagaba aún más lejos, entre cometas, galaxias y agujeros negros. Si aún no te interesa la astrofísica, te estarás haciendo preguntas parecidas a las que yo me hacía entonces. "¿Qué son los agujeros negros y cómo sabemos que existen?", "¿Qué no sabemos de ellos?" y "¿Es útil que sepamos algo sobre ellos?". Ahora conozco las respuestas a estas preguntas. ¿Quieres saber más y descubrir por qué los agujeros negros son tan atractivos? ¡Veámoslo!

## Introducción al misterio de los agujeros negros

La formación de un agujero negro puede imaginarse como una lucha entre la gravedad y las reacciones nucleares. Si esta lucha no sale bien, la materia de alrededor colapsa en un único punto. Pero ya llegaremos a eso. O podemos pensar en ellos como un vecino fisgón en el espacio, que absorbe todo lo que hay a su alrededor, ¡incluso la luz! John Michell empezó a hablar de ellos en el siglo XVIII. Einstein sentó las bases de la existencia de estos enormes objetos con su teoría general de la relatividad, pero no fue hasta 1965 cuando Hawking y Penrose demostraron que los agujeros negros pueden formarse por el colapso gravitatorio de una estrella. Sabemos que existen porque su enorme gravedad influye en los objetos cercanos. Por ejemplo, influyen en el movimiento de las estrellas y también de la luz. Cuando interactúan con la materia que «cae» en ellos, liberan radiación rontgen que podemos observar. Conocer los agujeros negros es como tener un mapa del universo, ¡me hace sentir como un astronauta en una montaña rusa espacial! Además, el conocimiento

de los agujeros negros es esencial para mejorar nuestra comprensión de la física y del universo, lo que puede beneficiar a la tecnología y a la exploración espacial.

Y ahora empieza a ser más científico, pero también más interesante.

## Formación de los agujeros negros

La formación de agujeros negros estelares es un proceso fascinante. Al principio tenemos una estrella extremadamente masiva que tiene más de 10 veces la masa de nuestro Sol. Durante la fase en la que quema helio, se expande y se convierte en una supergigante roja. Se parece a un tomate, pero con un radio mucho mayor. Cuando ha quemado todo el helio que tiene, empieza a quemar poco a poco todos los otros elementos como carbono, neón, oxígeno y silicio. Estos procesos crean energía. Cada vez que una estrella comienza a fundir hierro, empieza a consumir energía. Cuando el núcleo de esta estrella supera aproximadamente los  $1,4 M_{\odot}$ , sus protones y electrones comienzan a combinarse y entonces crean neutrones, **neutrinos**<sup>1</sup> y **rayos gamma**<sup>2</sup>. Este colapso es la causa de la explosión de supernova, que dispersa los restos de la estrella por los alrededores. Si el núcleo de la estrella sobrevive, es comprimido continuamente por la gravedad. Bajo la influencia de esta enorme presión, el núcleo puede colapsarse para formar - materia neutrónica degenerada. Esta materia tiene una densidad y una masa enorme, porque "1 cuchara de esta masa equivaldría en masa a un rascacielos"<sup>3</sup>. Esta presión puede detener otro colapso que formará una **estrella de neutrones**<sup>3</sup>. Pero esto es sólo una posibilidad... Una gravedad tan fuerte puede desencadenar otro colapso - colapso gravitatorio... hasta que finalmente colapse en un único punto con densidad «infinita» llamado **singularidad**<sup>4</sup>. A su alrededor se formará un **horizonte de sucesos**<sup>5</sup> y a su alrededor una **ergosfera**<sup>6</sup>.

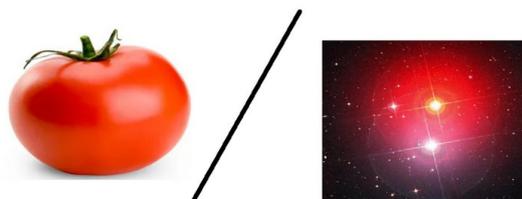


Imagen 1: ¿TOMATE O SUPERGIGANTE ROJA?

