

Viaje al centro de un agujero negro

Iván Martí Vidal
**Viaje al centro de
un agujero negro**



Institució
alfons el magnànim
centre valencià
d'estudis i d'investigació



COL·LECCIÓ URÀNIA

Dirección editorial: Vicent J. Martínez

© 2020, Iván Martí Vidal

© 2020 de esta edición:

Institució Alfons el Magnànim

Centre Valencià d'Estudis i d'Investigació

Diputació de València

Corona, 36 – 46003 València

Tel. +34 963 883 169

contacte@alfonselmagnanim.com

www.alfonselmagnanim.net

Ilustraciones interiores y de la cubierta: Pau Valls

Diseño de la colección y maquetación: Javier Pérez Belmonte

Tipografía: IBM Plex Serif, de Mike Abbink i Bold Monday. Bulo

Rounded, de Jordi Embodas. En el interior, papel Printset

Ivori de 90 gramos y en la cubierta Image Silk de 350 gramos

Impresión:



ISBN: 978-84-7822-886-7

Depósito legal: V-2957-2020

Índice

<i>Introducción</i>	11
---------------------------	----

1

La frontera del espacio y el tiempo	15
El recipiente del Universo	16
<i>Espacio, tiempo y gemelos</i>	22
Los Invariantes Relativistas	26
Espacio, tiempo y gravedad.....	33
¿Qué hora es?.....	44

2

Anatomía de un agujero negro	51
La singularidad coordenada	56
Atravesando el horizonte.....	62
La radiación de Hawking	70
El Paradigma de la Membrana.....	76
Básculas galácticas.....	80
Una familia peculiar.....	86
Cebollas de espacio y tiempo	93

3	
Liberándose de las fauces de la bestia	109
Escape asistido e indigestiones cósmicas	110
El chorro de M87	112
Modelando el nacimiento de	
chorros relativistas.....	115
Un manicomio para agujeros negros.....	124
4	
El Telescopio de la Muerte.....	129
El límite de difracción	130
Un agujero negro en el Benicadell.....	133
<i>Interferometría Astronómica:</i>	
desafiando el límite	136
La unión hace la fuerza	138
Una radiografía de las entrañas	
del mundo	144
5	
Motando el telescopio de Horizonte de Sucesos ..	151
El Alma de la Radioastronomía.....	152
EHT: ciencia-ficción hecha realidad.....	157
El desafío milimétrico	162
La Red Global de VLBI Milimétrico.....	164
Houston, tenemos un problema	168
ALMA entra en el juego	171
6	
Haciendo historia. Abril de 2017	177
El principio llega a su fin	181

El largo camino hacia la frontera del tiempo.....	188
El problema de la reconstrucción final	195
¿Qué hemos visto?	199
La sombra central.....	200
El anillo fotonesférico	201
La asimetría del anillo.....	208
Qué nos depara el futuro?.....	212
<i>Aclaración</i>	221
<i>Referencias bibliográficas</i>	223

Introducción

En junio del año 1905, el mundo asistió al nacimiento de la teoría que dinamitó los cimientos sobre los que se alza toda la Física; una teoría que redefinió los conceptos de espacio y tiempo, abriendo nuestras mentes a un universo donde el tiempo puede transcurrir de manera diferente en distintos puntos del espacio y donde el espacio (o sus «reglas de medir») puede encogerse y estirarse en distintos puntos de sí mismo. Un universo donde la masa y la energía son intercambiables y en el que dos hermanos gemelos pueden separarse y reencontrarse a edades muy dispares. Un universo donde podemos encontrar lugares en los que el tiempo y el espacio, tal y como los conocemos, dejan de tener sentido; lugares que marcan la frontera de todo cuanto nuestras pobres mentes son capaces de entender: los agujeros negros.

Más de un siglo después, una colaboración internacional de radioastrónomos (el llamado «Telescopio de Horizonte de Sucesos», EHT) fue capaz de obtener la primera imagen de las inmediaciones de uno de esos lugares;

una de esas fronteras del espacio y el tiempo: la primera imagen de un agujero negro. En los capítulos que siguen, hablaremos sobre el fundamento teórico que rodea a los agujeros negros y nos asombraremos con los increíbles hitos tecnológicos que hay detrás de la histórica hazaña del EHT. Acompáñenme, queridos lectores, en este maravilloso viaje que estamos a punto de emprender hacia las entrañas de los agujeros negros, directos hasta los confines del Universo tal y como lo conocemos. Un viaje que estoy seguro que no les defraudará.

