Alain Riazuelo
Instituto de Astrofísica de París

AGUJEROS NEGROS

UN MISTERIO CÓSMICO POR FIN DESVELADO

Prólogo de Roland Lehoucq

Traducción de María Isabel Soto López

Revisión científico-técnica de la traducción
a cargo de David Galadí-Enríquez, doctor en astrofísica,
Departamento de Física, Universidad de Córdoba (España)

Alianza Editorial

Título original: *Les Trous Noirs – Des objets obscurs enfins révélés (3ème édition)*

Primera edición: octubre de 2025

Las imágenes, infografías y simulaciones gráficas que ilustran este libro han sido cedidas
por De Boeck Supérieur e integran en su totalidad la tercera edición
de *Les Trous Noirs – Des objets obscurs enfins révélés* (2024) de Alain Riazuelo.

Reservados todos los derechos. El contenido de esta obra está protegido por la Ley, que establece penas de prisión y/o multas, además de las correspondientes indemnizaciones por daños y perjuicios, para quienes reprodujeren, plagiaren, distribuyeren o comunicaren públicamente, en todo o en parte, una obra literaria, artística o científica, o su transformación, interpretación o ejecución artística fijada en cualquier tipo de soporte o comunicada a través de cualquier medio, sin la preceptiva autorización.

PAPEL DE FIBRA
CERTIFICADA

© 2024, De Boeck Supérieur
© de la traducción: María Isabel Soto López, 2025
© Alianza Editorial, S. A., Madrid, 2025
Calle Valentín Beato, 21; 28037 Madrid
www.alianzaeditorial.es
ISBN: 979-13-7009-095-1
Depósito Legal: M. 12.924-2025
Impreso en España - Printed in Spain

ÍNDICE

PREFACIO, *por Roland Lehoucq* 11

INTRODUCCIÓN 13
Aclaración sobre notación científica 15
Un complemento en línea: *Voyage au cœur d'un trou noir* 18
Agradecimientos 19

1. EL NACIMIENTO DE UN CONCEPTO 21
Un concepto histórico sencillo pero en principio inútil 21
Los primeros astros compactos 23
Las «estrellas nuevas» y su verdadera naturaleza 27
Un último paso mucho más difícil de dar 30

2. TEORÍAS PARA EXPLICAR EL MUNDO 32
La gravitación universal 33
La luz 37
Electricidad y magnetismo 40
Una contradicción problemática 44
El experimento fallido más fructífero de la historia de la ciencia 46
Einstein y la relatividad restringida 49
$E = mc^2$ 53
El fin del tiempo absoluto y sus consecuencias… 55
… que conducen a una nueva contradicción 56
La relatividad general 61

3. COMPROBAR LAS NUEVAS LEYES DE LA GRAVITACIÓN 66
Pruebas históricas poco precisas… 66
… y luego de una precisión a veces sorprendente 74
La desviación de la luz 75
El efecto Shapiro 75

La precesión geodésica y el efecto Lense-Thirring 76
Pruebas fuera del Sistema Solar 80

4. DESARROLLAR UN CONCEPTO 81
Primeras dificultades 82
Vértigo gravitatorio 84
Una frontera invisible 87
Deformaciones extremas 90
Una diversidad limitada 93
Una existencia inevitable 95
Agujeros negros cargados… 96
… o en rotación 98
Los misterios de la singularidad 100

5. MILLONES DE AGUJEROS NEGROS… 104
Los más numerosos: los agujeros negros estelares 104
Los más grandes: los agujeros negros supermasivos 105
Los menos conocidos: los agujeros negros intermedios 106
Los más hipotéticos: los agujeros negros primordiales 107

6. DE LAS ESTRELLAS A LOS AGUJEROS NEGROS 109
¿Qué es una estrella? 109
Algunas anotaciones sobre los átomos y las partículas elementales 111
Los constituyentes elementales de la materia… 116
… y sus interacciones 119
¿Qué átomos había en el universo al final de la Gran Explosión? 122
La vida normal de las estrellas: la secuencia principal 125
Después de la secuencia principal 130
El destino tranquilo de las estrellas de baja masa… 131
La fase de gigante roja 132
… y el final cataclísmico de las estrellas masivas 135
Capas de cebolla 137
Un ritmo cada vez más incontrolable 139
Un final inevitable 140
La estructura interna de un astro inerte 141
El final cataclísmico de las estrellas masivas 143
Acontecimientos espectaculares, pero raros a escala humana 149
La supernova del año 1054 150
La supernova SN 1987A 153
Otras supernovas de menor importancia aquí 159