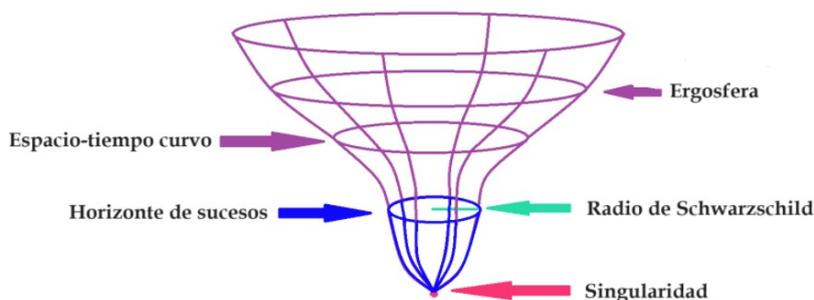


Imagen 2: Esquema de un agujero negro

<sup>1</sup> Samuel Kováčik, <https://vedator.space/co-je-to-cierna-diera/>

"En mi opinión, quizá sean los objetos naturales más interesantes de la historia. Y con el tiempo, hemos descubierto algo terriblemente interesante: las técnicas que hemos tenido que desarrollar para entender los agujeros negros están relacionadas con los conocimientos, ideas y comprensión que necesitamos para construir un ordenador cuántico. Eso es fascinante."<sup>2</sup>

## Clasificación de los agujeros negros

### 1. Según peso:

- *Agujeros negros estelares*: tienen masas que van desde unas pocas  $M_{\odot}$  hasta varios millones  $M_{\odot}$ .
- *Agujeros negros de masa intermedia*: tienen masas desde unos pocos millones  $M_{\odot}$  hasta varios miles de millones  $M_{\odot}$ .
- *Agujeros negros supermasivos*: tienen masas desde algunos miles de millones  $M_{\odot}$  y más.

(Para cada  $1M_{\odot}$ , tiene agujero negro 3km de radio)

### 2. Por carga eléctrica:

- *Agujeros negros neutros*: tienen carga eléctrica nula.
- *Agujeros negros cargados*: tienen carga eléctrica distinta de cero.

### 3. Por rotación:

- *Agujeros negros estáticos*: tienen rotación cero.
- *Agujeros negros rotatorios*: tienen rotación distinta de cero.

### 4. Según la presencia de un disco de acreción:

- *Agujeros negros con disco de acreción*: tienen gas y polvo girando a su alrededor, que se acelera y calienta, produciendo radiación brillante.
- *Agujeros negros sin disco de acreción*: no tienen disco de acreción a su alrededor y son menos visibles.

## Agujeros negros microscópicos

Stephen Hawking teorizó que en el Big Bang se formaron agujeros negros microscópicos como resultado de una enorme presión externa. Estos agujeros serían tan pequeños como protones. A las leyes de la mecánica cuántica, irradiarían energía espontáneamente debido. Tras miles de millones de años, estos agujeros negros microscópicos explotarían y se evaporarían. Eso significa que no serían "negros" en absoluto. Y eso es muuuuuuy interesante para mí.

Un pequeño agujero negro deja gradualmente de evaporarse y todo lo que queda es una diminuta "mota" que pesa muy poco, pero no insignificamente poco (~millonésima parte de un gramo) Y si tuviéramos suficientes de estas "motitas" en el Universo, podrían parecer materia oscura. Estos "motitas" se denominan a veces "restos de Planck" porque tienen la masa de Planck, la longitud de Planck,.... y son, por tanto, un candidato interesante para explicar la **materia oscura**<sup>7</sup>.

<sup>2</sup> Brian Cox, en una de sus charlas

Pueden haberse originado en el universo primitivo, luego pueden haberse evaporado debido a procesos mecánicos cuánticos que ocurren en los bordes de sus horizontes de sucesos. (No podemos determinar exactamente cuándo deben evaporarse) y ahora sólo tenemos "granos de arena" que aún no podemos detectar pero que podrían llenar el universo.

## Agujeros negros supermasivos

Casi todas las grandes galaxias tienen un agujero negro supermasivo en su centro. Tienen entre cientos de miles y miles de millones de veces la masa del Sol. Gracias a las observaciones de galaxias lejanas, sabemos que algunos agujeros negros supermasivos debieron formarse en los primeros mil millones de años tras el nacimiento del universo.