Comenzaremos nuestra odisea con un repaso a la Teoría de la Relatividad de Einstein, la herramienta esencial para entender los agujeros negros. Discutiremos someramente los fundamentos de la teoría, desde los primeros postulados de la Relatividad Especial hasta los principios fundamentales de la Relatividad General. Todo esto, utilizando un lenguaje sencillo y ameno.

A esta discusión seguirá un capítulo dedicado a la teoría de agujeros negros: cómo dependen sus propiedades de la masa y la rotación, qué tipos de agujeros negros encontramos en el Universo y cómo se comporta la materia en sus alrededores. Discutiremos también algunas cuestiones que no parecen quedar muy claras entre el público profano (y no tan profano) y que confieso que me quitaron el sueño en mis tiempos de estudiante. Temas como el transcurso del tiempo durante el colapso de un agujero negro (si el tiempo se detiene en el horizonte de sucesos, ¿cómo podrá finalmente formarse un agujero negro? ¿no debería quedar el colapso gravitatorio congelado en el tiempo hasta el fin del Universo?).

El capítulo que seguirá lo dedicaremos al nacimiento de los llamados «chorros relativistas» en agujeros negros supermasivos, uno de los mayores misterios de la Astrofísica actual que las observaciones del EHT nos ayudarán a esclarecer. Estos chorros están hechos de materia extraordinariamente energética que, mediante mecanismos cuyos detalles aún desconocemos, consiguen escapar de las inmediaciones de los horizontes de sucesos y alejarse de los agujeros negros hasta cubrir distancias extragalácticas.

Acabado ese capítulo, cambiaremos completamente la temática del libro para describir la tecnología que ha hecho posible el proyecto EHT. Le prometo al lector que algunas de las cosas que veremos en este capítulo no serán menos asombrosas que las de los capítulos anteriores. Una vez conozcamos el fundamento tecnológico del proyecto, nos dedicaremos a hablar sobre su historia, haciendo algo de hincapié en mi contribución particular (pero sin dejar de lado el contexto general de toda la Colaboración EHT). He condimentado esta parte del libro con algunas de las experiencias personales que considero más interesantes y divertidas, dándole un toque distendido.

Finalmente, nos dedicaremos por completo a describir las históricas primeras observaciones del EHT y la interpretación de la imagen obtenida; una imagen que ya se encuentra entre las más famosas de la Historia de la Astronomía.

¡Empecemos!

1

La frontera del espacio y el tiempo

Los asiduos lectores de divulgación científica tienen fácil acceso a multitud de libros dedicados a la Teoría de la Relatividad de Einstein, tanto Especial como General. Hay libros de sobra para todos los gustos, edades y niveles. No me gustaría, por lo tanto, dedicar en este libro un espacio excesivo para tratar todos los entresijos de la relatividad einsteiniana (y no es que me falten ganas). Más bien, prefiero dar un mayor peso relativo a otros temas que serán también de interés para el público general, pero sobre los que no es tan fácil encontrar material divulgativo accesible para el lector medio. Vamos a hacer, pues, una pequeña introducción a la Teoría de la Relatividad, pero haciendo un especial hincapié en aquellos conceptos que considero más importantes para ayudar a entender el fascinante mundo de los agujeros negros. A eso destinaremos los siguientes tres capítulos.

El recipiente del Universo

En el año 1865, un joven físico escocés, James Clerk Maxwell, formuló una serie de ecuaciones que relacionan el comportamiento de los campos eléctricos, los campos magnéticos y las cargas sometidas a unos y otros. Según estas ecuaciones, los campos electromagnéticos se propagan de acuerdo a una ley de tipo onda (ya hablaremos más sobre las ondas en el capítulo 4). A estas ondas electromagnéticas les pasa lo mismo que a cualquier otro tipo de onda: su velocidad de propagación viene determinada por las propiedades del medio en el que se encuentran. En el caso de las ondas de sonido, por ejemplo, su velocidad en el aire depende de la presión, la densidad y la temperatura. En el caso de las ondas electromagnéticas (entre las que se encuentra la luz), Maxwell encontró que su velocidad de propagación puede calcularse a partir de ciertas propiedades eléctricas y magnéticas del medio. Lo más chocante de este resultado es que el vacío (que, en su versión clásica, es la ausencia de todo) también contiene propiedades eléctricas y magnéticas que permiten que las ondas electromagnéticas se propaguen a través del mismo.²⁶