Las supernovas fallidas 162
Fuegos artificiales cósmicos 166

7. AGUJEROS NEGROS Y OTROS CADÁVERES ESTELARES .. 167
¿Estrella de neutrones o agujero negro? 168
Estrellas de neutrones y púlsares 170
El laboratorio ideal para poner a prueba la relatividad general 173
Fuentes explosivas de rayos gamma largas 177
Fuentes explosivas de rayos gamma breves 182
Determinación de la masa máxima de las estrellas de neutrones 184
Cartografiar las estrellas de neutrones 190

8. LOS AGUJEROS NEGROS SUPERMASIVOS Y SUS MISTERIOS 193
Los cuásares 193
Sondear la masa de los agujeros negros con la luz 197
Simbiosis en galaxias 200
Un crecimiento improbable… 201
… o un modo de formación inédito 202

9. AGUJEROS NEGROS MUY DIFÍCILES DE OBSERVAR 205
En busca de agujeros negros estelares 205
Retrato de familia 209
¿Cómo se consigue ver un agujero negro? 223

10. AGUJEROS NEGROS NO DEL TODO NEGROS 229
Una primera analogía intrigante 229
Otra propiedad inesperada 234
La analogía se refuerza 234
Una frontera que, en realidad, no es perfectamente hermética 237
Una analogía engañosa pero útil 239
Los mayores depósitos de desorden del universo 245
Agujeros negros que todavía no se han evaporado… 246
… pero que se evaporarán durante mucho mucho tiempo 247
¿Qué irradia un agujero negro? 248
Las incógnitas del proceso de evaporación 250

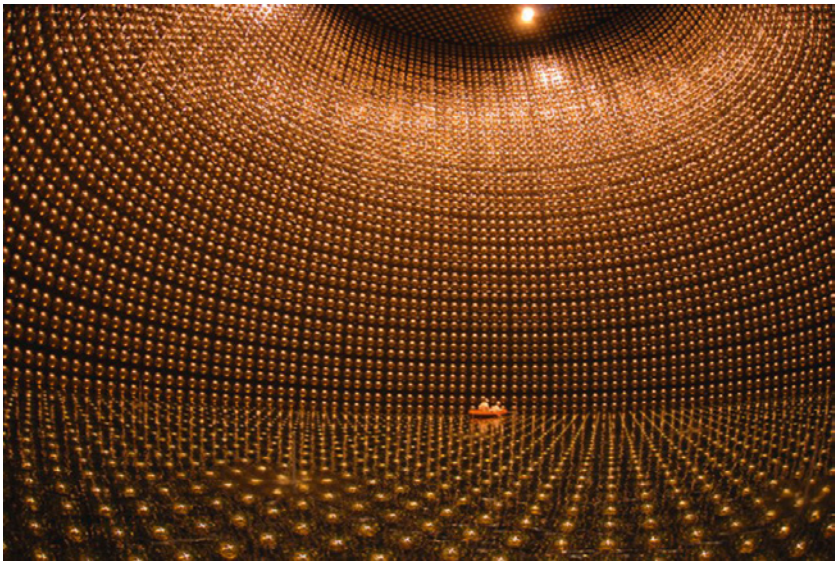
11. UNA HISTORIA DE ONDAS 252
Una de las más antiguas predicciones de la relatividad 252
Los eventos más energéticos del universo 253
Detectar las arrugas espaciotemporales 257
Un nuevo capítulo 262
Confirmaciones posteriores 266

El triunfo de la astronomía gravitatoria 269
El eslabón perdido en la nucleosíntesis 272
Y lo extraordinario se volvió banal 274
Diferentes propiedades entre poblaciones diferentes 277
Un futuro brillante 279
Un universo hasta ahora silencioso pero pronto muy ruidoso 283
Medir el universo 286

