MUY INTERESANTE

EDICIÓN COLECCIONISTA



ENLACE AL CANAL

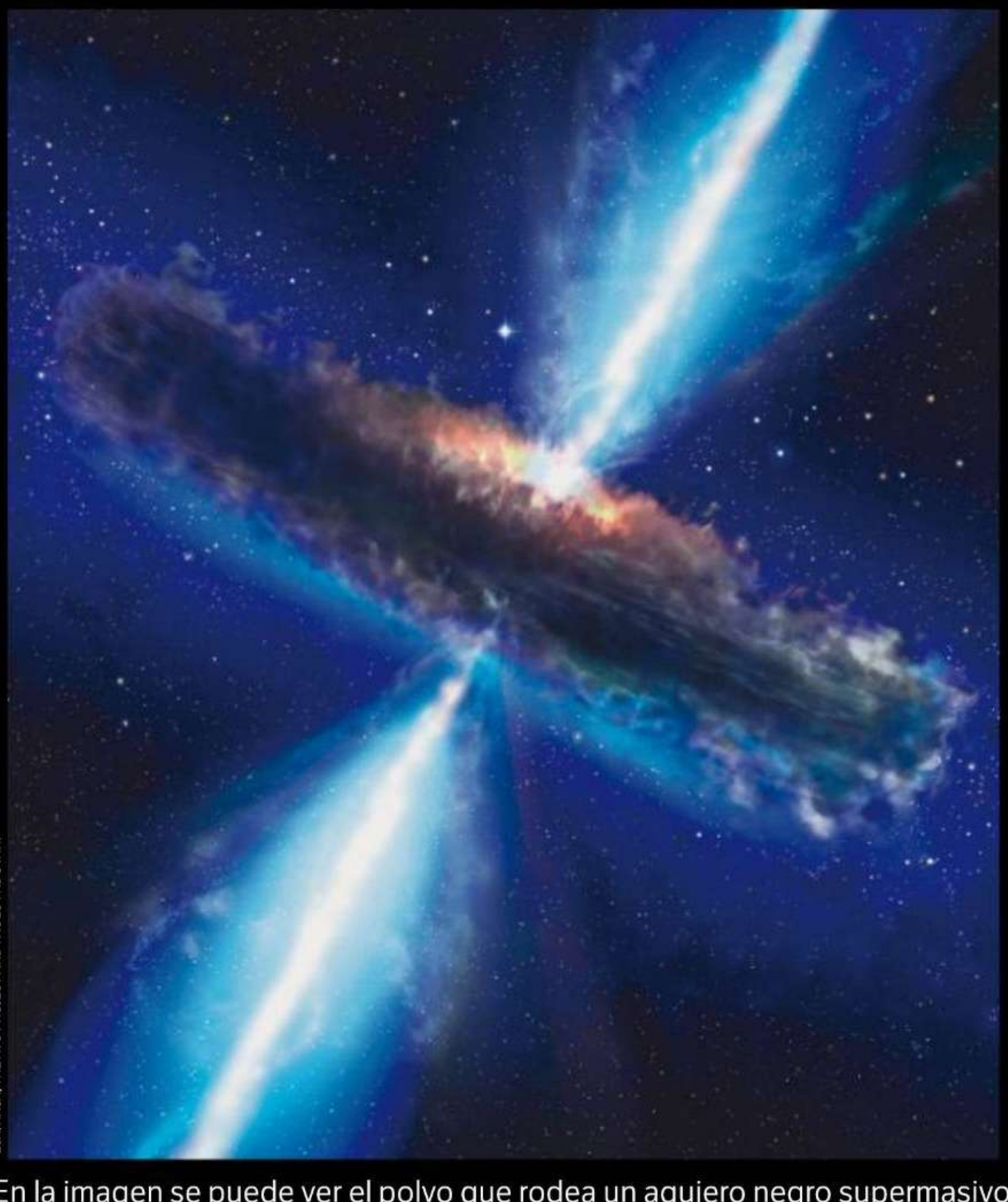
x.com/byneontelegram

Ó escanea el código QR:

AGUJEROS NEGROS

CÓMO ENCONTRAR LO QUE NO SE VE

QUÉ SEÑALES DELATAN SU PRESENCIA, CÓMO SE FORMAN, POR QUÉ NADA PUEDE ESCAPAR DE ELLOS Y QUÉ OCURRE CON EL ESPACIO Y EL TIEMPO A SU ALREDEDOR



ESA/NASA, THE AVO PROJECT AND PAOLO PADOVANI

En la imagen se puede ver el polvo que rodea un agujero negro supermasivo. Los agujeros negros acechan en los centros de la galaxias activas, en entornos similares a los de los violentos tornados terrestres.

«LOS AGUJEROS NEGROS NO SON LAS CÁRCELES ETERNAS QUE SE PENSABA QUE ERAN. DE UN AGUJERO NEGRO PUEDEN SALIR COSAS, HACIA EL EXTERIOR Y, POSIBLEMENTE, HACIA OTRO UNIVERSO. ASÍ QUE SI SIENTES QUE ESTÁS EN UN AGUJERO NEGRO, NO TE RINDAS; HAY UNA SALIDA»

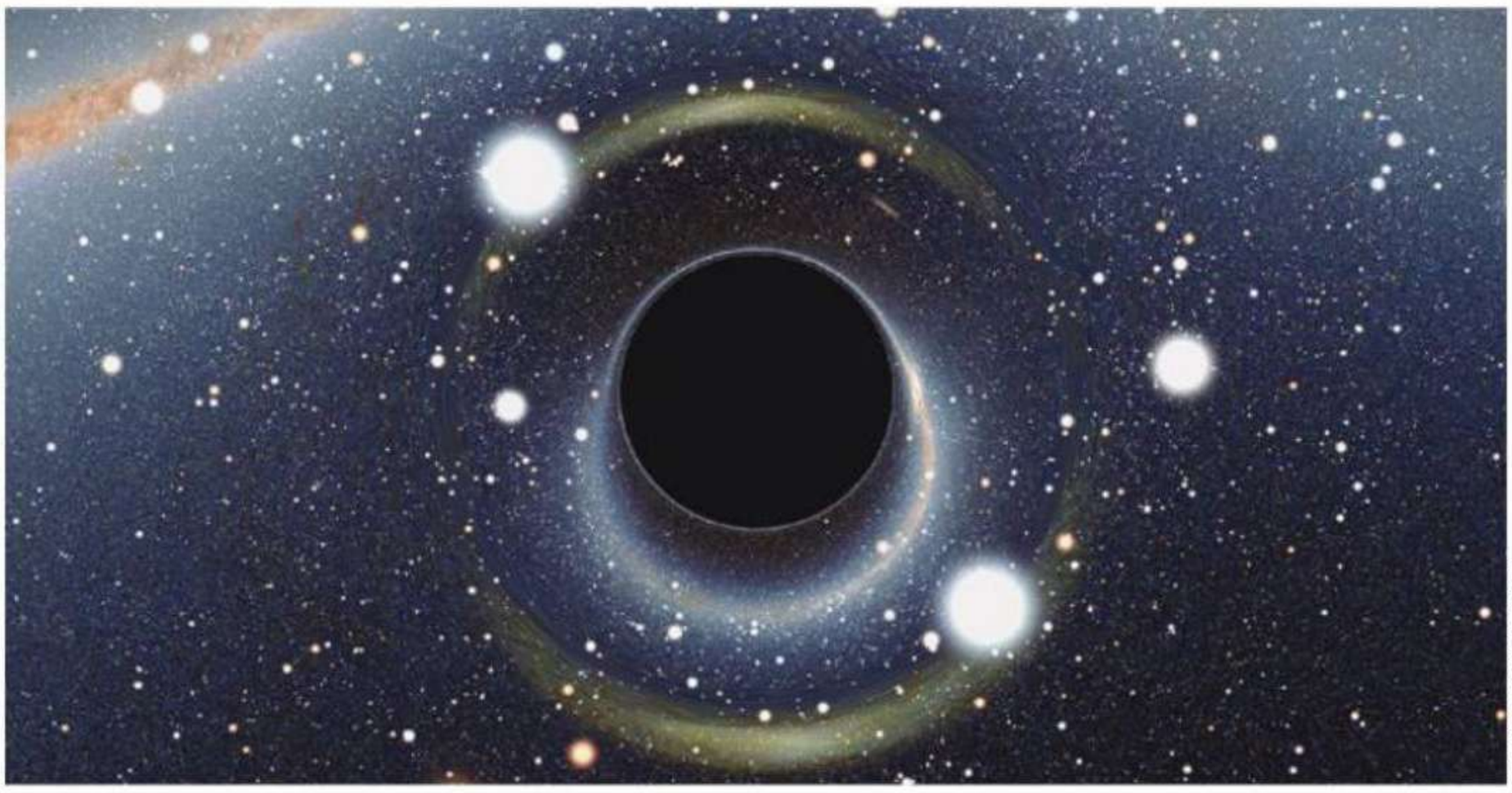
Stephen Hawking (1942-2018)

Físico teórico, astrofísico, cosmólogo y divulgador científico

Donde la luz se rinde

Antes de que los agujeros negros pudieran demostrarse con ecuaciones o rastrearse en el cielo, ya habitaban en otra parte. En la imaginación. Eran abismos, remolinos, la oscuridad de la que nadie volvía. Tal vez por eso pocas ideas científicas han mantenido una relación tan fértil con la cultura popular: la literatura ayudó a imaginarlos primero y, cuando la física terminó por hacerlos reales, ellos devolvieron el favor transformando completamente nuestra manera de contar el universo. La historia de esa transformación es extraordinaria, y nos la cuenta en estas páginas David Blanco Laserna —escritor, físico teórico y profesor de didáctica de las matemáticas en la Universidad Rey Juan Carlos de Madrid—. Pero la historia no termina cuando la ciencia acepta su existencia. Quedaba la pregunta que verdaderamente importa: ¿cómo ves algo que por definición no se ve? Astrónomos, ilustradores, escritores y cineastas pasaron décadas imaginando. De la mancha oscura pura al remolino cósmico. Hasta que las ecuaciones permitieron construir retratos más precisos, y *Interstellar* encontró una de las traducciones más poderosas que el cine ha intentado jamás. Los agujeros negros son un recordatorio de que habitamos una porción ínfima de un cosmos inabarcable para nuestra imaginación, que nunca dejará de sorprendernos y desafiarnos. Quizá esa sea la verdadera razón de su fascinación. Los agujeros negros viven en la frontera exacta donde lo que parece imposible deja de pertenecer a la fantasía y comienza, incómodamente, a formar parte de lo real. Sumerjámonos en ellos y recordemos, como hizo Stephen Hawking, la inscripción que presidía el infierno de Dante: «Quienes aquí entráis, abandonad toda esperanza».

CRISTINA ENRÍQUEZ
DIRECTORA



ESO/ ALAIN RIAZUELO (CNRS)

Representación artística de un agujero negro en la Nube de Magallanes.
Su gravedad curva la luz produciendo peculiares formas.

CONTENIDOS

ESTRELLAS INVISIBLES, ESTRELLAS OSCURAS 8

EL UNIVERSO DE LAS VANGUARDIAS 40

LA TEORÍA MÁS DIFÍCIL DEL MUNDO 62

LA EDAD DE ORO DE LOS AGUJEROS NEGROS 94

EL ARTE DE VOLVER VISIBLE LO INVISIBLE 122

BIBLIOGRAFÍA 160

ENLACE AL CANAL

x.com/byneontelegram

Ó escanea el código QR:

CRÉDITO DE PORTADA: ESO

ESO, ESA/ HUBBLE, M. KORNMESSER

Los físicos y los astrónomos han exigido numerosas pruebas y han tenido que recorrer un largo camino antes de convencerse de la existencia de los agujeros negros.

ESTRELLAS INVISIBLES, ESTRELLAS OSCU

Agujero negro rodeado por su disco de acreción. Aunque estos objetos no emiten luz directamente, la intensa gravedad sobrecalienta la materia y las partículas a su alrededor, haciéndolos detectables para los científicos.