Estos agujeros negros pueden haber comenzado con el colapso de estrellas supermasivas en el universo primitivo, lo que les permitió ganar más masa. Los agujeros negros supermasivos pueden crecer alimentándose de objetos más pequeños, como agujeros de masa estelar y estrellas de neutrones. También pueden fusionarse con otros agujeros negros supermasivos cuando las galaxias colisionan.



*Imagen 3: El agujero negro supermasivo situado cerca de los límites de las constelaciones de Canes Venatici y Coma Berenices.*



*Imagen 4: Remolino de gas caliente que marca la ubicación aproximada del agujero negro supermasivo Sagitario A\* en el centro de nuestra galaxia*

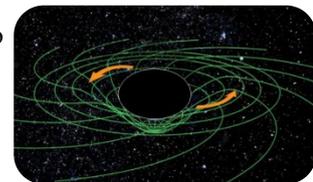
## Algunos tipos de agujeros negros

Un **agujero negro de Schwarzschild** se caracteriza por su radio de masa, denominado radio de Schwarzschild. Este radio determina las propiedades de su campo gravitatorio.

$$R = \frac{2GM}{c^2}$$

*Ecuación 1: Radio de Schwarzschild*

Un **agujero negro de Kerr** es un agujero negro en rotación con momento angular. Esto afecta a sus propiedades, como la existencia de una ergosfera y la formación de curvaturas temporales.



*Imagen 5: Esquema del agujero negro de Kerr*



*Imagen 6: Un agujero negro de Reissner-Nordström*

Un **agujero negro de Reissner-Nordström** es un agujero negro con carga eléctrica caracterizado por masa, carga y un campo electrostático. Estas características afectan a su estructura y propiedades.

Un **agujero negro de Kerr-Newman** es un agujero negro giratorio cargado eléctricamente. Combina las propiedades de los agujeros negros de Kerr y Reissner-Nordström, lo que da lugar a un comportamiento más complejo en su campo gravitatorio.

$$\left( \frac{M c^2}{\sqrt{1 - \frac{v_r^4}{c^4}}} \right)^2 = (M c^2)^2 + \left( \frac{M c^2 \frac{v_r^2}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v_r^4}{c^4}}} \right)^2$$

*Ecuación 2: Agujero Negro de Kerr-Newman-Pico*

## **Termodinámica de los agujeros negros - Entropía**

Los agujeros negros son alucinantes por su entropía y su relación con la 2ª ley de la termodinámica. Bekenstein y Hawking propusieron importantes teorías sobre la entropía de los agujeros negros. Bekenstein relacionó la entropía con el horizonte de sucesos plano, abriendo nuevas perspectivas. Hawking confirmó la existencia de la temperatura de Hawking y ajustó la constante de proporcionalidad a 1/4. Estos descubrimientos impulsaron la investigación sobre la entropía de los agujeros negros. Strominger, Vafa y otros confirmaron posteriormente estos resultados.

$$S_{BH} = \frac{kA}{4l_p^2}$$

*Ecuación 3: Esta ecuación es la relación entre la entropía superficial de un agujero negro ( $S_{BH}$ ), el área del agujero negro ( $A$ ), la constante gravitatoria ( $k$ ) y la longitud de Planck ( $l_p$ ). Expresa la información cuántica almacenada en el horizonte de un agujero negro. Donde  $k$  es la constante de Boltzmann y  $l_p = \sqrt{G\hbar/c^3}$  es la longitud de Planck.*

## **Radiación Hawking**

La radiación de Hawking es un concepto que dice que los agujeros negros tienen una temperatura y, por tanto, irradian de forma similar a, por ejemplo, cuando se calienta el hierro. Estas partículas proceden de muy cerca del límite del agujero negro. Hawking las describió como la teoría cuántica de campos en el espacio-tiempo curvado. "Cuanto más grande es el agujero negro, más pequeña es esta granulación. Porque tiene mayor superficie pero menor temperatura. Si tuviéramos, por ejemplo, un agujero negro con la masa del sol, tendría una temperatura de aproximadamente 60 nanokelvin.

Es sólo una HIPÓTESIS. Nunca se ha observado tal radiación. La mayoría de los científicos creen que existe, pero actualmente no disponemos de la tecnología necesaria para demostrar su existencia.