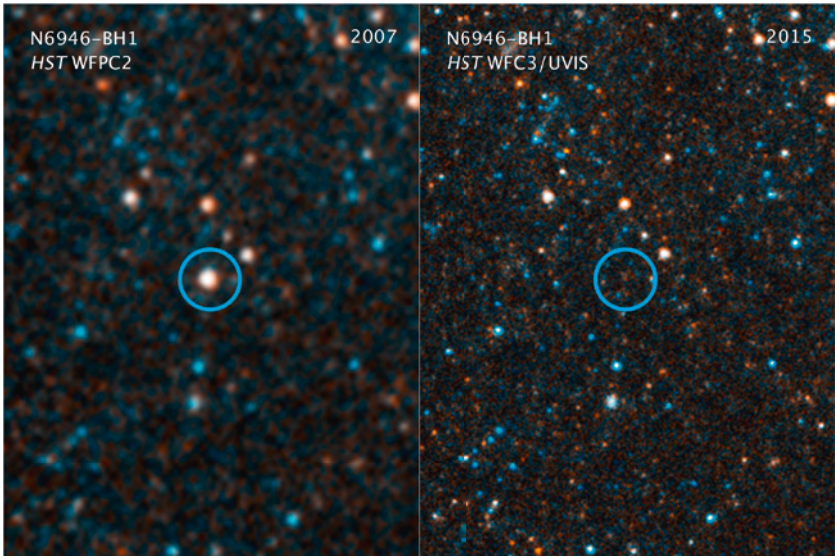
CONCLUSIÓN 291

CRÉDITOS DE LAS IMÁGENES 293

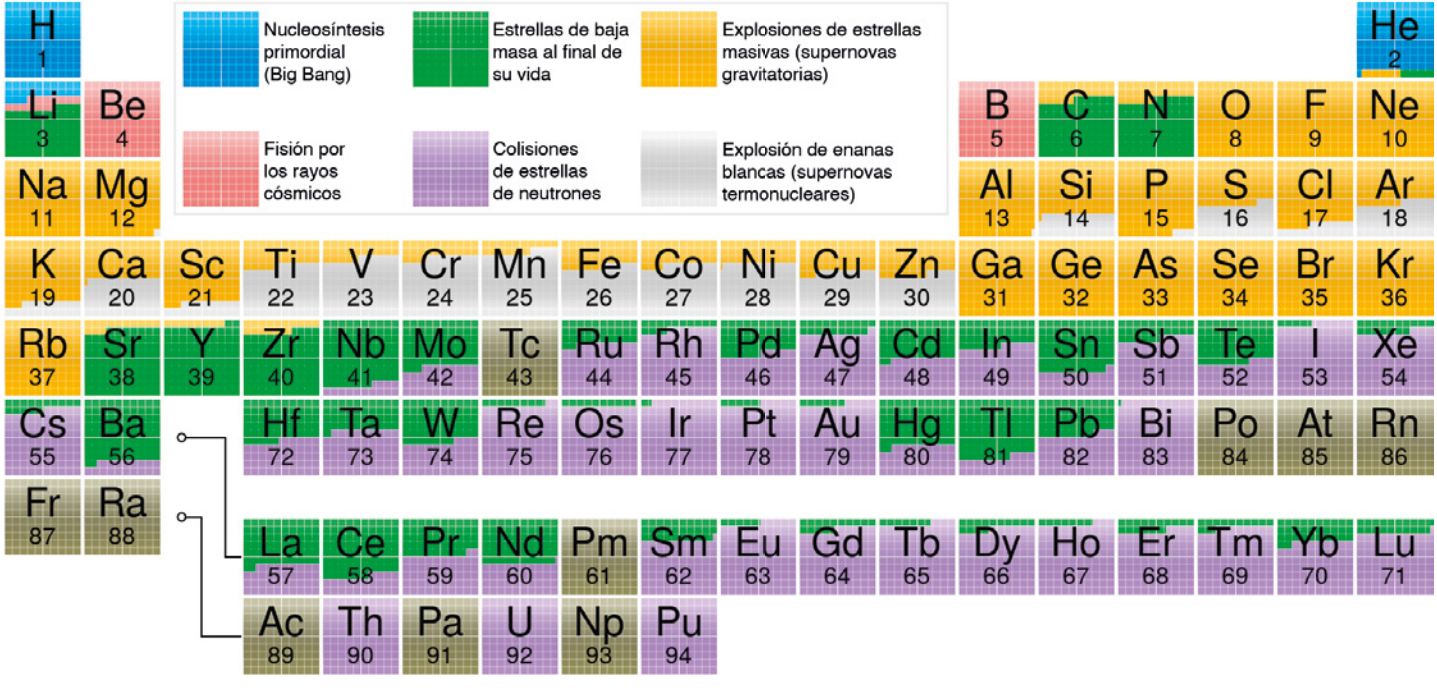
ÍNDICE ONOMÁSTICO Y DE TÉRMINOS 295



El detector Kamiokande durante una operación de mantenimiento en la que se vació casi por completo de agua. Cada punto de la imagen es un fotomultiplicador de 50 centímetros de diámetro. El objeto en el centro de la imagen es una barca con dos investigadores.



El objeto N6946-BH1, fotografiado por el telescopio espacial Hubble en 2007 (a la izquierda) y en 2015 (a la derecha). Una de las estrellas de la galaxia NGC 6946, claramente visible en 2007 a pesar de la imperfecta calidad de la imagen, desapareció por completo ocho años después sin haber pasado entretanto por el estado de supernova. Con toda probabilidad, se trata del primer ejemplo de supernova fallida detectado.