SHUTTERSTOCK

RAS

Como casi todas las ideas que seducen la imaginación humana, los agujeros negros ofrecen una singular combinación de mito y prosaica realidad. Aunque en su caso hay que reconocer que, hasta lo más prosaico que se pueda decir de ellos, desprende cierto sentido de la maravilla. En definitiva, lo más sorprendente de los agujeros negros acaba siendo que realmente existan. Son soberanos de las regiones más enigmáticas del universo, en las que cualquiera está invitado a entrar, pero de las que nadie puede salir. Qué sucede en la trastienda de un agujero negro será siempre objeto de especulaciones, porque el viajero que alcance a descubrir el misterio nunca regresará para contarlo. La única sonda segura para explorar sus profundidades son unas matemáticas particularmente crípticas, en cuya oscura complejidad se han perdido las mentes más brillantes. Además de guardar secretos inexpugnables, los agujeros negros ofrecen gratis los servicios de una máquina del tiempo. Una máquina, eso sí, capaz de atraparte y destruirte. Si quieres viajar al futuro, solo tienes que acercarte hasta la frontera invisible que protege un agujero negro. Eso sí, pon todo tu cuidado en no traspasarla.

Ante la desvergonzada inverosimilitud que exhiben los agujeros negros, el escepticismo científico ha seguido la máxima de Carl Sagan: «Afirmaciones extraordinarias demandan una evidencia extraordinaria». Los físicos y los astrónomos han exigido un sinfín de pruebas y han tenido que recorrer un largo camino antes de convencerse de su existencia. Como veremos, parte de esas reticencias procedían del sentido común y, por tanto, de los prejuicios. Los agujeros negros ofrecen un ejemplo notable de lo difícil que resulta concebir fenómenos ajenos por completo a nuestra experiencia cotidiana. En el esfuerzo, no ya de comprenderlos sino de imaginarlos, de aproximarse tentativamente a ellos a través de una imagen o incluso de asignarles un nombre, los científicos han echado mano de la cultura. En la literatura, el arte o la filosofía han buscado referencias, antecedentes, analogías, correspondencias, metáforas, sentido. De esta manera, los agujeros negros han propiciado un peculiar cortejo entre ciencia y cultura, casi tan elaborado como el de las aves del paraíso, en el que tan pronto una y otra se buscan como se esquivan, tan pronto se miran de frente como se dan la espalda con un quiebro y se evitan.

Esta es una historia de historias, de nociones culturales que han interferido o ayudado a definir un concepto científico elusivo, pero también de la sombra proyectada por una nueva idea física en la cultura. Este EDC se sitúa así en un cruce de caminos, donde florecen los frutos de imaginaciones muy diversas, científicas y matemáticas, pero también literarias y artísticas.

¿Y por dónde empezar? En el fondo, un momento resulta casi tan bueno como cualquier otro, así que pongamos que nuestra historia arranca una sofocante noche de verano, el 20 de junio de 1756, en la ciudad de Calcuta. En esta escena de presentación no encontraremos a ningún científico en su despacho, con la mirada perdida en una pizarra cubierta de ecuaciones, ensimismado, mientras trata de alumbrar una revolucionaria teoría de la gravedad. Tampoco aparecen en ella as-

LOS AGUJEROS NEGROS OFRECEN UNA SINGULAR COMBINACIÓN DE MITO Y PROSAICA REALIDAD



SHUTTERSTOCK

Encuentro histórico entre Einstein y Oppenheimer debatiendo sobre la estructura de la materia. Aquel mismo año, 1939, estalló la Segunda Guerra Mundial.

trónomos ni telescopios. No la protagonizan galaxias, cielos ni estrellas. La escena tiene lugar en un ámbito muy alejado de la abstracción de la física. Se desarrolla casi a ras de suelo, pegada a lo más mundano, a la guerra, a la venganza, a la codicia, a la muerte. Estos ingredientes dieron forma a un relato sobrecogedor, con un punto macabro, que se transmitiría de boca en boca, de una generación a la siguiente, en una carrera de relevos que iniciarían los ingleses del siglo XVIII y que terminaría por propagarse a toda la esfera de la cultura anglosajona. En particular, se instaló en la memoria de un físico estadounidense, que se inspiraría en ella en la década de 1960 para bautizar con el nombre de «agujero negro» una idea enigmática y polémica, rechazada por Albert Einstein y vindicada por Robert Oppenheimer, una idea que llevaba décadas vagando como un paria por las páginas de las revistas especializadas, a la búsqueda de su nombre definitivo.

EL AGUJERO NEGRO DE CALCUTA

Allí donde concurren los intereses políticos y comerciales se levantan grandes metrópolis. Desde tiempo inmemorial, la desembocadura del río Hugli, al norte de la bahía de Bengala, ofreció a los mercaderes una ubicación ideal para el comercio, y a los militares, una plaza fácil de defender. Ventajas que fueron dando forma a Calcuta, la ciudad de los palacios, motejada por algunos como ciudad de la alegría y, por otros, como ciudad de la tristeza, suma de contradicciones, fuente de riqueza y sima sin fondo de miseria, centro cultural de la India, sede de la capital del futuro Raj y uno de sus principales puertos comerciales. Tras desplegar sobre la mesa el mapa de Asia meridional, la Compañía Británica de las Indias Orientales albergó pocas dudas a la hora de elegir Calcuta para cerrar su línea de asentamientos, que arrancaba en Bombay y recorría de manera intermitente toda la costa india. Si el propósito inicial de los ingleses había sido ganar dinero a espuertas con el comercio del algodón, de la

seda, el té, las especias o el tinte de índigo, sin entrometerse demasiado en la política local, esa declaración de buenas intenciones, como tantas otras, se fue malogrando con el paso del tiempo. La creciente inestabilidad de la dinastía mogol ofrecía demasiadas tentaciones al afán de lucro, no solo de la Corona inglesa, sino también de otras potencias europeas, como Holanda, Portugal, Francia y Dinamarca.

La semilla de la discordia se había plantado antes de la llegada de los occidentales. El poder de los mogoles había ido menguando en la misma medida que aumentaba la autonomía de los nababs, príncipes o gobernantes provinciales. Autonomía que muchas veces aprovechaban los nababs para tratar directamente con los europeos, que ansiaban concesiones comerciales o territoriales cada vez más ventajosas. Con todo, la sombra creciente de la intromisión británica no era bien vista por todos los representantes del poder en la India. A finales del siglo XVII la Corona británica había concedido a la Compañía de Indias permiso para armar un ejército, acuñar moneda, adquirir y administrar territorios, concesiones que la compañía había explotado a conciencia. La construcción del fuerte William, con el propósito de proteger el asentamiento comercial de Calcuta de revueltas locales e incursiones extranjeras, había supuesto un hito más en esta progresiva y silenciosa colonización. A pesar de que las autoridades indias caían una y otra vez en la tentación de los beneficios inmediatos, eran muy conscientes de las consecuencias que traerían a largo plazo sus cesiones. Habían abierto su casa a los europeos para celebrar una fiesta de final incierto. Cada hora que pasaba, los invitados les compraban más habitaciones, que acto seguido cargaban de cerrojos y hombres armados.

A mediados del siglo XVIII, el joven nabab de Bengala, Siraj ud-Daulah, observaba con creciente inquietud cómo se intensificaban las hostilidades entre ingleses y franceses, empeñados en transformar sus puestos comerciales en la India en bastiones militares. La confrontación alcanzó su cenit tras el estallido en Europa de la guerra de los Siete Años. Los británicos se abatieron entonces sobre el asentamiento de la Compañía Francesa de las Indias Orientales en la ciudad de Chandernagor, cerca de Calcuta, que contaba con la protección del Fuerte de Orleans, del que no dejaron piedra sobre piedra. Esta escalada militar convirtió la inquietud de Siraj en alarma e hizo que exigiera a Roger Drake, gobernador británico de Calcuta, que detuviera de inmediato la construcción de nuevas fortificaciones en la futura capital de Bengala. El gobernador hizo oídos sordos a sus requerimientos y las fichas de dominó empezaron a caer una sobre otra, precipitando los acontecimientos.

El 16 de junio de 1756, Siraj ud-Daulah marchó sobre Calcuta al mando de un ejército de cincuenta mil hombres, adornado con quinientos elefantes y cincuenta cañones. Este vistoso despliegue consiguió captar por fin la atención de Roger Drake. El gobernador pasó de ignorar desdeñosamente al nabab a huir hacia los barcos ingleses fondeados en el puerto, acompañado de gran parte de su personal y de otros residentes extranjeros. En el fuerte William solo quedaron unas doscientas personas, al mando de un civil, John Zephaniah Holwell, al que encomendaron la ingrata misión de alar-

LA VARIOLIZACIÓN SE PUEDE DESCRIBIR COMO UNA VARIANTE UN TANTO AGRESTE Y PRIMITIVA DE LA VACUNACIÓN



NATIONAL PORTRAIT GALLERY

Robert Clive y Mir Jafar tras la batalla de Plassey, 1757 (1760), de Francis Hayman. Dos décadas después, los científicos postularon la existencia de «estrellas invisibles».

gar la resistencia el tiempo necesario para que el gobernador pudiera ponerse a salvo. En el momento del incidente, Holwell, cirujano de formación, trabajaba para la Compañía de las Indias como recaudador de impuestos. A diferencia de otros europeos, que transitarían por tierras extranjeras como los turistas amantes de los Starbucks, Holwell había abierto bien los ojos y los oídos, y había dejado que la cultura india le entrara por todos los poros. De origen irlandés, sus creencias católicas se impregnaron de hinduismo y llegó a convencerse de que en los Vedas o los Upanishads residía la clave para descifrar el verdadero significado de la Biblia. Seguramente fue su adhesión a la metempsicosis la que lo convirtió en un ferviente defensor de los derechos de los animales y del vegetarianismo. Holwell también ocupa un discreto lugar dentro de la historia de la medicina occidental por sus descripciones de la inoculación de viruela o variolización que había observado practicar en Bengala. Esta técnica, muy extendida en el Oriente Medio y Próximo de la época, ya había llegado a oídos de los europeos, a través, por ejemplo, de las crónicas de Mary Montagu, que tuvo oportunidad de familiarizarse con ella en Turquía. La variolización se puede describir como una variante un tanto agreste y primitiva de la vacunación. Consiste en exponer el organismo, en lugar de a variedades más débiles o amables de la viruela, a la versión sin descafeinar del virus. El procedimiento funciona porque el virus se introduce a través de un pequeño corte en la piel, de modo que la infección se extiende mucho menos que si lo hiciera a través de las vías respiratorias.