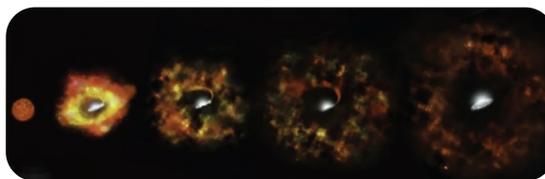


Imagen 7: Radiación Hawking

## Dilatación del tiempo alrededor de los agujeros negros

A distintas altitudes, los relojes atómicos muestran tiempos diferentes. Gracias a ello, sabemos que el tiempo transcurre de forma diferente en distintos lugares, según la velocidad a la que se desplace el observador y la gravedad que actúe sobre él, con distinta lentitud. Los efectos son pequeños, pero comparados con la edad de la Tierra, el núcleo es 2,5 años más joven. La dilatación gravitatoria del tiempo fue descrita por primera vez por Einstein en 1907. Su existencia ha sido confirmada por experimentos como los de Pound-Rebka y Gravity Probe A. Los relojes alejados de cuerpos masivos funcionan más deprisa, mientras que los cercanos lo hacen más despacio.

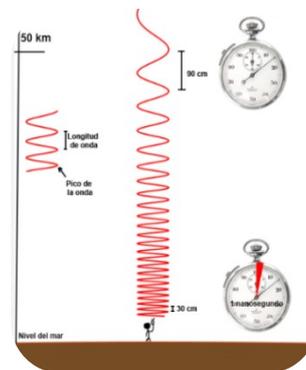


Imagen 8: Dilatación del tiempo.

## CubeSats y agujeros negros

Aunque los agujeros negros suelen ser muy estables, pueden interactuar con otros objetos del Universo. Esto es muy interesante si se trata de otros agujeros negros o estrellas de neutrones. Dando lugar a diversos fenómenos interesantes, como la colisión de agujeros negros o la creación de ondas gravitacionales.

Estos estallidos de rayos gamma también acompañan la formación de agujeros negros. En el futuro podemos ver estallidos de rayos gamma producidos por colisiones de estrellas de neutrones, una estrella de neutrones y un agujero negro o dos agujeros negros utilizando el **QUVIK**<sup>8</sup>. Y gracias a

**GRBAlpha**<sup>9</sup>, hemos visto el destello más brillante en el espacio desde el comienzo de la civilización humana. Los científicos lo llamaron **BOAT**<sup>10</sup>. Norbi también trabajó en este satélite. También, gracias a tecnologías avanzadas como el **LIGO**<sup>11</sup>, podemos observar estos fenómenos y obtener nuevos conocimientos sobre los agujeros negros y su impacto en el Universo.

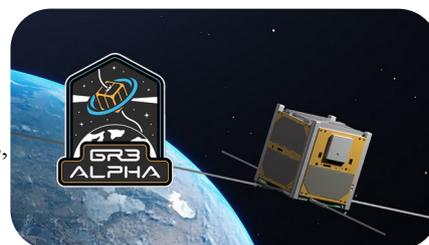


Imagen 9: GRBAlpha (Cubesat(U1) es una clase de pequeños satélites con lados de aproximadamente 10 cm de largo. Con ellos podemos realizar diversas mediciones y contribuyen a interesantes misiones y a la divulgación científica. Uno de estos CubeSats es QUVIK y GRBa. En estos CubeSats trabajó el físico Norbert Werner.)



Figura 10: El físico Dr. Norbert Werner

## Notas explicativas

1. **Neutrino:** es una partícula elemental, pertenece a los leptones con espín medio entero.
2. **Rayos gamma:** La radiación gamma es una radiación electromagnética de alta energía producida por diversos procesos nucleares. Es un tipo de radiación radiactiva.

3. **Estrella de neutrones:** Una estrella de neutrones es un objeto cósmico de densidad extrema que resulta de la explosión de una supernova de tipo II o, en algunos casos, de una supernova de tipo Ic o Ib. Es el remanente degenerado de un núcleo estelar compuesto de neutrones y representa la etapa final de la evolución de las estrellas masivas.
4. **Singularidad:** Un lugar con una curvatura infinita del continuo espacio-tiempo
5. **Horizonte de sucesos:** En relatividad general, el horizonte de sucesos es una frontera en el espaciotiempo más allá de la cual los sucesos no pueden afectar a un observador externo.
6. **Ergosfera:** La ergosfera es la región que rodea al agujero negro en rotación entre el horizonte de sucesos y la superficie del límite de estabilidad.
7. **La materia oscura:** Es un componente hipotético de la materia que, a diferencia de la materia conocida, no emitiría radiación electromagnética y actualmente sólo sería detectable indirectamente a través de sus efectos gravitatorios.
8. **QUVIK:** El primer telescopio espacial checo.
9. **GRBAlpha:** CubeSat de origen checo-japonés-húngaro-eslovaco
10. **BOAT:** Brightest of All Time
11. **LIGO:** Observatorio de Ondas Y Gravitacionales por Interferómetro Láser.