El papel de los distintos procesos nucleares en la formación de los elementos químicos. La mayor parte del hidrógeno y el helio que existen hoy en día proceden de la Gran Explosión, pero casi la totalidad de los demás elementos se produjeron dentro o en las proximidades de las estrellas o de sus cadáveres. Algunos se originaron en estrellas de baja masa al final de su vida, otros en supernovas termonucleares y otros, en fin, en supernovas gravitatorias. Quedaba un lugar de producción de núcleos que aún no se había identificado con certeza: las colisiones de estrellas de neutrones, que en realidad resultaron ser las principales contribuyentes a la formación de la mayoría de los núcleos con 44 protones o más. Los dos únicos elementos que no se producen cerca de las estrellas son el berilio y el boro, resultado de la fisión de algunos de los núcleos más pesados tras colisiones con rayos cósmicos, es decir, partículas muy energéticas (quizás protones).

PREFACIO

El agujero negro es sin duda el objeto astronómico más emblemático del bestiario de la astrofísica. Hay que reconocer que su evocador nombre, sus propiedades extremas y sus adjetivos («ogro» o «monstruo cósmico»…) reúnen todas las características para hacer de él un divo. Hollywood lo convirtió en protagonista en *El abismo negro*, una película de 1979, y, sobre todo, en la más reciente y espectacular *Interstellar* (2014), donde Gargantúa, un agujero negro supermasivo, ocupa el centro de la trama. El agujero negro, imaginado ya en el siglo XVIII como un cuerpo celeste cuya luz no podía escapar, fue durante mucho tiempo una posibilidad teórica antes que una realidad observada. Se trata de una de las consecuencias más espectaculares de la relatividad general, la centenaria teoría de la gravitación debida a Albert Einstein (1879-1955). En ella, la gravitación ya no se interpreta como una fuerza de atracción inherente entre masas, sino como una manifestación de la curvatura del espacio-tiempo impuesta por la distribución de la materia y la energía. Por consiguiente, Einstein demuestra que un rayo de luz se desvía cuando pasa cerca de una masa, algo imposible en la física clásica.

Pero si la curvatura del espacio afecta a la luz, entonces se pueden calcular las condiciones en las que un astro no puede dejar escapar la luz. La relatividad general confirma que, para un cuerpo celeste con una masa dada, existe un radio por debajo del cual la luz no puede escapar: para el Sol, es de solo tres kilómetros. La superficie esférica, sin realidad material, que delimita la región de la que ni la luz ni la materia pueden escapar se denomina «horizonte de sucesos». Mientras que la posición del horizonte terrestre depende de la del observador, el horizonte del agujero negro es *absoluto*. Es un límite del espacio-tiempo, independiente de cualquier observador. Si bien es posible pasar del dominio exterior al interior, no ocurre lo mismo a la inversa. Esta es la justificación del término «agujero negro», propuesto por el teórico estadounidense John Archibald Wheeler (1911-2008) en 1967 para lo que entonces no era más que una posibilidad teórica. La expresión tuvo un gran éxito, aunque resulte paradójico llamar «agujero» a la mayor concentración de materia del universo. En cuanto a «negro», verán que un agujero negro en realidad no es tan negro…

El trabajo de Alain Riazuelo les relatará la apasionante aventura de la comprensión teórica de los agujeros negros, pero también la de su descubrimiento. Escrito por un destacado especialista en estos asombrosos objetos, no se trata de una obra más sobre agujeros negros. ¡La persona que les servirá de guía los ha «visto»! Para ser más exactos, es uno de las pocas personas capaces de simular con precisión imágenes espectaculares que muestran la influencia de un agujero negro sobre su entorno. De la mano de Alain Riazuelo, entrarán en el reino de los agujeros negros, ¡aunque con él saldrán vivos y más informados!

Roland Lehoucq
Astrofísico en el Comisariado
de Energía Atómica en Saclay

INTRODUCCIÓN

Los agujeros negros figuran entre los objetos más emblemáticos de la astronomía, lo cual se debe, fundamentalmente, a su nombre terriblemente evocador y a la inquietante extrañeza que de ellos emana. En efecto, en escasas ocasiones han encontrado los astrónomos un nombre más apropiado para describir un objeto. La razón es sencilla: la astronomía es una ciencia observacional que ha permitido explorar el universo y contar uno a uno a los miembros del gran bestiario cósmico. Pero a menudo la observación ha precedido a la teoría, de modo que se dio nombre a los objetos descubiertos antes de conocerlos y comprender su naturaleza. Así, las nebulosas planetarias no son sistemas planetarios en formación, sino las capas externas que una estrella moribunda disipa en el espacio. Los púlsares no son estrellas que oscilan o pulsan, sino objetos muy compactos en rotación rápida que emiten radiación a través de dos haces que barren el cielo, dando la impresión de que parpadean. Los cuásares no son objetos «cuasiestelares», como indica su nombre abreviado, sino los núcleos de ciertas galaxias lejanas. Las novas no son estrellas nuevas, sino estrellas que sufren cambios de humor más o menos