Al margen de su curiosidad médica, o de sus inquietudes espirituales o nutricionales, Holwell no disponía de los recursos ni del genio militar necesarios para hacer frente al ejército del nabab. Por mucho celo que hubieran desplegado los ingleses a la hora de fortificar Calcuta, poco podían hacer doscientos hombres frente a cincuenta mil. Los propios asediados no tuvieron dificultades para llegar a la misma conclusión y pronto se multiplicaron las deserciones. No solo de los cipayos o de los mercenarios holandeses, que a fin de cuentas se estaban jugando la vida en un conflicto que les traía al pairo, sino también de los propios británicos. Para rematar la situación, los gusanos del fuerte, sin corresponder al amor de Holwell hacia los anima-

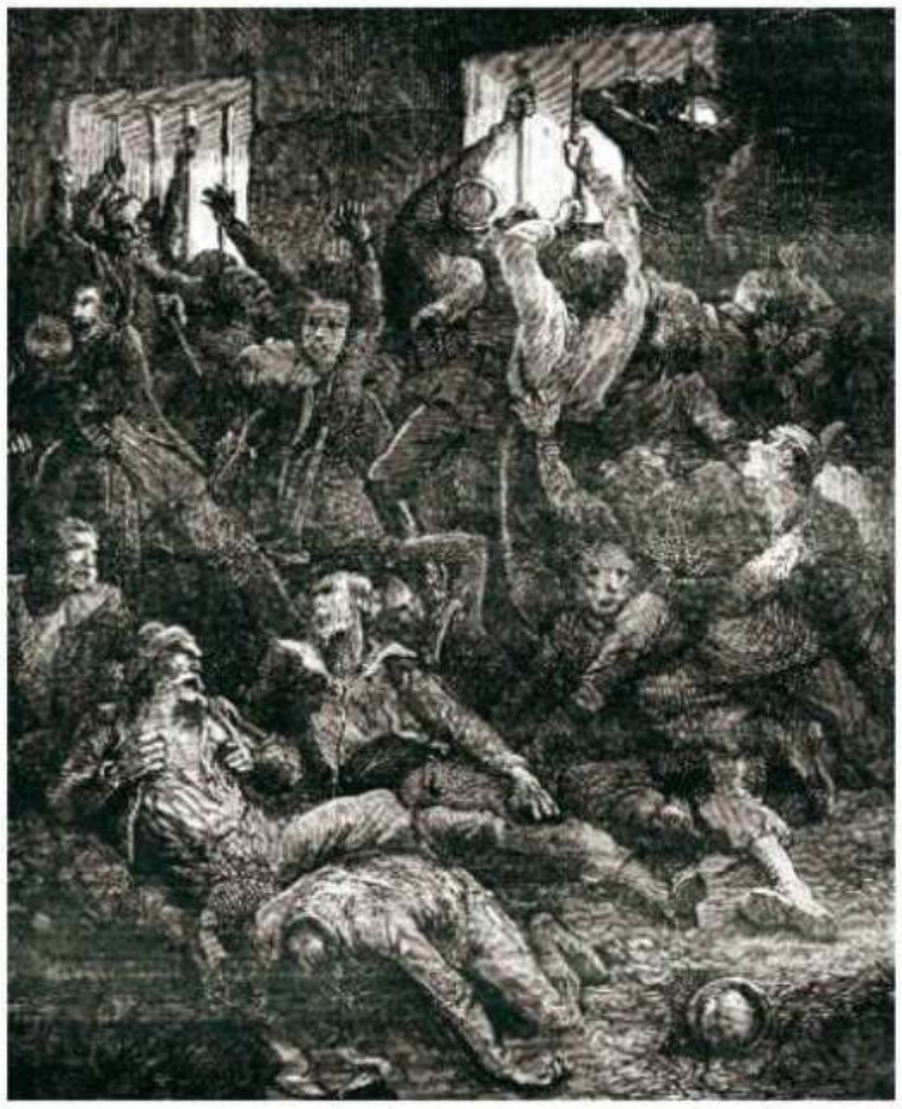
les, tuvieron a bien comerse gran parte de las municiones. Las que no se comieron tampoco sirvieron de mucho, ya que la humedad había arruinado casi por completo la pólvora que almacenaban. En un ejercicio de pundonor, el fuerte William resistió cuatro días al asedio y el 20 de junio los británicos izaron la bandera blanca.

Una versión de lo que sucedió después de que las tropas de Siraj ud-Daulah entraran en el fuerte puede encontrarse en un librito de apenas medio centenar de páginas. Su título interminable, *spoilers* incluidos, era muy del gusto de la época: «Un relato verídico de las muertes deplorables de los caballeros ingleses, y de otros, que se asfixiaron en el Agujero Negro del fuerte William, en Calcuta, en el reino de Bengala, en la noche que siguió al día 20 de junio de 1756, contado en una carta a un amigo». El agujero negro al que se refiere aquí Holwell no estaba situado en el centro de la Vía Láctea ni era un portal interdimensional abierto por algún brahmán. Era el nombre con el que se conocía una pequeña celda del fuerte en la que las autoridades británicas confinaban a los condenados por delitos menores.

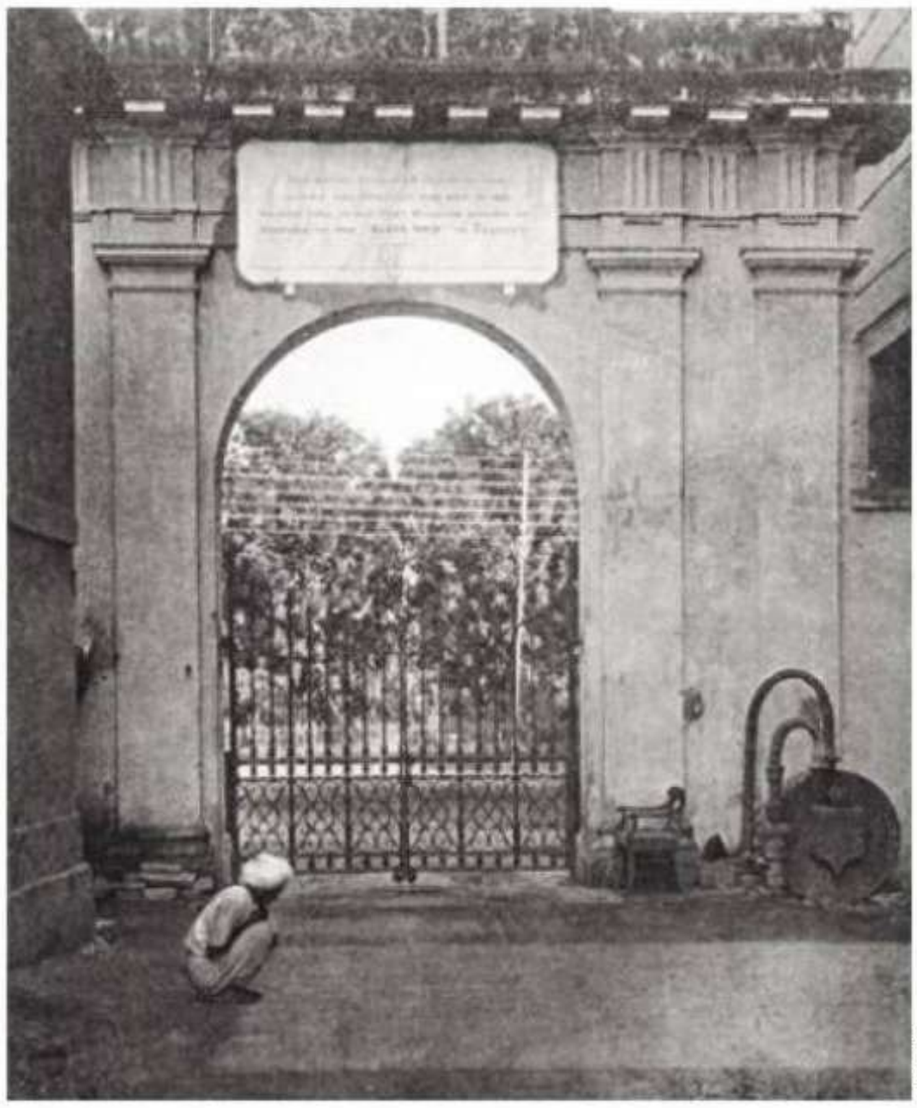
Según Holwell, Siraj ud-Daulah le dio su palabra de soldado de que no se infligiría ningún castigo a los prisioneros que se habían rendido. Sin embargo, la protección del nabab se fue debilitando a medida que sus instrucciones iban pasando de eslabón en eslabón a lo largo de la cadena de mando, hasta llegar a los soldados de más bajo rango, aquellos que precisamente habían sufrido más bajas durante el asedio. Holwell los encontraría más dispuestos a la venganza que a respetar las condiciones de la capitulación. En cuanto anocheció, los soldados indios condujeron a los ingleses hasta una celda angosta, pensada para albergar solo a dos o tres prisioneros, el famoso agujero negro, y los obligaron a entrar en él a punta de mosquete o de cimitarra. Holwell llegó a contar 146 prisioneros. La mayoría desconocía las verdaderas dimensiones del espacio donde iban a ser confinados: cinco metros y medio de largo por cuatro metros y medio de ancho. La celda disponía de dos pequeñas ventanas con gruesos barrotes que no facilitaban la circulación del aire. Holwell, uno de los primeros en entrar, se apostó en una de ellas, decisión que salvó su vida. Cuando la puerta —que se abría hacia dentro—, quedó atrancada, los relojes de Bengala marcaban las ocho. En el exterior, la ciudad se rendía a una noche sofocante de junio. Para empeorar la situación, el fuego declarado durante el asedio seguía consumiendo el fuerte, aumentando considerablemente la temperatura.

Muchos prisioneros se hallaban malheridos o habían quedado exhaustos tras el combate. Si damos crédito a las cuentas que hizo Holwell, en la celda cada individuo disponía del espacio justo para permanecer de pie: un exiguo cuadrado de unos cuarenta centímetros de lado. La mayoría fue víctima de la deshidratación, el hacinamiento y la asfixia. Los carceleros se mostraron insensibles ante las peticiones de socorro y los intentos de soborno. Unos, por crueldad o animadversión hacia los ingleses. Otros, por miedo a sufrir las iras del nabab si acudían a despertarlo en mitad de la noche para consultarle un posible cambio de ubicación de los prisioneros. Algunos guardias entregaron sombreros llenos de agua a los ingleses,

LOS CARCELEROS SE MOSTRARON INSENSIBLES ANTE LAS PETICIONES DE SOCORRO Y LOS INTENTOS DE SOBORNO



ASC



ISTOCK

Las imágenes muestran la representación artística (izquierda) y el emplazamiento físico en 1895 (derecha) del infame calabozo de Calcuta (1756),

a los que veían atormentados por la sed, no por compasión, sino para provocar peleas entre ellos y disfrutar viendo cómo derramaban el agua. Los cautivos permanecieron encerrados en el agujero negro diez horas interminables, hasta que el nabab se levantó y fue informado de la situación. Para entonces ya habían muerto más de cien prisioneros, cuyos cadáveres se amontonaban en la celda, aplastando a los escasos supervivientes. Según la versión de Holwell, 146 personas entraron en la celda y solo salieron vivos de ella veintitrés.

Ocho meses después de entregar el fuerte William al ejército del nabab, Holwell fue liberado y enviado de vuelta a Inglaterra a bordo del balandro *Syren*. Durante el viaje, el recuerdo de la masa compacta de compañeros agonizantes, cuyas vidas se iban apagando a su alrededor a medida que pasaban las horas de una noche eterna, bajo un calor abrasador, sin apenas aire, lo atormentaba. Para conjurar las imágenes espantosas que rondaban su cabeza sin descanso, perdía la vista en el horizonte, sentado en la cubierta del barco, tratando de sentirse presente en un espacio que representaba todo lo opuesto al agujero negro de Calcuta. Ante sus ojos se desplegaba una extensión de agua ilimitada, sin muros ni barrotes, donde el aire circulaba sin más impedimentos que las velas del Syren. La travesía resultó de una placidez desacostumbrada y, poco a poco, Holwell fue saliendo de su estupor. Mientras cruzaban la línea del Ecuador, tomó la determinación de dar a conocer su experiencia al mundo.

Sin duda, Holwell fue un testigo nada imparcial de los acontecimientos. Su versión de lo sucedido desató un tsunami de indignación en Gran Bretaña. Algunos utilizaron la historia como arma de propaganda política para inflamar los ardores patrióticos y dar rienda suelta a todas las ambiciones de depredación territorial de la Compañía de Indias. Las represalias que se tomaron los británicos a continuación fueron el horno en el que se cocieron los primeros ladrillos que cimentarían el Raj. Un año después de que Siraj ud-Daulah entrara en Calcuta con sus elefantes, los in-

gleses habían recuperado el control de la ciudad. Una cenagosa sucesión de cálculos e intrigas acabaría con el nabab ejecutado y con su cuerpo arrojado al río. Quince años después, Calcuta se había convertido en la capital de la India británica, con un gobierno asentado en el mismo fuerte donde había sufrido la mayor de las humillaciones. Sea como fuere, con el paso del tiempo, los historiadores han matizado las cuentas de Holwell, rebajándolas hasta unos sesenta y cuatro prisioneros, cifras que vuelven el relato más creíble, aunque apenas suavizan sus aspectos más truculentos.