En el caso de las ondas de sonido, su velocidad está referida a aquellos observadores para los que el aire está en reposo. Si algún observador sintiese un fuerte viento en alguna dirección, mediría que el sonido se desplaza más rápido en la dirección del viento (ya que el sonido sigue al aire, que es su medio de propagación). Pero una onda cuya velocidad está determinada por las propiedades del vacío no se propaga a través ningún medio

físico, como pueden ser el aire o el agua. El vacío no produce ningún tipo de viento, por el sencillo hecho de que el vacío está vacío. Por consiguiente, las ecuaciones de Maxwell determinan cuál es la velocidad de la luz, pero no nos hablan en absoluto del sistema de referencia respecto al cual se debería medir dicha velocidad en el vacío. Para resolver este problema, la Física tuvo que esperar unas cuantas décadas hasta la llegada de uno de los mayores genios del siglo XX: Albert Einstein. La forma en que Einstein dio solución a este problema de las ondas electromagnéticas y el vacío no es demasiado complicada, aunque el diablo está en los detalles.¹⁷

La esencia de su solución radica en un supuesto que resulta (a posteriori) casi obvio: si las ecuaciones de Maxwell fijan la velocidad de la luz a partir de las propiedades del vacío, pero ningún sistema de referencia puede sentir un «viento de vacío», vamos a suponer que la velocidad de la luz en el vacío sea la misma para todos los observadores del Universo. Es decir, que las leyes de Maxwell se cumplan para todo el mundo por igual, independientemente del estado de movimiento de cada uno.

Este sencillo postulado sobre la constancia de la velocidad de la luz (o, más que constancia, sobre la independencia de su valor respecto de cualquier observador) tiene consecuencias demoledoras para nuestra forma de entender el espacio y el tiempo. Ahora, el espacio ya no será ese inmutable y homogéneo recipiente en el que reside el Universo, ni el tiempo será esa entidad de fluye de manera uniforme y constante para todo aquello que llena el espacio. La constancia de la

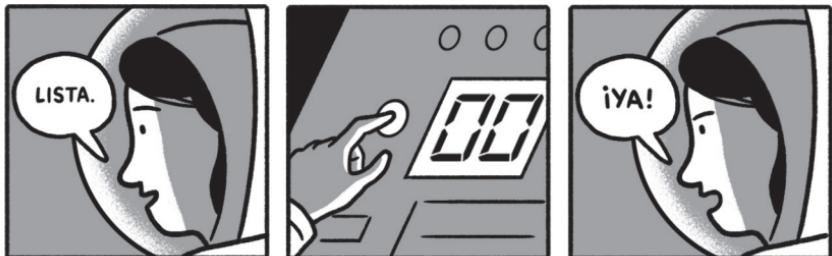
velocidad de la luz implica, de forma directa, que el espacio y el tiempo son entes con propiedades comunes, que se mezclan, se intercambian y varían entre diferentes observadores. Imaginemos, por ejemplo, a dos observadores pilotando sendas naves espaciales en mitad del espacio interplanetario. Una de las pilotos (llamémosla Neleta) permanece en reposo, con los motores de su nave apagados, mientras que la otra (llamémosla Quela) se aleja de la primera a gran velocidad. El hecho de que cada piloto esté en movimiento con respecto a la otra hace que los relojes y las reglas de medir de una y otra midan espacios y tiempos de forma diferente. Si la velocidad de Quela respecto de Neleta es de, pongamos, cien mil kilómetros por segundo, entonces un segundo en el reloj de Neleta se corresponderá con unas noventa y cuatro centésimas de segundo para Quela, mientras que un metro para Neleta (medido en la dirección hacia Quela) será casi seis centímetros más largo para Quela. En resumen, la velocidad de Quela hace que su tiempo se ralentice respecto al de Neleta y que las longitudes (medidas en la dirección de la velocidad) se alarguen.