violentos y ven aumentar su luminosidad de forma breve pero intensa. Y las supernovas no son novas especialmente brillantes, sino el evento que indica el final de las estrellas masivas…

¿Y los agujeros negros? Son objetos de los que nada ni nadie puede escapar si se aproxima demasiado a ellos, una situación que se aplica no solo a la materia, sino también a la luz. Los agujeros negros son, por tanto, en el sentido más literal del término, una especie de «agujeros» que visualmente son perfectamente «negros». ¡No hay nada más explícito! El nombre que se les otorgó, sin que sirva de precedente, se ajusta como un guante. No porque, tras observarlos, se comprendiera al instante de qué se trataba, sino porque, por el contrario, se conceptualizaron antes de observarlos, lo cual permitió disponer de un margen para encontrarles un nombre adecuado a su naturaleza. La cuestión que durante mucho tiempo inquietó a los físicos y astrofísicos no tenía tanto que ver con su naturaleza como con su existencia, pues, si bien es posible conceptualizar un objeto que lo atrapa todo, incluida la luz, y que por tanto debe de ser perfectamente negro, ¡sin duda es más difícil observarlo! Además, las condiciones físicas que deben prevalecer en las cercanías o incluso en el interior de tal región del espacio son tan extremas, tan alejadas de nuestra intuición y tan distintas de las que predominan en las proximidades de los cuerpos celestes conocidos —que sí emiten luz—, que es natural preguntarse si la Madre Naturaleza ha permitido de verdad que se formen astros tan insólitos.

Por consiguiente, comprender los agujeros negros, aprehender su naturaleza y saber dónde y cómo pueden detectarse fue durante mucho tiempo una aventura más intelectual que observacional, y en esta aventura es en la que nos centraremos en este libro, una aventura compleja que recorre un sinfín de conceptos de física y astrofísica, entre ellos, nebulosas planetarias, púlsares, cuásares, novas y supernovas, todos ellos con nombres bastante poco acertados pero con cabida en este gran fresco cósmico.

ACLARACIÓN SOBRE NOTACIÓN CIENTÍFICA

En astronomía, no es extraño utilizar magnitudes físicas muy distintas de las que nos resultan familiares. Las masas de las estrellas o las distancias que las separan no guardan proporción con las masas y distancias que empleamos en la vida cotidiana. Es más, ciertos fenómenos físicos que se producen en el universo están dictados por las leyes del mundo microscópico, es decir, por magnitudes que son mucho más pequeñas que las que conocemos y con las que estamos familiarizados. En pocas palabras, en astronomía solemos trabajar con cifras… astronómicas. Y conviene escribirlas de la forma más legible y explícita posible. ¿Cuál es la masa del Sol? Alrededor de 2.000.000.000.000.000.000.000.000.000 de toneladas. Una cifra así es tan difícil de leer como de pronunciar: por una parte, es complicado contar el número de ceros (veintisiete, en este caso), aunque estén agrupados de tres en tres; y, por otra, no está claro cómo nombrar una cifra semejante. Un «1» seguido de nueve ceros es mil millones, pero ¿con doce ceros? En español, la Real Academia nos dice que es un «billón», pero el término se presta a confusión, ya que en inglés *billion* significa «mil millones». Para un inglés, un «1» seguido de doce ceros se-