La historia del encierro inhumano de un centenar de prisioneros ingleses en una celda angosta y mal ventilada produjo un impacto extraordinario en la cultura popular anglosajona. De hecho, todavía se puede encontrar en algunos diccionarios la expresión proverbial «agujero negro de Calcuta» con el significado de «habitación calurosa, desagradablemente llena de gente». Puede aplicarse a cualquier espacio de hacinamiento, como un vagón de metro en hora punta. En cuanto a la historia en sí, alimentó la imaginación de numerosos escritores. La vemos asomar, por ejemplo, en *Las minas del rey Salomón*, de Henry Rider Haggard, en *El entierro prematuro*, de Edgar Allan Poe, o en las obras de autores tan dispares como Mark Twain, Patrick O'Brian, Thomas Pynchon o Stephen King. Sin necesidad de abrir un libro, muchos británicos y estadounidenses escucharon la expresión en infinidad de programas de televisión, desde los años cincuenta en adelante, o en películas como *La familia Addams* de Barry Sonnenfeld. De esta permanencia en la memoria colectiva puede dar fe uno de los físicos más notables del siglo XX que, por los caprichos del destino, vino a convertirse en un perfecto desconocido para el gran público: el estadounidense Robert Dicke.

EL ARTE DE NOMBRAR LO QUE NO TIENE NOMBRE

Robert Henry Dicke se quedó a las puertas de la gloria y de pasar a la historia como autor de uno de los hitos científicos más importantes del siglo XX: el descubrimiento de la radiación de fondo del Big Bang. Dicke tuvo un vislumbre de este episodio legendario, que habría tenido lugar casi al comienzo del universo, cuando su expansión bajó la temperatura lo suficiente para que los primeros átomos coalescieran. Esta forja de átomos primigenios acabaría desprendiendo una ingente cantidad de luz, en una especie de fogonazo primordial, integrado por partículas de luz, o fotones, que se liberarían para iniciar un largo viaje sin retorno. Dicke aplicó leyes físicas y matemáticas para definir mejor este acontecimiento dictado por su imaginación y llegó a la conclusión de que, de haberse producido, algunos fotones peregrinos serían absorbidos tarde o temprano por la materia que se cruzara en su camino: nubes de gas o de polvo, estrellas, la superficie de un planeta, ¿la antena de un radiotelescopio?... La mayoría de los fotones, sin embargo, no tropezaría con ningún obstáculo y continuaría su alegre vagabundeo por el universo durante miles de millones de años. De acuerdo con sus cálculos, esas partículas luminosas integrarían una radiación

TODOS LOS CUERPOS, INCLUSO LOS MÁS FURTIVOS Y SIGILOSOS, DESPRENDEN RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA

electromagnética uniforme que permearía todo el espacio, aquí, en la galaxia Andrómeda y en el más remoto confín del universo. Conformarían una especie de ruido de fondo que se podría detectar con la antena adecuada. Pero aquí el adjetivo «adecuada» tenía su intríngulis, porque el volumen de ese ruido era bajísimo. Se trataba de una radiación de microondas muy débil, que durante mucho tiempo desafió la sensibilidad del instrumental científico. Así estaban las cosas cuando Hitler decidió invadir Polonia.



BOB MATTHEWS, DEPARTMENT OF PHYSICS

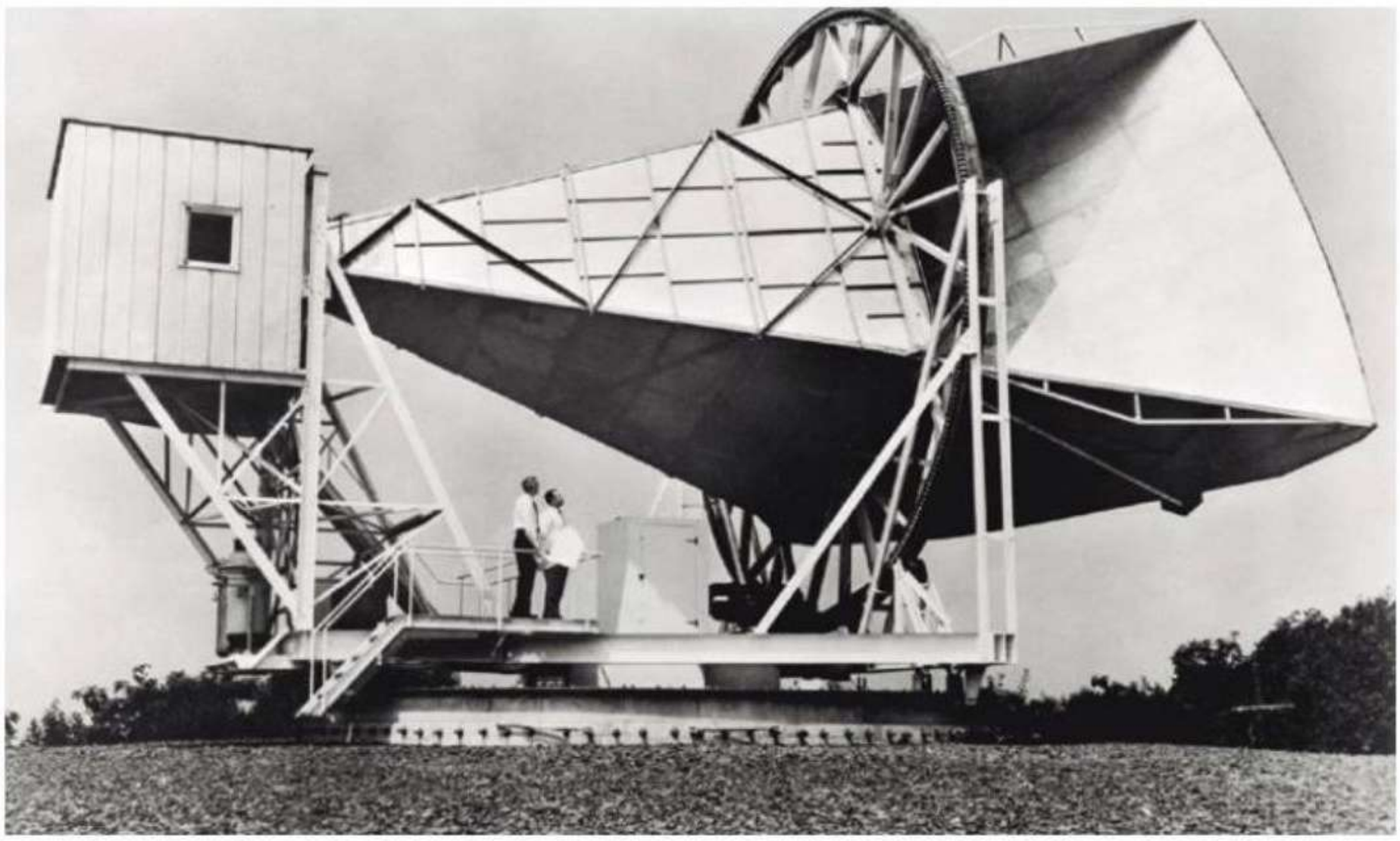
Robert Henry Dicke fue uno de los físicos experimentales y astrónomos más influyentes del siglo XX en los EE. UU.

La Segunda Guerra Mundial dio un impulso extraordinario a la tecnología de detección de ondas electromagnéticas. Hay que tener en cuenta que todos los cuerpos, aun los más furtivos y sigilosos, desprenden radiación electromagnética, es decir, ondas de luz, aunque el ojo humano no alcance a percibirla. Los militares sentían un interés comprensible por detectar esta radiación, sobre todo cuando la generaban vehículos militares, porque al analizarla se podía determinar la posición y velocidad de la fuente. En otras palabras, con un buen radar podías ubicar y poner de manifiesto la presencia de aviones, tanques o misiles. El ejército invirtió ingentes cantidades de dinero y recursos en el desarrollo de esta nueva tecnología. Firmada la paz, pudo aplicarse al estudio de fuentes de radiación menos beligerantes. Objetos estelares, por ejemplo, dando nacimiento a todo un nuevo campo de la ciencia, la radioastronomía.

Durante la guerra, Dicke había trabajado en el Laboratorio de Radiación del Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) y allí había inventado un radiómetro —un instrumento capaz de medir la intensidad de la radiación— extremadamente sensible a las microondas, que terminaría por convertirse en un componente habitual de los radiotelescopios de medio mundo. El talento físico de Dicke se desenvolvía con envidiable soltura tanto en el terreno teórico como en el experimental. No solo era capaz de elaborar conjeturas sobre el origen del universo, sino también de construir los aparatos necesarios para verificarlas. Con la ayuda de dos jóvenes investigadores, Peter Roll y David Wilkinson, se aprestó a la caza de la esquiva radiación de fondo. Desmintiendo la sentencia bíblica de que quien busca encuentra, la caprichosa providencia entregó la señal de microondas no a Dicke, que la estaba buscando con tanto ahínco, sino a dos radioastrónomos de los Laboratorios Bell que estaban haciendo todo lo posible por librarse de ella. Robert Wilson y Arno Penzias llevaban un año intentando eliminar un molesto ruido de fondo en una antena de bocina diseñada precisamente para detectar microondas. La dichosa antena crepitaba a cualquier hora, en primavera y en otoño, registrando una señal sorda que procedía de todos los puntos de la esfera celeste. Wilson y Penzias se habían vuelto locos intentan-

do deshacerse de aquel fastidioso ruido. Lo habían probado todo, hasta atrapar las palomas que habían anidado en el plato de la antena y rascar meticulosamente sus excrementos. Descartaron que las microondas procedieran de los componentes del dispositivo receptor, de la bulliciosa actividad de la ciudad de Nueva York, de una prueba nuclear en el Pacífico, de cualquier punto de la Tierra, de la atmósfera, de los cinturones de Van Allen, del sistema solar o de la Vía Láctea. ¿Qué ubicua fuente extragaláctica asediaba su antena día y noche desde los cuatro puntos cardinales? Al conocer el trabajo teórico del grupo de Dicke, se dieron cuenta de que nunca lograrían eliminar la interferencia. Estaban sintonizando nada más y nada menos que la emisión de radio más antigua del universo: los fotones peregrinos producidos en la forja de los primeros átomos. Después de recibir la llamada de Penzias, Dicke transmitió la mala noticia a sus ayudantes: «Nos han pisado la exclusiva». Para más inri, la antena de Penzias y Wilson había detectado la radiación de fondo gracias a un radiómetro que incorporaba la tecnología desarrollada por Dicke.

Dicke había pasado a interesarse por la cosmología y el estudio de la relatividad general en un momento clave —entre mediados de la década de 1950 y mediados de la década de 1960—, en el que resultaba inevitable que los agujeros negros se cruzaran en su camino. Al igual que muchos otros estadounidenses, Dicke conocía desde niño la trágica historia del agujero negro de Calcuta: un espacio asfixiante, de extraordinaria densidad humana, que conducía a un metafórico colapso. De hecho, había convertido la expresión en una broma privada. Cada vez que algo se perdía en su casa, un calcetín, un reloj, una pinza de la ropa, un juguete de sus hijos, exclamaba: «¡Ah, se lo ha debido de tragar el agujero negro de Calcuta!». Fuera de casa, comenzó a utilizar la expresión para referirse al fenómeno físico de moda, que traía de cabeza a astrónomos y teóricos relativistas, tanto en las conferencias y cursos que impartía como en las conversaciones informales con sus colegas. Entre ellos figuraba



ASC

Arno Penzias y Robert W. Wilson en la antena de bocina situada en las instalaciones de los Laboratorios Bell en Holmdel, Nueva Jersey.