Estas diferencias en la medida del tiempo y el espacio son ínfimas, prácticamente nulas, cuando la velocidad relativa entre Quela y Neleta es pequeña en comparación con la de la luz. No obstante, a medida que esa velocidad relativa se va acercando a la de la luz, estos efectos en la medida del espacio y el tiempo se van exagerando. Por ejemplo, si Quela se alejase de Neleta a unos doscientos sesenta mil kilómetros por segundo,

su reloj (según Neleta) avanzaría en el tiempo a la mitad del ritmo normal. Por otra parte, las distancias que mediría Quela serían el doble de largas que para Neleta. Ojo, esto no significa que Quela se vea a sí misma aplanada en la dirección de su velocidad, ni que ella vea a su reloj funcionando a la mitad de su ritmo normal. Tanto Quela como Neleta se ven a sí mismas de forma completamente normal, y sus relojes avanzan (respecto de sí mismas) al ritmo que les toca. Estos efectos de los que estamos hablando se refieren a las medidas relativas de espacio y tiempo entre la una y la otra.

Las diferencias en la medida del espacio y el tiempo se hacen mayores para velocidades relativas más cercanas a la de la luz, y lo van haciendo de forma tal que si Quela se desplazase a una velocidad superior a la de la luz con respecto a Neleta, resultaría imposible que Quela y Neleta pudiesen comparar nunca más sus medidas de espacio y tiempo. Esta imposibilidad, vista de otro modo, implica que todo aquello que se desplace con respecto a nosotros a velocidades superlumínicas (o sea, superiores a la de la luz) quedarán desconectados causalmente de nosotros. Otra forma de ver este mismo resultado es que es imposible transmitir ninguna información a velocidades superlumínicas. De poder hacerse esto, violaríamos lo que se conoce como Principio de Causalidad: la inquebrantable ley que prohíbe que alguien tenga el poder de evitar que nuestros abuelos se conozcan.

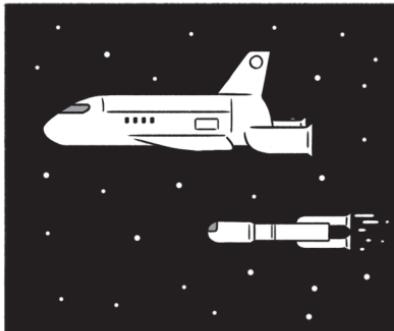
Lo chocante de esta situación entre Quela y Neleta es que es totalmente simétrica, lo que nos lleva a una



La constancia de la velocidad de la luz implica, de forma directa, que el espacio y el tiempo son entes con propiedades comunes, que se mezclan, se intercambian y varían entre diferentes observadores.

01 02

57 - 58 - 59 - 60



¿TODO BIEN,
QUELA?

¿CUÁNTOS
SEGUNDOS
HAS VIAJADO
EN TU NAVE?



(...) Por ejemplo, si Quela se alejase de Neleta a unos doscientos sesenta mil kilómetros por segundo, su reloj (según Neleta) avanzaría en el tiempo a la mitad del ritmo normal.

aparente paradoja. El tiempo para Quela, que se mueve a gran velocidad respecto a Neleta, corre más lento según Neleta (o sea, Quela envejece más despacio que Neleta). No obstante, ¡la misma escena vista por Neleta es completamente opuesta! Para Neleta, es Quela la que envejece más lentamente, ya que Quela también se está moviendo a gran velocidad, visto por Neleta. Algo similar nos ocurre a nosotros cuando vemos a un tren pasar de largo en la estación: los pasajeros del tren se mueven a gran velocidad respecto a nosotros, pero para los viajeros del tren somos nosotros los que nos movemos (en dirección contraria) a gran velocidad. Entonces, ¿quién de las dos pilotos, Quela o Neleta, está envejeciendo más lentamente que la otra? Esta es una interesantísima pregunta, que responderemos en la siguiente sección.

Espacio, tiempo y gemelos

Uno de los experimentos mentales más famosos relacionados con esta relatividad en las medidas de espacio y tiempo realizadas por distintos observadores, es el de la mal llamada Paradoja de los Gemelos. Vamos a dedicarle unas líneas, ya que nos permitirá introducir una de las principales herramientas para entender la relatividad einsteiniana.²¹