ría más bien un *trillion,* mientras que un trillón, para un hablante de castellano, significa un «1» seguido de dieciocho ceros… En resumen, es mejor evitar las denominaciones exóticas para los grandes números, que, de pronunciarlos con letra, serán un millón de millones (un «1» seguido de doce ceros), mil millones de millones (quince ceros), un millón de millones de millones (dieciocho ceros), y así sucesivamente. En este caso, la masa del Sol ronda los dos mil millones de millones de millones de toneladas. Sin embargo, esta formulación, aunque no es ambigua, también tiene sus límites. La masa de un átomo es una ínfima fracción de gramo, de manera que si intentamos calcular cuántos átomos tiene nuestra estrella, obtenemos una cifra más que astronómica, del orden de mil millones de millones de millones de millones de millones de millones de millones de millones de millones. ¿Cuántos ceros harían falta? Sí, cincuenta y siete, algo menos abstruso que 1.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000 (que tiene cincuenta y siete ceros, ¡comprobadlo!), pero bastante incómodo. Por esta razón, los científicos utilizan notaciones a la vez más compactas y elegantes, conocidas como «potencias de diez» o «notación científica». Cuando escribimos 10^n (pronunciado «10 a la enésima potencia» o «diez elevado a ene»), hablamos de un número que se escribe con un «1» seguido de n ceros. Así, 10^1 corresponde a 10, 10^2 a cien, 10^3 a mil, 10^6 a un millón y 10^9 a mil millones. Cuando el número con el que trabajamos no comienza por 1 sino por 2, por ejemplo, puede escribirse como 2×10^n. Así, 2×10^9 corresponde a dos mil millones, y la masa del Sol antes mencionada es de aproximadamente 2×10^{27} toneladas. Nada impide que el número situado a la izquierda del signo de multiplicación lleve una coma. Por ejemplo, $3{,}5 \times 10^6$ corresponde a 3.500.000, es decir, tres millones y medio.

Otra ventaja de la notación científica es que también puede utilizarse para representar números mucho menores que 1. La norma es decir que 10^{-n} corresponde al inverso de 10^n. Así, 10^{-1} es 0,1, y 10^{-3} es 0,001. En general, en el número 10^{-n} hay n ceros

en total, uno antes de la coma y *n*-1 después de ella. A modo de anécdota, la masa de un átomo de hidrógeno es de aproximadamente $1{,}7 \times 10^{-24}$ gramos, que es más fácil de escribir que 0,000000000000000000000017 gramos.

Los ejemplos de la masa del Sol o de la de un átomo demuestran que la notación basada en potencias de 10 es mucho más cómoda. Sin pretender facilitar la comprensión de tales cantidades, tiene sin embargo el mérito de permitir compararlas con más celeridad. Dependiendo del contexto, en este libro utilizaremos las notaciones en letra mencionadas más arriba siempre que los números no sean demasiado grandes o demasiado pequeños, o bien, cuando sea realmente indispensable, notaciones de potencias de diez. En otros casos, utilizaremos unidades más apropiadas. Por ejemplo, la masa de las estrellas se expresará casi de manera sistemática en relación con la masa del Sol, porque incluso con notación científica sigue siendo más sencillo decir que un agujero negro tiene diez veces la masa del Sol que 2×10^{31} kilogramos…

UN COMPLEMENTO EN LÍNEA: *VOYAGE AU CŒUR D'UN TROU NOIR*

Los lectores y lectoras que le echen un vistazo rápido a esta obra seguro que se sorprenderán al no encontrar muchas representaciones de agujeros negros, más allá de la que figura en la cubierta. Se trata en parte de una decisión obligada, ya que la extensión del libro impedía abordar todos los aspectos relacionados con estos extraños objetos, pero también es una decisión meditada, porque la experiencia demuestra que las imágenes fijas están lejos de captar la esencia de estos cuerpos celestes. No mostrar imágenes sino secuencias de vídeo comentadas de lo que vería un observador orbitando a su alrededor, o incluso internándose en un agujero negro, es una experiencia mucho más insólita y, creo, instructiva, que algunos analistas me han dicho que califican —elegir al gusto— como relajante, angustiosa, inquietante o hipnótica. Hace unos años, Sylvie Rouat, de la revista *Science & Avenir*, me propuso realizar un documental sobre los agujeros negros. El documental, financiado por la revista, es de libre acceso y está disponible, en lengua francesa, en esta dirección:

http://www2.iap.fr/users/riazuelo/bh/DBS

Espero que sea un complemento interesante para esta obra.

AGRADECIMIENTOS

Mi agradecimiento a Alain Luguet por su confianza y su paciencia, así como a Roland Lehoucq por hacerme el honor de prologar este libro. Gracias también a Olivia Recasens, Nathalie Deruelle, Estelle Asséo, Sylvie Rouat, Adel Bilal, Jean-Yves Daniel, Éric Simon, Guillaume Faye y Gilles Esposito-Farèse.