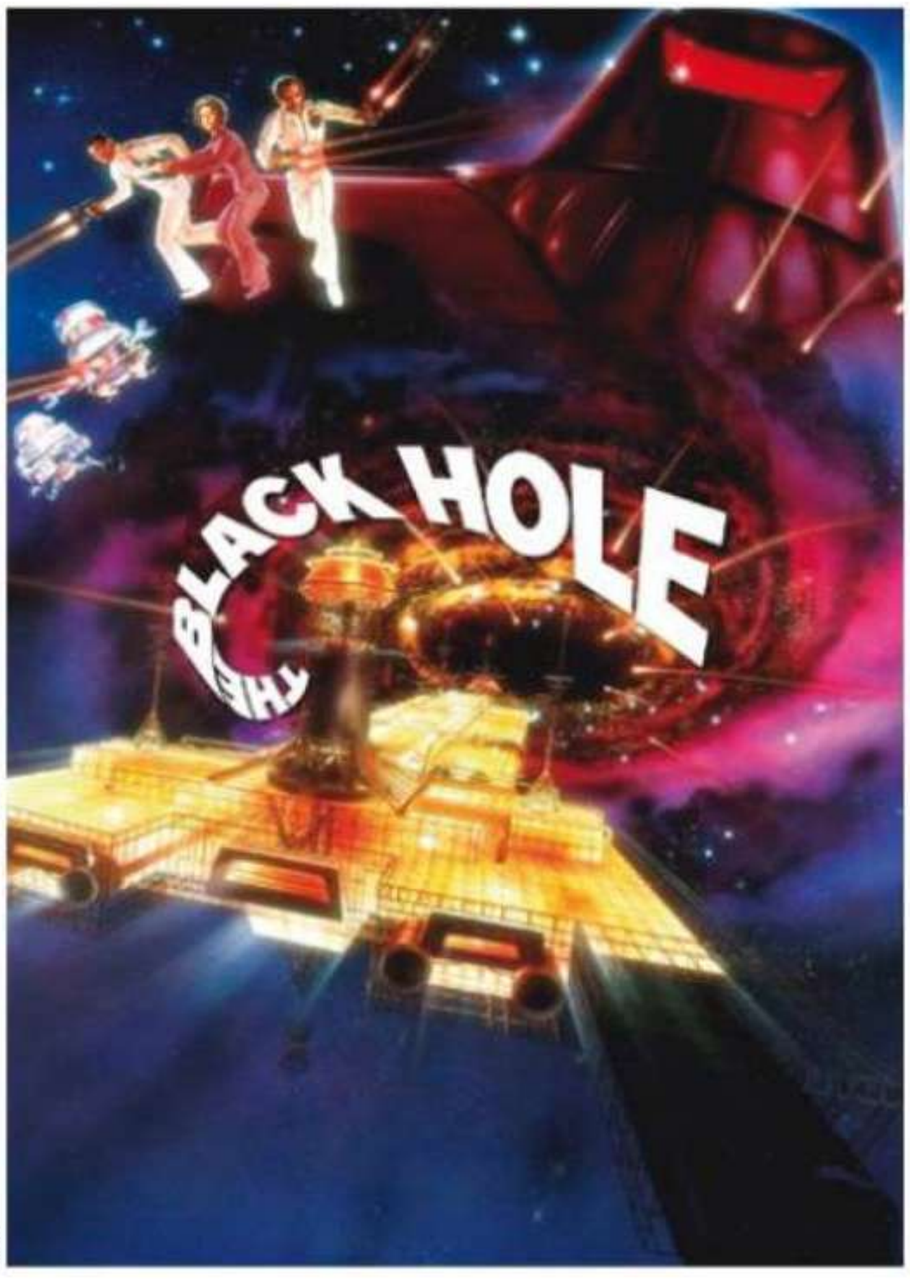
DICKE CONOCÍA DESDE NIÑO LA TRÁGICA HISTORIA DEL AGUJERO NEGRO DE CALCUTA

su compañero de la Universidad de Princeton, John Wheeler. Wheeler, uno de los grandes *popes* de la física estadounidense de la época, sería el principal responsable de la difusión y aceptación del término «agujero negro».

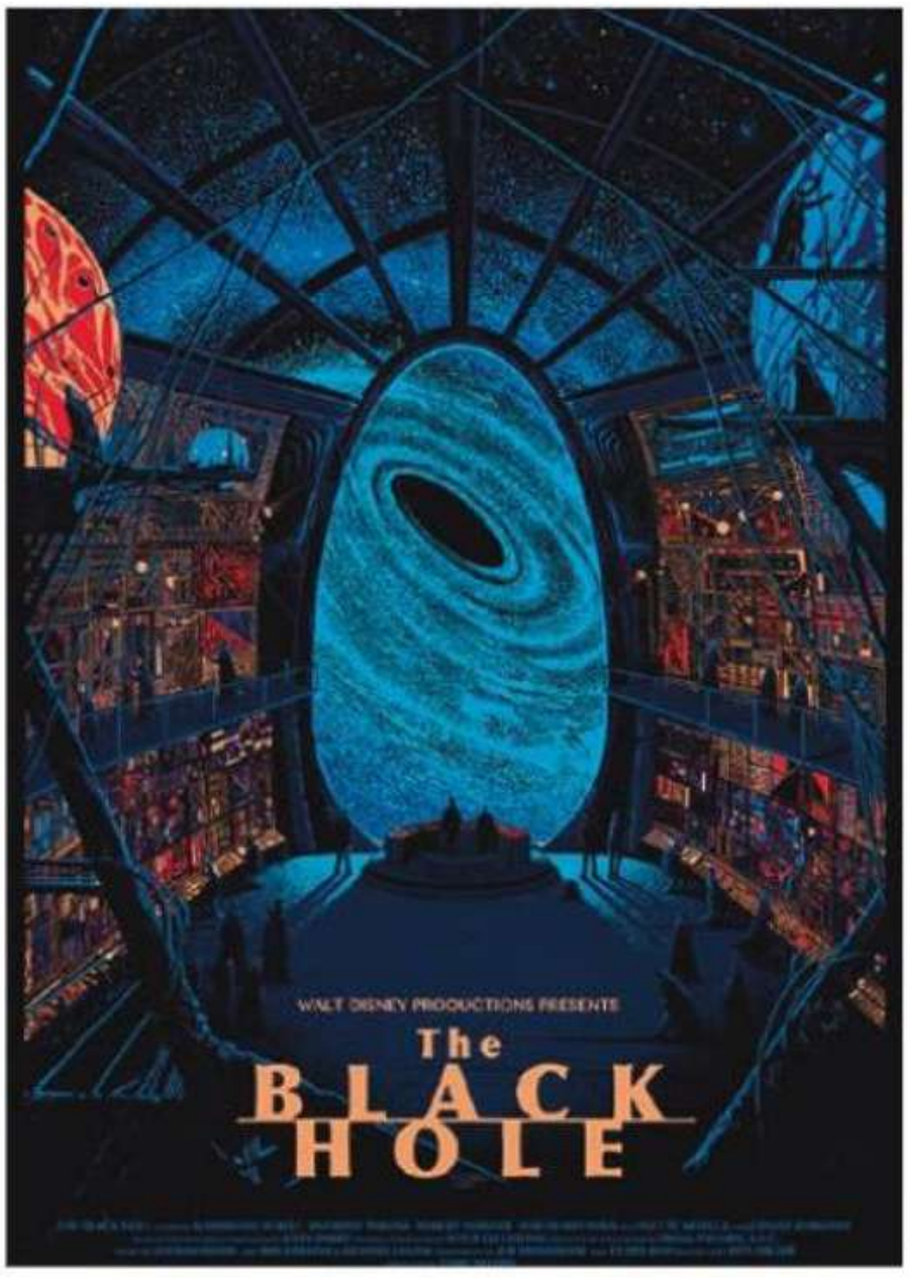
Así, a consecuencia de una serie de escaramuzas coloniales en la India del siglo XVIII, un enigmático fenómeno astrofísico acabó recibiendo el nombre de «agujero negro». A partir de 1756, la locución ya se había instalado en el imaginario colectivo de la comunidad angloparlante con un significado muy particular que, por supuesto, no encerraba ninguna connotación científica, pero la semilla ya estaba plantada. Permanecería casi doscientos años en estado latente, a la espera de que se dieran las condiciones favorables para germinar. Antes de la entrada de Dicke y de Wheeler en el campo de la astrofísica relativista, la muerte de una estrella por implosión gravitatoria había recibido toda suerte de denominaciones tentativas sin que ninguna de ellas llegase a calar. Durante un tiempo, como veremos, fueron «estrellas oscuras», «estrellas congeladas» —designación muy del gusto de los científicos soviéticos— o «estrellas colapsadas», como preferían denominarlas al otro lado del telón de acero, o también «singularidades de Schwarzschild», como las llamaba Einstein.

Ninguna de estas fórmulas suscitaba demasiado entusiasmo y conocieron una vida efímera. También resulta justo reconocer que, antes de imponerse, el nombre de agujero negro encontró sus resistencias, más que nada debido a que para algunos oídos suspicaces la polisemia de la palabra «agujero» conducía a la imaginación por caminos escabrosos cuando se asociaba con un adjetivo que lo oscurecía por completo. Entre los detractores de la expresión de Dicke figuraban científicos nada remilgados, como Richard Feynman. La denominación de agujero negro encontró una particular oposición por parte de un grupo de irreductibles físicos galos, ya que la expresión *trou noir* era de uso común en Francia con un significado obsceno. Quizá fuera la influencia francesa la que motivó que, a finales de la década de 1970, la brigada antivicio de la ciudad canadiense de Winnipeg hiciera una redada en un videoclub para incautarse de todas las copias de la película de ciencia ficción de Gary Nelson *El agujero negro*, bajo la sospecha de que ofrecía un escandaloso catálogo de obscenidades. Pocas veces una película producida por Walt Disney ha merecido tales honores.

Al margen del nombre, ¿podemos reconocer otros elementos de la particular mitología de los agujeros negros deambulando por el inconsciente colectivo, sumidos en esa poderosa corriente que es la cultura popular, mucho antes de que se manifestaran en las ecuaciones de la física? No resulta aventurado responder en sentido afirmativo. Los agujeros negros evocan nociones e imágenes poderosas de las que podemos encontrar ecos en el folclore, el arte o la literatura mucho antes de que su concepción científica cuajara y adoptara una forma precisa. La ciencia ficción ha popularizado su uso potencial como máquinas para viajar en el tiempo y, de manera más inapropiada e inexacta, como portales para trasladarnos a otros universos, pero estas prerrogativas no les fueron concedidas hasta la



ASC



DISNEY

A la izda., póster de *The Black Hole* (1979), superproducción de Disney dirigida por Gary Nelson; a la dcha., reinterpretación realizada por Kilian Eng en 2014.

llegada de la teoría de la relatividad de Einstein, que asoció la presencia de gravedad con distorsiones en el espacio y el tiempo.

Quizá el rasgo más provocador de los agujeros negros nos remita de nuevo a Calcuta y al relato de Holwell, a la sugerencia de una prisión inexpugnable. Los agujeros negros levantan en torno a su centro una barrera invisible, que cualquiera puede cruzar para entrar, pero que nada ni nadie puede franquear para salir. Para enfatizar el alcance de esa prohibición, se suele añadir la coletilla de que «ni siquiera la luz», el escapista más veloz del universo, puede evadirse de ellos. Este poder en apariencia sobrenatural no se ejerce de manera pasiva, como la araña que tiende su trampa enterrándose en la arena. A través de la ficción, los agujeros negros han ganado fama de voraces sumideros interestelares que todo lo tragan. Se trata de una fama injustificada, ya que orbitar en torno a un agujero negro resulta tan peligroso como merodear alrededor de una estrella cualquiera. Siempre y cuando, claro está, uno sepa guardar las debidas distancias. Este supuesto poder destructivo y succionador ha emparentado a los agujeros negros con los tornados. Así, su representación prototípica en las series y películas anteriores a *Interstellar* —desde *Star Trek* hasta la película de Walt Disney que disparó las alarmas de la brigada antivicio de Winnipeg— ha sido un colosal remolino flotando en el espacio, formado no se sabe muy bien a partir de qué sustancia.

Antes de que la fantasía humana poblara los vastos espacios interestelares de sumideros voraces, había hecho lo propio con los océanos. En parte, el espacio vino a desempeñar en las ficciones el papel que había interpretado antaño el mar, cuando los aventureros todavía no sentían que la Tierra se les había quedado pequeña y que habían agotado todos los lugares inexplorados de los mapas. Durante milenios, el mar ofreció, como el vacío interestelar, la última frontera. Un dila-

tado cosmos de soledad al que huir de la compañía de los seres humanos, en el que perderse en busca de maravillosas aventuras; un territorio desconocido, con frecuencia hostil y peligroso, en el que templar y poner a prueba el carácter y presenciar fenómenos que desafiaban la imaginación de los gregarios pobladores de la tierra firme. No por casualidad, gran parte de la imaginería de las narraciones náuticas se trasladaría casi intacta a los relatos de ciencia ficción. Como señalaba el protagonista de la serie *Altered Carbon*: «Partimos como los antiguos navegantes a explorar el ilimitado mar del espacio». Los barcos se transmutarían en naves espaciales, pero seguirían albergando tripulaciones intrépidas, capitanes, contrabandistas y piratas. De forma natural, los vórtices que amenazaban veleros y galeones se transformaron en agujeros negros. Y, recíprocamente, los relatos de mar anticiparon muchas situaciones y fórmulas que la ciencia ficción explotaría a través de los agujeros negros. Estos relatos llegaron a vislumbrar la posibilidad de que los sumideros terribles escondieran en realidad un portal a otro universo.