## Conclusión

Estudiar los agujeros negros es como sumergirse en la oscuridad desconocida y descubrir las maravillas que nos rodean. Aunque nuestro "*horizonte de conocimiento*" sigue siendo limitado, esto es lo que nos motiva a seguir explorando y descubriendo nuevos secretos del universo.

*"Así que Einstein se equivocaba cuando decía que "Dios no juega a los dados". Pensar en los agujeros negros sugiere que Dios no sólo juega a los dados, sino que a veces los lanza donde nadie puede verlos"* <sup>3</sup>

## Recursos

### Recursos bibliográficos

- Kováčik, S. (2023). Kúsky reality: Neobyčajná povaha času a priestoru. Eslovaquia, Slovart.
- Cox, B., & Forshaw, J. (2019). Black Holes: The Key to Understanding the Universe. New York, NY: Publisher XYZ
- Hawking, S. (2015). A Brief History of Time: From Big Bang To Black Holes. New York. Random house
- Thorne, S. K. (1995). Black holes and time warps: Einstein's Outrageous Legacy. USA, WW Norton & Company
- Pittich, E., Kalmancok, D. (1981) Obloha na dlani. Eslovaquia Obzor
- David Bodanis (2002),  $E=mc^2$ , Život nejslavmejší rovnice na světě, Praha, Dokořán
- Carlo Rovelli (2020), Helgoland, Miláno, ADELPHI EDIZIONI
- Samuel Kováčik y Norbert Werner (2024) Eslovaquia, N press, s.r.o.
- Knižní klub (2017), kniha astronomie, Praha
- Stephen Hawking (2010), Ilustrovaná stručná história času, Eslovaquia, Slovart
- Jim Al-Khalili (2022) Svět pošle fyziky, Praha, Slovart s.r.o.
- Carlos Calle (2021), Rozhovory s Albertom Einsteinom, Bratislava, IKAR

### Recursos web

- <https://science.nasa.gov/universe/black-holes/>
- <https://www.space.com/15421-black-holes-facts-formation-discovery-sdcmp.html>
- <https://www.nationalgeographic.com/science/article/black-holes>

<sup>3</sup> Stephen Hawking

- <https://www.britannica.com/science/black-hole>
- <https://www.nasa.gov/universe/what-are-black-holes/>
- <https://kids.nationalgeographic.com/space/article/black-holes>
- <https://hubblesite.org/contents/articles/black-holes.html>
- <https://news.uchicago.edu/explainer/black-holes-explained>
- <https://new.nsf.gov/blackholes>
- <https://www.energiaweb.energy/2015/12/09/entropia-malo-chapana-fyzikalna-velicina-s-velkym-dosahom/>
- [http://kf.elf.stuba.sk/~ballo/STU\\_online/Fyzika%20I/VII%20kapitola/7.2/7.2.6.htm](http://kf.elf.stuba.sk/~ballo/STU_online/Fyzika%20I/VII%20kapitola/7.2/7.2.6.htm)
- <https://www.studysmarter.es/resumenes/fisica/fisica-siglo-xx/dilatacion-del-tiempo/>
- <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/Relativ/tdil.html>
- <https://www.sciencealert.com/hawking-radiation>
- <https://math.ucr.edu/home/baez/physics/Relativity/BlackHoles/hawking.html>
- <https://www.sciencefocus.com/space/what-is-hawking-radiation>
- <https://jila.colorado.edu/~ajsh/bh/hawk.html>
- <https://www.nasa.gov/what-are-smallsats-and-cubesats/>
- [https://www.esa.int/Enabling\\_Support/Space\\_Engineering\\_Technology/Technology\\_CubeSats](https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_Technology/Technology_CubeSats)
- <https://www.cubesat.org/>
- <https://www.spacemanic.com/>