1

EL NACIMIENTO DE UN CONCEPTO

Un concepto histórico sencillo pero en principio inútil

El concepto de agujero negro es bastante sencillo de entender. Si, desde la superficie de la Tierra, lanzamos un objeto al aire, este se elevará, se ralentizará y luego volverá a caer. Cuanto más fuerte lo lancemos, más tiempo subirá antes de volver a caer. Pero en realidad hay otro resultado para este experimento: si lanzamos el objeto a una velocidad realmente elevada, entonces adquirirá suficiente energía para escapar por completo de la atracción terrestre. Esta velocidad límite se denomina, por razones obvias, «velocidad de escape». Desde la superficie de la Tierra, esta velocidad es muy elevada en comparación con los órdenes de magnitud con los que estamos familiarizados: se sitúa en torno a los 40.000 km/h o, si se prefiere, 11,2 kilómetros por segundo•. Tales

• Las velocidades que se manejan en astronomía son muy elevadas en relación con las de la vida cotidiana. Es más cómodo expresarlas en kilómetros por segundo que en kilómetros por hora. La conversión de una a otra se realiza multiplicando o dividiendo el valor numérico por 3.600. Por ejemplo, una velocidad de 3.600 kilómetros por hora corresponde exactamente a un kilómetro por segundo.

velocidades no son tan fáciles de alcanzar cuando se trata de objetos de tamaño considerable. Por eso, la exploración espacial, que requiere romper con la atracción terrestre y en consecuencia alcanzar la velocidad de escape, no es tarea sencilla. Sin embargo, la tecnología moderna permitió alcanzar esta velocidad hace ya cincuenta años.

El concepto de velocidad de escape puede aplicarse a cualquier astro, y solo depende de su masa y de su radio. Por ejemplo, en la superficie del Sol llega a los 600 kilómetros por segundo, un valor que nuestra tecnología nunca podría alcanzar. Cuanto más masivo y pequeño sea el astro, más elevada será su velocidad de escape. También se sabe que la luz viaja a una velocidad muy alta, pero finita: 300.000 kilómetros por segundo. *A priori,* nada impide imaginar un astro lo suficientemente masivo y compacto como para que su velocidad de escape alcance, o incluso supere, este valor. En ese caso, tal astro sería perfectamente oscuro: la eventual emisión de luz procedente de su superficie, por lo que parece, nunca podría llegar hasta nosotros.

A finales del siglo XVIII, dos científicos se encargaron de exponer este razonamiento tan simple: el francés Pierre Simon Laplace (1749-1827) y, unos años antes, el inglés John Michell (1724-1793). Sin ser conscientes de ello, acababan de inventar el concepto de agujero negro.

En aquella época, este concepto tenía una utilidad limitada, ya que no había ninguna razón para creer que tales objetos pudieran existir en la naturaleza. En tiempos de Laplace y Michell, el Sol era al astro del Sistema Solar con la velocidad de escape más elevada, pero esta era 500 veces menor que la velocidad de la luz. Para aumentar esta velocidad de escape, había que imaginar o bien un astro de tamaño comparable pero mucho más masivo que el Sol, o bien un astro igual de masivo pero mucho más pequeño. Laplace calculó así que un astro con una densidad comparable a la de la Tierra (en torno a cinco gramos por centímetro cúbico) debería ser 250 veces mayor que el Sol para impedir que la luz se escapase. En otras palabras, su radio tendría que ser del orden de 180 millo-

nes de kilómetros, es decir, el tamaño de la órbita de la Tierra, y la masa de tal astro multiplicaría entonces la del Sol por más de 60 millones… En aquel momento, no se disponía de ninguna prueba de que pudieran existir tales astros.

Los primeros astros compactos

Los cálculos de Laplace y Michell pueden resumirse en un resultado muy simple: un astro es un agujero negro si su radio expresado en kilómetros es inferior a tres veces su masa expresada en masas solares. Dicho de otro modo, el Sol sería un agujero negro si midiera menos de tres kilómetros de radio; una estrella con diez veces la masa del Sol lo sería si tuviera un radio de 30 kilómetros, y, como ya indicamos, un astro con 60 millones de veces la masa del Sol sería un agujero negro si su radio estuviera por debajo de 180 millones de kilómetros. ¿A qué condiciones físicas correspondería esto? En el caso de un astro de la masa del Sol, un radio de solo 3 kilómetros le conferiría una densidad increíblemente alta: ¡18 mil millones de toneladas por centímetro cúbico! A primera vista, una cifra así excede nuestra capacidad de comprensión. Porque, por ejemplo, un centímetro cúbico de un astro semejante tendría una masa aproximada dos millones y medio de veces más grande que la de la torre Eiffel. Parece obvio que tales densidades no existen en nuestro entorno cotidiano. En condiciones normales de temperatura y presión, los materiales más densos son los metales, como el oro, el iridio o el osmio, con una densidad que ronda los 20 gramos por centímetro cúbico. Pero la densidad de cualquier material aumenta si se comprime lo suficiente. Por supuesto, esto no siempre resulta una tarea sencilla, ya que mientras que un gas se comprime con facilidad, no ocurre lo mismo con un sólido: a veces hay que ejercer una presión considerable sobre un objeto para disminuir su volumen (y, en consecuencia, aumentar su densidad). Sin embargo, la astronomía nos proporciona una fuente