MAELSTROM DE AGUJERO NEGRO

A cualquier persona que viva en el mar, tarde o temprano le ronda la tentación del animismo. Pocos fenómenos de la naturaleza enfrentan tan crudamente al ser humano con su propia insignificancia. La sensación de quedar a merced de fuerzas que te superan acaba por insuflar vida a la inmensa extensión de agua. Los océanos te pueden destruir, colmarte de alimento o, con la ayuda de un viento favorable, transportarte felizmente hasta tu destino. Los océanos tienen sus estados de ánimo entonces, conocen momentos de placidez y de furia. También encierran territorios de peligro. No es de extrañar que, mucho antes de que se estableciera el método científico, la incertidumbre y la superstición poblaran los mares de criaturas fantásticas. En los primeros relatos clásicos de la literatura abundan los viajes accidentados a través de aguas infestadas de dioses y monstruos. El miedo a ser engullido por las fauces del mar ha alimentado las pesadillas de los marineros por lo menos desde los tiempos fabulosos de la Odisea. En su agitado viaje de regreso a Ítaca, Ulises recibió de la hechicera Circe la advertencia de evitar a Caribdis, monstruo apostado en el estrecho de Mesina, entre Sicilia y el sur de la península itálica. Caribdis había adquirido la mala costumbre de tragarse las aguas del estrecho tres veces al día, no se sabe si a modo de purgante, engullendo en el proceso cualquier embarcación que se cruzara en su camino. Así las cosas, la prudencia aconsejaba dar un rodeo, como hicieron otros dos célebres marinos apócrifos de la antigüedad: Jasón y Eneas.

Un variopinto reparto de criaturas fantásticas, caracterizada cada una en función de los caprichos del folclore local, aguardaba a los navegantes en otros estrechos. Las leyendas encomendaron a la imaginación la tarea de explicar fenómenos naturales de dinámica incierta, como el comportamiento de las corrientes marinas que, tan a menudo, decidían la suerte de una travesía. Caribdis era la

NO ES DE EXTRAÑAR QUE LA INCERTIDUMBRE Y LA SUPERSTICIÓN POBLARAN LOS MARES DE CRIATURAS FANTÁSTICAS

encarnación fantasiosa de peligros que acechaban ciertamente a los marineros. El estrecho de Mesina conecta el mar Tirreno y el mar Jónico, alcanza una profundidad de 250 metros y encauza una poderosa corriente, que genera intensos remolinos naturales. Se trata, además, de una zona castigada por la actividad sísmica, ya que el estrecho se sitúa sobre la frontera entre dos placas tectónicas.



AARGAUER KUNSTHAUS

Odiseo frente a Escila y Caribdis (1794-1796), del pintor prerromántico Henry Fuseli.

Los grandes remolinos surgen en el mar cuando chocan entre sí fuertes corrientes o cuando estas se ven desviadas por la peculiar topografía de las costas o el relieve submarino. Los estrechos entre islas o entre una isla y la costa favorecen su formación siempre que canalicen una corriente poderosa, ya que se comportan como embudos que, al constreñir la circulación del agua, incrementan su velocidad. Es el caso del estrecho de Corryvreckan, que separa las islas de Jura y Scarba, en el archipiélago de las Hébridas interiores. La imaginación de los escoceses lo ha convertido en el hogar de diosas celtas y espíritus del agua desde tiempo inmemorial. No sabemos si el agnóstico Georges Orwell avistó alguna de estas criaturas cuando naufragó en el estrecho. El escritor se había retirado a la isla de Jura, huyendo del mundanal ruido, de las exigencias de la vida social de Londres y de la atención suscitada por el éxito descomunal de Rebelión en la granja. En aquella punta remota y azotada por el viento de la costa occidental de Escocia, donde era más probable cruzarte con una oveja o un ciervo que con un ser humano, Orwell halló lo que buscaba: «Un lugar extremadamente inaccesible». Para llegar desde Londres a Barnhill, la casona encalada sin electricidad que había alquilado, había que invertir dos días de viaje, saltar de un medio de transporte a otro y salvar toda clase de incomodidades hasta llegar a la costa, cruzar el estrecho y recorrer una isla agreste. Orwell advertía a sus invitados de que no podría acudir a recogerlos, ya que su coche se había averiado oportunamente en la única carretera de la isla. El último tramo de doce kilómetros había que hacerlo a pie. Esa distancia disuasoria lo puso a salvo de cualquier distracción que amenazara con interrumpir el trabajo en la que sería su última novela, 1984.

A pesar de todas las barreras interpuestas, Orwell admitía visitas de vez en cuando. En el verano de 1947, sus sobrinos fueron a pasar las vacaciones con él. Juntos salieron varios días de acampada, para disfrutar de la naturaleza salvaje de las Hébridas. En el viaje de regreso, Orwell se internó en el estrecho de Corryvreckan montado en una barca, acompañado de su hijo y dos sobrinos. La mala fortuna quiso que interpretara mal la tabla de mareas y que se introdujera en la Caribdis del norte en el peor momento. Pronto perdió el control del bote, que comenzó a dar vueltas como un coche de choque zarandeado por un hervidero de remolinos. La corriente los arrastró lejos de Jura y Scarba. Las olas embravecidas los embistieron con ferocidad hasta arrancar el motor fueraborda. Orwell se encontraba ya muy

afectado por la tuberculosis y no disponía de muchas fuerzas, así que su sobrino mayor tuvo que hacerse cargo de los remos. El joven se empleó a fondo, poniendo rumbo a la isla más cercana, Eilean Dubh Mòr, el último bastión de tierra antes de que se perdieran en mar abierto. Las aguas encrespadas no se mostraron muy dispuestas a colaborar y volcaron el bote, forzándolos a alcanzar la costa a nado. En la isla solo encontraron la compañía de aves, simpáticos frailecillos en plena temporada de anidamiento. Cuando se le secó el encendedor, Orwell consiguió encender un fuego. Horas después, fueron rescatados por un pescador de langostas. Por desgracia para este especial, Orwell vivió esta aventura mientras escribía una novela de ciencia ficción distópica. Si *1984* hubiera incluido viajes interestelares, quizá la imaginación de su autor hubiera proyectado el Corryvreckan al espacio, proporcionándonos un impagable precursor de agujero negro en la literatura.

Al hablar de aguas que parecen cobrar vida para arrastrar a las embarcaciones a su perdición, una palabra ominosa y rotunda resuena de modo inevitable en nuestra mente: Maelstrom. Bajo este nombre se conoce el sistema de vórtices y remolinos que se manifiestan en el archipiélago de Lofoten, entre la isla de Moskenesøya y el islote de Mosken, frente a las costas de Noruega. Los viejos cartógrafos adoptaron la costumbre de pintar criaturas fantásticas en los territorios inexplorados en los que pudieran acechar peligros. Dragones en tierra firme, serpientes marinas en los océanos tempestuosos. En uno de los mapas más famosos del primer Renacimiento, la *Carta Marina* de Olaus Magnus, el relieve de Escandinavia se convierte en el escenario de un bestiario abigarrado: vacas marinas, serpientes de mar y rinocerontes de agua salada conviven con narvales, morsas y ballenas. Frente a las islas de Lofoten puede leerse la leyenda: «*Hecest horrenda Caribdis*» («Esta es la espantosa Caribdis»).

La fama del Maelstrom trascendió las advertencias de los pioneros de la moderna cartografía, que a menudo combinaban información contrastada con rumores nada fiables. Este remolino legendario se tragaría una de las naves más célebres de toda la literatura, el *Nautilus*, y con ella a su no menos famoso capitán, Nemo, en el apoteósico final de *Veinte mil leguas de viaje submarino*. Siguiendo el hilo con el que arrancaba nuestra historia, podríamos conectar a Nemo con el agujero negro de Calcuta, puesto que la personalidad de este enigmático personaje se forjó bajo los golpes del Raj, a consecuencia de las represalias que tomaron los británicos tras el Motín de la India. Esta rebelión de los soldados indios, o cipayos, contra la Compañía de las Indias Orientales tuvo lugar casi cien años después del calvario de Holwell, cuyo relato alentaría las ansias imperialistas de los ingleses. Nemo, antes de borrarse el nombre y envolverse en una nube de misterio, había sido el príncipe Dakkar y se había sumado a la rebelión, en la que perdería a su familia, su título y todas sus posesiones. También encontramos una referencia al Maelstrom al final de otro relato marino extraordinario, *Moby Dick*, en este caso como metáfora para animar la descripción de una zambullida de la gran ballena blanca, en la cacería final desatada por el capitán Ahab.

AL HABLAR DE AGUAS QUE COBRAN VIDA PARA ARRASTRAR EMBARCACIONES, UNA PALABRA RESUENA EN NUESTRA MENTE: MAELSTROM



PLYMOUTH MARINE LABORATORY

Carta marina et descriptio septentrionalium terrarum, diseñada por el eclesiástico y geógrafo sueco Olaus Magnus y publicada por primera vez en Venecia en 1539.

El Maelstrom, a diferencia de la garganta de Caribdis o de otros remolinos célebres como el del estrecho de Corryvreckan, acecha a las embarcaciones en mar abierto. Quizá Julio Verne escogió el Maelstrom como ambiguo final para el capitán Nemo para rendir homenaje a uno de sus escritores de cabecera, Edgar Allan Poe, que hizo pasar al protagonista de uno de sus relatos por un trance semejante. No sería el único homenaje que le haría Verne, ya que también escribió una continuación de la única novela de Poe, otro relato marinero, *La narración de Arthur Gordon Pym de Nantucket*.

Precisamente en Poe encontramos un curioso nudo en el que se vienen a entrelazar numerosos hilos literarios y científicos entresacados de la madeja de los agujeros negros. En su mente creativa convivieron remolinos aterradores, el encierro de Holwell o la convicción de que en la gravedad se hallaba la clave para explicar un universo plagado de estrellas invisibles. Fue Poe uno de los escritores más originales que jamás haya pisado la Tierra, en virtud de una imaginación caprichosa forjada al fuego de la melancolía, una lógica implacable y racionalista, los ritmos sagrados de la poesía y un singular gusto por lo macabro. Su obra ha ejercido una influencia perdurable en la cultura popular, ayudando a configurar o redefinir géneros enteros, como el terror, el misterio o la ciencia ficción, y hasta el mismo arte del relato corto. En la ciencia ficción explotó con maestría un truco literario que muchos le copiarían después: el uso de una terminología científica exacta, contemporánea, para dotar de credibilidad a un relato fantástico.

Lo sucedido en el fuerte William de Calcuta la calurosa noche del 20 de junio de 1756 no podía dejar indiferente a un espíritu tan predispuesto a las historias atroces como el suyo. Lo mencionaría al inicio de uno de sus relatos más característicos, El entierro prematuro. En el primer párrafo del cuento, el narrador pasa revista a «algunas de las calamidades más notables y famosas de las que se tiene noticia». En una breve lista, Poe sitúa al mismo nivel el encierro en la celda del agujero ne-

gro que el terremoto de Lisboa, la gran peste de Londres de 1665, el colapso del ejército de Napoleón al cruzar el río Berézina o la matanza de San Bartolomé. Que en todos estos episodios murieran miles de personas ofrece una idea de hasta qué punto el relato de Holwell había dejado su huella en la cultura anglosajona.