Dos gemelos se encuentran sobre la superficie de la Tierra. Cada hermano lleva consigo un reloj sincronizado con el del otro hermano. Uno de los hermanos (llámémosle Tonet) se sube a una nave espacial con motores extraordinariamente potentes. Conecta los motores y la

nave sale lanzada al espacio exterior. El otro hermano (llamémosle Joanot) se queda en la Tierra. El hermano Tonet disfruta de un maravilloso viaje por la vecindad del Sistema Solar, a velocidades enormes, y regresa a la Tierra a contarle a Joanot sus aventuras. Cuando Tonet baja de la nave espacial, comprueba atónito que Joanot es mucho más viejo que él. Un intervalo de tiempo que para Tonet ha sido de pocas semanas, para Joanot resulta ser de varias décadas. Los relojes, antes perfectamente sincronizados, difieren ahora en decenas de años. En algunos escritos divulgativos, suele decirse que la diferencia entre los tiempos medidos por ambos hermanos se debe a la velocidad relativa entre éstos; a mayor velocidad de Tonet en su nave espacial, tanto más lento avanzará su tiempo en relación al de Joanot. No obstante, en la descripción de este experimento ha surgido una aparente paradoja. Si Tonet se ha desplazado a gran velocidad respecto de Joanot, entonces, por necesidad, Joanot (y el resto del planeta Tierra con él) también se ha estado desplazando a gran velocidad respecto a Tonet. Si esto es así, ¿por qué es Tonet, y no Joanot, el más joven de los dos hermanos cuando éstos se reencuentran? De hecho, si la velocidad relativa de Tonet respecto de Joanot es la misma que la de Joanot respecto de Tonet (pero cambiada de signo), ¿por qué debería haber un hermano más joven que el otro en el momento del reencuentro?

La solución a esta paradoja es algo sutil. Lo que hace que un hermano envejezca menos que el otro no es la velocidad relativa entre ambos, ni el hecho de que ésta

sea más o menos cercana a la de la luz. Más bien, la razón por la que aparece esta diferencia de edad entre los hermanos está en la aceleración experimentada por Tonet (causada por los motores de su nave), que pasó totalmente desapercibida para Joanot (quien no sintió ninguna aceleración durante todo el experimento). Pero, ¿por qué esto es así? ¿Qué tiene que ver la aceleración de Tonet con la ralentización de su reloj respecto al de Joanot? Para entender correctamente el experimento de los gemelos, necesitamos una nueva herramienta de trabajo en la que basar nuestra discusión: el espacio-tiempo.

La idea de espacio-tiempo se la debemos al matemático alemán Hermann Minkowski, quien en 1907 (solo un par de años antes de su muerte) se dio cuenta, basándose en resultados previos de Hendrik A. Lorentz y Henri Poincaré, de que la condición de constancia de la velocidad de la luz puede reformularse de manera muy sencilla, combinando el espacio y el tiempo dentro de un nuevo espacio de cuatro dimensiones con unas propiedades especiales.⁴²

Los puntos que llenan el espacio-tiempo de Minkowski tienen tres coordenadas de tipo espacial, que lo sitúan en un punto del espacio ordinario, más otra coordenada de tipo temporal, que lo sitúa en un momento de la historia. De este modo, la historia completa de un observador se representa en el espacio-tiempo como una línea orientada hacia el futuro. Las peculiares características que le otorgó Minkowski a su espacio-tiempo hacen que estas líneas tengan una propiedad muy

interesante: la longitud entre dos cualesquiera de sus puntos es igual al tiempo que ha transcurrido entre dichos puntos, medido por el observador que está recorriendo dicha trayectoria. No en vano, a la longitud de este tipo de líneas en el espacio-tiempo se la suele llamar tiempo propio, ya que representa el tiempo transcurrido para el observador que las está recorriendo. Así pues, los relojes que llevamos en nuestras pulseras son dispositivos que van midiendo la longitud de las trayectorias que cada uno de nosotros está describiendo a lo largo del espacio-tiempo.

Una de las propiedades más curiosas de le espacio-tiempo de Minkowski es que las líneas rectas que están orientadas en la dirección del tiempo no son las que tienen la longitud más corta posible entre dos puntos (como ocurriría en un espacio ordinario), sino más bien al contrario: las trayectorias rectas en el tiempo son las que tienen la mayor longitud posible entre dos puntos del espacio-tiempo. Dicho de otro modo, el *tiempo propio* más largo posible entre dos puntos del espacio-tiempo es el que medirá el observador que siga la línea recta (o sea, el que no acelere, como Joanot). Por otro lado, cualquier otra línea curvada que pase por esos dos puntos del espacio-tiempo (como la que describe Tonet cuando acelera con su nave) tendrá una longitud menor. He aquí, pues, la explicación a la famosa paradoja de los gemelos, que nos permitirá entender mejor una parte de lo que nos queda por discutir: la línea del espacio-tiempo seguida por Tonet tiene una menor longitud que la seguida Joanot (que siguió el camino recto), por lo que el tiempo