natural de presión: bajo el efecto de su propio peso, un cuerpo celeste tiende a encogerse sobre sí mismo. Por ejemplo, las capas externas de un astro, por su propio peso, ejercen presión sobre las internas, que a su vez ejercen presión sobre las capas situadas más abajo, y así sucesivamente. La presión central dentro de un astro puede así ser muy elevada, al igual que su densidad. En el caso del Sol, por ejemplo, aunque su densidad *media* es de solo 1,3 gramos por centímetro cúbico (esto es, un 30 % más que el agua de la Tierra), esta cifra esconde enormes disparidades entre las capas externas, de muy baja densidad, y el núcleo de nuestra estrella, que se acerca a los 180 gramos por centímetro cúbico, es decir, entre ocho y diez veces la densidad de los materiales más densos conocidos en la Tierra. Más cerca de nosotros, el núcleo de la Tierra no escapa a este efecto: compuesto por una mezcla de hierro y níquel que, en la superficie, tendría una densidad de unos 8 gramos por centímetro cúbico, se comprime hasta alcanzar en el centro una densidad de 13 gramos por centímetro cúbico, es decir, más de un 50 % de aumento.

Las estrellas no son los astros más compactos. A lo largo de la década de 1860, se descubrió una nueva categoría: las enanas blancas. Estas se caracterizan por una temperatura en superficie más elevada que la de las estrellas, una masa comparable, pero una luminosidad mucho menor, señal de que su tamaño es mucho más pequeño que el de las estrellas. A igual superficie, un objeto es tanto más luminoso cuanto más caliente; si las enanas blancas son a la vez más calientes y menos luminosas que las estrellas, es porque son mucho más pequeñas.

Estos objetos se descubrieron porque orbitaban alrededor de unas cuantas estrellas conocidas, como por ejemplo Sirio, pero eran lo suficientemente masivos como para perturbar la trayectoria de su vecina. De hecho, todas las estrellas de nuestra Galaxia giran alrededor de su centro, pero muy lentamente a escala humana: nuestro Sol, por ejemplo, tarda 200 millones de años en dar una vuelta a la Galaxia. No todas las estrellas comparten exactamente el mismo movimiento alrededor del centro galác-

tico, de manera que las estrellas que se encuentran muy cerca unas de otras en un momento dado solo están en esa posición de forma temporal, y en realidad tienen velocidades relativas de unos pocos kilómetros o de decenas de kilómetros por segundo. A nivel visual, estos movimientos de las estrellas se traducen en un ligero desplazamiento en la bóveda celeste, el movimiento propio, que es muy lento. A modo de ejemplo, Arturo, que es una de las estrellas brillantes con movimiento propio más importantes, se ha desplazado unos 1,25 grados, es decir, dos veces y media el diámetro aparente de la Luna, en 2.000 años. Debido a sus órbitas en la Galaxia, las estrellas no se mueven exactamente en línea recta, pero este efecto es insignificante durante unos cuantos siglos o miles de años, por lo que el movimiento propio que esperamos observar desde la Tierra es rectilíneo y uniforme. Sin embargo, esto puede no ser así si, en lugar de una estrella única, observamos un par de estrellas que orbitan muy juntas una en torno a la otra. En este caso, es su centro de gravedad común el que se desplazará de forma rectilínea y uniforme, y las dos estrellas oscilarán alrededor de esta posición. En el caso de Sirio, el astrónomo alemán Friedrich Bessel (1784-1846) observó irregularidades en su movimiento propio compatibles con la presencia de un compañero, aunque este permanecía invisible. Se trataba pues de un astro con una masa comparable a la de una estrella, pero cuya luminosidad era incomparablemente más débil. Fue así como, en 1862, Alvan Graham Clark (1832-1897) descubrió a este compañero invisible, que recibió el nombre de Sirio B. El carácter extremo de este astro, habida cuenta de su pequeño tamaño en relación con su masa, se comprendió más tarde, en 1910. De acuerdo con las mediciones modernas, Sirio B posee una masa casi idéntica a la del Sol y un radio menor que el de la Tierra: 5.840 km, es decir, más de cien veces menor que el del Sol. Por consiguiente, su densidad media es considerable, ya que presenta más de dos toneladas por centímetro cúbico, una cifra que en realidad se incrementa hasta alcanzar más de treinta toneladas por centímetro cúbico en su región central.