Poe, siendo él mismo marino y un gran amante de los relatos náuticos, jugó con la idea del torbellino que se abre como una fosa vertiginosa en las aguas para enterrar a los navegantes. En *Un descenso al Maelstrom* integra muchos elementos propios del imaginario de los agujeros negros a la hora de describir cómo tres hermanos, pescadores, se ven atrapados en un remolino destructor. La historia ofrece además la peculiaridad de plantear una situación desesperada que el protagonista termina por resolver haciendo uso de sus conocimientos científicos, así que, en cierto sentido, se puede considerar como una precursora de la ciencia ficción dura, es decir, de la variante del género más atenta al rigor científico. El relato ha creado una asociación casi inconsciente en muchos aficionados a la literatura entre la palabra «maelstrom» y el propio Poe, que no en vano fue quien la introdujo en la lengua inglesa, al adoptar una expresión danesa que combina el verbo *malen*, «triturar» y el nombre *strom*, «corriente».



ISTOCK

Retrato del escritor estadounidense Edgar Allan Poe. El autor poseía una profunda fascinación por la astronomía.

Un descenso al Maelstrom fue uno de los primeros cuentos que Poe publicó en el *Graham's Magazine*. Apareció en el número de mayo de 1841 de manera un tanto precipitada. Poe no lo escribió para ganar fama, lo hizo para ganar dinero. Él mismo se mostró en más de una ocasión descontento con el final, que había escrito de manera apresurada acuciado por la necesidad de cobrar del editor lo antes posible. Para dotar de mayor verosimilitud a la historia, Poe decidió narrarla en primera persona. Así, un viejo marinero rememora, desde la cumbre de un promontorio que se alza en una de las escarpadas islas del archipiélago de Lofoten, cerca de la costa noruega, un episodio fatal en el que perdieron la vida sus dos hermanos. Esta atalaya privilegiada permite observar en directo la formación del Maelstrom, que Poe describe con detalle. Para terminar de preparar la atmósfera de horror psicológico del cuento, el viejo marinero reconoce que es mucho más joven de lo que aparenta. Envejeció en el curso de las seis horas traumáticas que está a punto de relatar.

EN POE ENCONTRAMOS UN NUDO EN EL QUE SE VIENEN A ENTRELAZAR NUMEROSOS HILOS LITERARIOS Y CIENTÍFICOS

A continuación, se produce una transición brusca y retrocedemos tres años, a una tranquila y soleada mañana del mes de julio. Los tres hermanos han salido a pescar en las aguas del archipiélago de Lofoten a bordo de un pequeño velero. Conocen al dedillo el mecanismo de las corrientes y mareas que generan y deshacen periódicamente el Maelstrom, dirigiendo las aguas a través del dédalo de canales que se abren entre las islas. Aprovechan su experiencia para faenar en las zonas más peligrosas —que la mayoría de pescadores evitan—, porque también son las que ofrecen más abundancia de pesca. De modo que cruzan una y otra vez las aguas en las que se origina el Maelstrom cuando estas se hallan en calma. No deja de ser una práctica arriesgada, ya que el remolino no se forma con regularidad matemática y las condiciones de la travesía no solo dependen de las mareas, sino también de otros fenómenos impredecibles como los vientos y las tormentas.

Cumpliendo las expectativas despertadas en el lector desde la primera página, el velero acabará siendo arrastrado al Maelstrom. Después de un día de pesca extraordinaria, los tres marineros se disponen a regresar a casa, cuando un extraño viento frena su marcha. En un abrir y cerrar de ojos, el cielo queda cubierto por un toldo de nubes cobrizas que los sume en una completa oscuridad y, sin previo aviso, se desata sobre ellos la peor de las tormentas. El viento desarbola el velero, arrancando los dos mástiles y arrebatando al mar a uno de los tres hermanos. Parece que la naturaleza les ha tendido una trampa que los dirige al corazón del Maelstrom. La tormenta ha alimentado además la formación de un remolino fuera de lo común, a cuyo borde se asoman cuando las olas, altas como un promontorio, levantan el velero y lo precipitan en su garganta de agua. Poe describe su interior como un imponente embudo de paredes líquidas, oscuras y brillantes como el ébano. En el cielo cubierto por las nubes se abre un resquicio por el que asoma la Luna, como un dramático foco de luz que alumbra el drama. El velero completa una vuelta tras otra alrededor del embudo, descendiendo en una espiral inexorable hacia su centro, donde una corriente atroz los aguarda para arrastrarlos por un lecho de rocas afiladas.

El pavor absoluto que se apodera del protagonista de la historia termina por sumirlo en un trance peculiar. La certeza de cuál será su destino infunde en él una calma inesperada, que despierta su curiosidad hacia el fenómeno natural que está a punto de aniquilarlo. En este punto, el narrador, del que nunca se nos dice el nombre, revela un parentesco insospechado con otros personajes de Poe mucho más sofisticados. Con el Auguste Dupin de *Los crímenes de la calle Morgue*, que prefiguraría a Sherlock Holmes, o el William Legrand de *El escarabajo de oro*. Preso de una situación que escapa por completo a su control, se detiene a analizarla de forma lógica y desapasionada. Constata entonces que su barco no es el único objeto atrapado en el remolino. También giran en torno fragmentos de otras embarcaciones, muebles, troncos de árboles... Sin saber muy bien por qué, comienza a calcular las diferentes velocidades de los objetos arrastrados en una caída helicoidal hacia el fondo. Advierte que los cuerpos de mayor tamaño bajan con mayor celeri-

LLAMA LA ATENCIÓN CUÁNTOS ELEMENTOS DISPONE POE PARA ADORNAR LA NARRACIÓN QUE EVOCAN UN AGUJERO NEGRO



SHUTTERSTOCK

Ilustración de Harry Clarke para el relato *Un descenso al Maelstrom* de Edgar Allan Poe. El relato del autor gótico resume la metáfora definitiva del horizonte de sucesos.

ENLACE AL CANAL
x.com/byneontelegram
Ó escanea el código QR:

dad y que los objetos cilíndricos lo hacen más lentamente. Estas observaciones lo llevan a recordar la lección de un viejo profesor, que le mostró en la escuela cómo un cilindro, flotando en un remolino, ofrecía más resistencia a la succión que un cono o una esfera. Esta cadena de razonamientos dirige su atención hacia uno de los barriles que cargan en el velero. Haciendo señales a su hermano para que lo imite, se introduce en uno de los barriles y se lanza al agua con él.

La lección de hidrodinámica salva la vida del pescador, pero no la de su hermano, que se resiste a abandonar el velero. Este se precipita al fondo del embudo de agua, mientras el barril desciende mucho más despacio, dando margen a que la tormenta afloje, cambie la marea y las corrientes evolucionen deshaciendo el remolino. El pescador observa cómo las paredes del embudo se van aplanando y la velocidad de giro disminuye. Es aquí donde Poe muestra sus prisas por terminar el cuento y salir corriendo a las oficinas del *Graham's Magazine* para cobrar: «Como soy yo mismo quien le está refiriendo este relato, ya sabe usted que escapé sano y salvo. Además, está enterado de cómo me las arreglé para escapar, así que abreviaré el final de la historia».

Llama poderosamente la atención cuántos elementos dispone Poe para adornar la narración que evocan un agujero negro. De entrada, las nubes cubren el cielo para sumergir a los lectores en un ámbito irreal, tenebroso, que parece invocar una imagen del espacio exterior: «Ninguna imaginación humana podría concebir un panorama más funestamente desolado». La frontera entre cielo y mar se des-

vanece. El velero gira en torno a un centro invisible, sumido en una oscuridad casi completa. Todo se tiñe de un negro impenetrable, solo roto por la irrupción de un elemento astronómico: la Luna. Poe llega a describir cómo alrededor del remolino se dibuja nítidamente la frontera de un horizonte sin retorno:

Una amplia franja de espuma brillante delineaba el borde del remolino, pero ninguna de sus partículas resbalaba por la boca del terrible embudo, cuyo interior, hasta donde alcanzaba la vista que trataba de sondearlo, se mostraba como una pared de agua tersa, brillante y negra como el azabache, inclinada en un ángulo de unos cuarenta y cinco grados respecto del horizonte, y que giraba de forma vertiginosa, una y otra vez, con un movimiento bamboleante y abrumador, mientras emitía a los cuatro vientos un fragor espantoso, entre chillido y rugido, que ni siquiera la poderosa catarata del Niágara profiere al Cielo en su agonía.



ISTOCK

Ilustración de Gustave Doré para el poema gótico de Samuel Taylor Coleridge *La balada del viejo marinero.*

En esta descripción, la franja de espuma interpreta un papel semejante al de la esfera de fotones que circunda un agujero negro, compuesta por partículas luminosas que se ven obligadas a torcer sus trayectorias en órbitas circulares a su alrededor. Se trata de una región inestable y, a diferencia de las gotas de espuma que, según Poe, no se deslizan al interior del remolino, los fotones terminan por perder el equilibrio. O bien ceden y caen dentro del agujero, o bien escapan. Los pescadores saben que, una vez crucen ese límite de espuma blanca, perderán toda conexión con el exterior. Habrán traspasado una frontera de no retorno y deberán abandonar toda esperanza de que alguien los rescate. Las leyes de la naturaleza han conjurado la apertura de un sumidero en la masa de agua, provisto de una fuerza succionadora irresistible. Un desenlace fatal aguarda en el descenso en espiral hacia un lecho de rocas irregulares y afiladas. Un progreso inexorable hacia un centro de aniquilación física. Una singularidad.

Los tres rasgos enunciados en el párrafo anterior servirían de trazos elementales para esbozar un agujero negro. En primer lugar, está el establecimiento de una frontera de no retorno, que encierra una región en la que cualquiera está invitado a entrar, pero de la que nadie puede salir. Más allá se localiza una órbita inestable, en la que la materia puede girar sin caer todavía en el abismo. En un agujero negro correspondería a la esfera de fotones. Finalmente queda el corazón del Maelstrom en el que se destruye la materia. En la descripción matemática de un agujero negro se definiría como un punto donde las ecuaciones arrojan infinitos y pierden toda capacidad de hacer predicciones razonables: la singularidad. Poe sume además su Maelstrom en las tinieblas, para desplazarlo a un ámbito casi abstracto, semejante a las profundidades del espacio exterior. No contento con todo lo anterior, también incorpora a su relato una distorsión temporal. El narrador es un anciano, de

cuerpo frágil y pelo encanecido, una apariencia engañosa que enmascara su verdadera edad, ya que se trata de una persona joven que envejeció aceleradamente a consecuencia de su interacción con el Maelstrom. Esta dramática mutación evoca un fenómeno relativista: la gravedad afecta al paso del tiempo. Una persona que se aproximara en exceso a la frontera de un agujero negro —como le sucede a Joseph Cooper, el protagonista de *Interstellar*—, advertiría al regresar que son las personas que dejó atrás las que han envejecido. El pescador sufre el efecto inverso. Mientras él se convierte en un anciano, para los demás solo transcurren unas horas.

Si nos dejamos llevar por el entusiasmo, podríamos dar un paso más y reconocer en el vórtice aniquilador de Poe una representación anticipada de una de las especulaciones más audaces de la relatividad de Einstein: los agujeros de gusano, parientes próximos de los agujeros negros, que podrían establecer atajos a escala cósmica y conectar puntos del universo en apariencia muy distantes entre sí. Al comienzo de su relato, el protagonista de *Un descenso al Maelstrom* comenta cómo la mayoría de los noruegos se muestra convencida de que en el centro del remolino se abre un «abismo que penetra el globo terrestre y conduce hasta un remoto lugar», que muchos identifican con el golfo de Botnia, en el mar Báltico, entre Suecia y Finlandia. La idea de la existencia de estos pasajes se atribuye, entre otros, al jesuita alemán Atanasio Kircher, que en su tratado de geografía *Mundus Subterraneus*, publicado en 1665, concibió un intrincado y dinámico interior para la Tierra, cuyas entrañas veía atravesadas por el agua y el fuego, que recorrían una red de túneles y catacumbas, asomándose a la superficie en forma de remolinos y volcanes. Así, los vórtices como el Maelstrom no siempre precipitarían a un destructivo callejón sin salida. En ocasiones, ofrecerían una secreta vía de acceso a otros rincones del planeta.

Algunas de estas nociones apuntan ya en los célebres mapas de Mercator, el cartógrafo flamenco del siglo XVI, artífice de la proyección que lleva su nombre, que traslada los accidentes de una superficie esférica (como la de la Tierra) a una superficie plana (su representación en un mapa). La proyección es un artificio matemático, que Mercator utilizó para bosquejar una geografía mitad verídica, mitad fabulosa, una curiosa amalgama de ciencia e imaginación, que se podría interpretar como un ejercicio de ciencia ficción cartográfica. Hay regiones del globo terrestre que Mercator reproduce con escrupulosa exactitud y otras maravillosamente ficticias, que corresponden a los lugares que ningún ser humano había hollado en su tiempo. Al deambular por sus mapas, uno transita inadvertidamente de la latitud de lo real a la de lo imaginario. Mercator recrea el Polo Norte, que no sería explorado hasta los siglos XIX y XX, como un escenario de fantasía sobre el que podrían sobrevolar dragones con escamas de hielo. Los océanos de la Tierra devienen en cuatro ríos colosales que convergen en un monstruoso abismo, un remolino. En el centro de este gigantesco desaguadero, Mercator ubica una montaña inmensa. ¿Su color? Negro. ¿Su carácter? Atractivo. Se trata de una montaña magnética, que atrae con rigor dictatorial la aguja de todas las brújulas. De algún modo, Mercator sitúa un agujero negro en el polo norte.

HAY REGIONES TERRESTRES QUE MERCATOR REPRODUCE CON ESCRUPULOSA EXACTITUD Y OTRAS, MARAVILLOSAMENTE FICTICIAS

PARA LOS FÍSICOS, LA CONEXIÓN ENTRE LOS AGUJEROS NEGROS Y LOS REMOLINOS VA MÁS ALLÁ DE UNA METÁFORA

Numerosos científicos han apreciado el poder del Maelstrom como metáfora y han reconocido la contribución de Poe a la imaginería de los agujeros negros. Uno de los grandes teóricos de la relatividad general, Werner Israel, tituló uno de sus artículos científicos *Descenso al Maelstrom: el interior de un agujero negro*. Establecía en él un paralelismo entre la exploración teórica de las entrañas de estos elusivos objetos astrofísicos y el azaroso viaje a las profundidades del abismo que relata Poe. En sus primeras líneas, Israel aclaraba: «El viaje al interior de un agujero negro es un descenso, sí, pero, de un modo más fundamental, se trata de una progresión en el tiempo». John Wheeler, el físico teórico que popularizó la expresión «agujero negro», recurrió a la misma metáfora, hablando de un «maelstrom cósmico definitivo» en su autobiografía *Geones, agujeros negros y espuma cuántica*. De hecho, la palabra que Poe introdujo en la lengua inglesa, el *malen strom*, la «corriente trituradora», ha terminado por convertirse en una de las metáforas más manidas de la ciencia ficción a la hora de referirse a los agujeros negros y podemos encontrarla en textos de divulgación de toda laya. En la monumental *The Ascent of Wonder*, una antología de casi mil páginas centrada en la ciencia ficción dura, se dibuja con precisión el linaje de los agujeros negros en la literatura. *Un descenso al Maelstrom*, publicado en 1841, es el relato más antiguo que consideran sus editores, David Hartwell y Kathryn Cramer. En una nota introductoria, declaran: «Esta historia constituye un documento fundacional de la visión y la mentalidad propias de la ciencia ficción de la Edad de Oro. Su presentación de un gran objeto natural peligroso, el remolino, quizá sea el ancestro de toda una serie de historias de agujeros negros, como *Kyrie* (publicada en 1968) de Poul Anderson». El linaje se extiende hasta nuestros días. En *El fin de la muerte*, de 2010, la novela que cierra la trilogía de *El problema de los tres cuerpos*, de Liu Cixin, sus personajes deciden reproducir el viaje de los pescadores de Poe al interior del Maelstrom. ¿A qué obedece esta acción temeraria? La sombra que proyectan los agujeros negros sobre los remolinos es alargada:

Todo el mundo permaneció sumido en sus pensamientos durante el viaje, sin dialogar siquiera con las miradas. El significado del *Moskstraumen* [Maelstrom] resultaba tan evidente que no precisaba ningún pensamiento. Pero el interrogante permanecía: ¿Qué relación había entre la posibilidad de rebajar la velocidad de la luz y los agujeros negros? ¿Qué relación había entre los agujeros negros y la advertencia de seguridad cósmica?

Para los físicos, la conexión entre los agujeros negros y los remolinos va más allá de una metáfora. Al menos, algunos han interpretado el paralelismo en un sentido literal. Desde los años ochenta del siglo pasado, se ha venido desarrollando una nueva rama de investigación, conocida con el nombre de gravedad análoga, que estudia cómo medios y materiales muy diversos se comportan, en determinadas circunstancias, de forma muy parecida al espacio-tiempo de la relatividad general. Explotan el principio de que fenómenos muy diferentes pueden ser gobernados por ecuaciones muy semejantes. Así, uno puede generar en un fluido una situación en la que las ondas de sonido que lo recorren se conduzcan de modo equivalente a como lo

hace la luz en un espacio-tiempo relativista. Las matemáticas que describen ambos sistemas son formalmente equivalentes. Esta afinidad permite recrear muchos atributos propios de un agujero negro, que veremos más adelante —como un horizonte de sucesos o la radiación de Hawking—, y construir en el laboratorio un modelo de agujero negro práctico y funcional. Jugando con él, se pueden explorar las propiedades de las ecuaciones que lo gobiernan.

Los resultados de estos experimentos ayudan a entender mejor la dinámica del espacio-tiempo astrofísico, aunque obviamente hay que interpretarlos con las debidas precauciones, ya que se trata de extrapolaciones. La gravedad análoga ha permitido crear modelos de agujero negro en fluidos, en fibras ópticas, en condensados de Bose-Einstein o en grafeno. También ha servido para alimentar en la prensa un sinfín de titulares engañosos sobre la creación de agujeros negros en el laboratorio. Cerrando el círculo abierto en las frías aguas de Noruega por nuestro Maelstrom, estos modelos se pueden generar espontáneamente en la naturaleza, en la dinámica turbulenta de las corrientes marinas que, en ocasiones, dan lugar a toda suerte de remolinos y vórtices. Hay científicos que han buscado en ellos espacios como los que describe Poe, en los que una barrera de espuma aísla del entorno una región del agua. Las matemáticas ven en ellos singularidades y horizontes de sucesos. Los físicos han terminado por rastrear los océanos, con la ayuda de imágenes tomadas desde satélites, a la caza de remolinos, parientes del Maelstrom, análogos de los agujeros negros.

Si uno desea contemplar agujeros negros a toda costa y no dispone de una nave espacial que lo traslade al centro de la Vía Láctea, quizá se conforme con entreverlos en el agua. La dinámica de fluidos ofrece la posibilidad de crear modelos caseros bastante convincentes. Basta con imaginar una corriente y situar en ella una barca, la de los tres hermanos que pescaban entre las islas de Lofoten, por ejemplo. Para ajustar la analogía a nuestros intereses, supongamos que la corriente discurre por un canal recto, de izquierda a derecha, y que la velocidad del agua va aumentando gradualmente a medida que nos desplazamos hacia la derecha. Al surcar el canal, los pescadores distinguirán pronto tres regiones que afectan de manera muy distinta a su navegación (figura 1). En el extremo izquierdo, donde la velocidad de la corriente es menor que la que puede desarrollar el bote, los marineros tienen total libertad para desplazarse hacia donde quieran (1). Si deciden internarse hacia la derecha, notarán que cada vez deben enfrentar una corriente más intensa en el momento en el que quieran dar media vuelta y deshacer el camino andado. Llegará un momento en el que la máxima velocidad que puedan imprimir al bote igualará la velocidad del agua que se les opone. Aunque los pescadores se dejen el alma remando contracorriente, permanecerán inmóviles. Ese punto (2) marca una frontera invisible, una línea recta perpendicular al canal. Si ceden al impulso de la corriente y la cruzan, se internarán finalmente en una región (3) en la que las aguas se mueven más deprisa hacia la derecha de lo que ellos pueden desplazarse hacia la izquierda. Ya nunca lograrán escapar de esa región y serán arrastrados inexorablemente hacia la derecha. Han quedado aislados y ya no podrán comunicarse con ninguna barca al otro lado de la frontera.

El modelo se puede adaptar a un pequeño Maelstrom (figura 2): un sumidero en el que se precipiten las aguas más rápidamente cuanto más se acerquen a su centro. Cualquier bote que navegue en su proximidad se encontrará en una situación semejante a la de la barca que surcaba el canal. La frontera que delimita la región de no retorno dibuja ahora un círculo en lugar de una línea recta. Como veremos, los agujeros negros se ro-

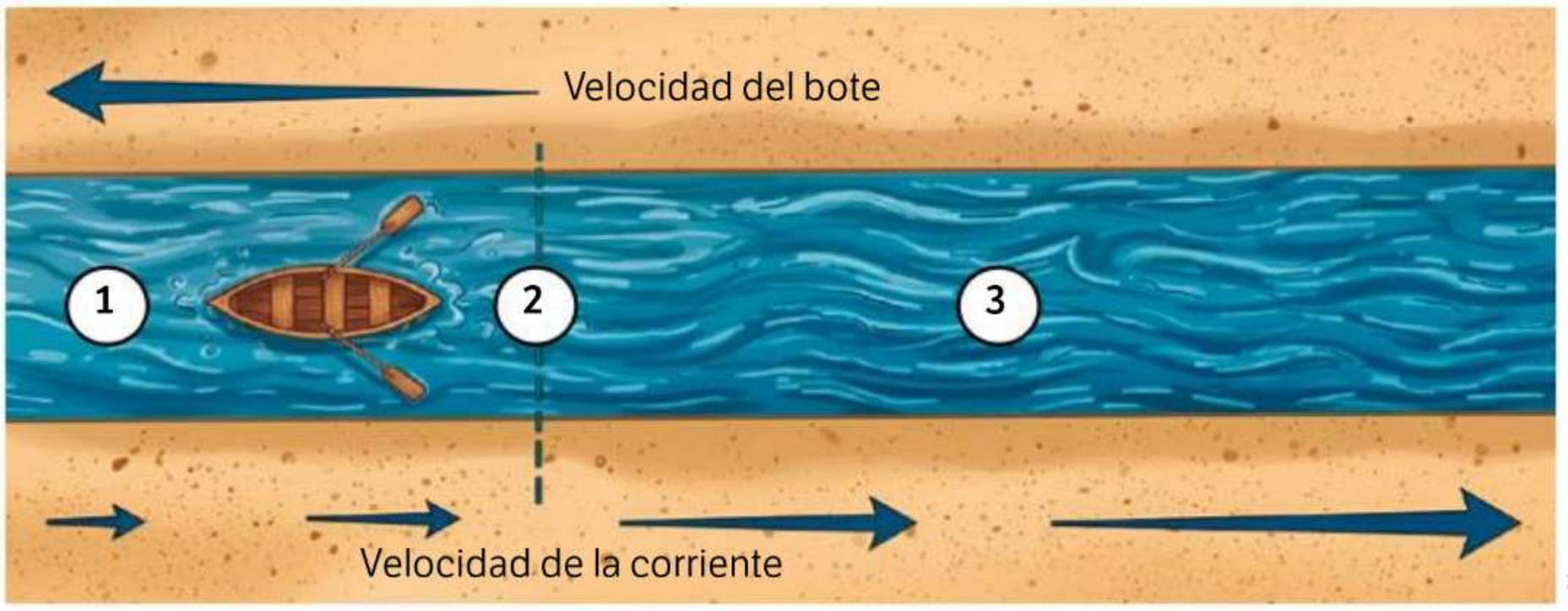


Figura 1. Creación de una frontera de no retorno en un fluido. En este caso, en el agua.

dean de un confín parecido, el horizonte de sucesos. En su caso, lo que fluye y arrastra los cuerpos hacia el centro del abismo no es un líquido, como el agua, sino el espacio-tiempo, concepto que exploraremos más adelante. Si el espacio-tiempo rota, se induce en él una torsión que remeda la formación de un remolino capaz de atrapar la materia del entorno, precipitándola en un verdadero vórtice. Se desata así, como veremos, uno de los fenómenos más grandiosos y espectaculares del universo.

En la analogía del agua, siempre podemos acoplar al bote un motor capaz de desarrollar una velocidad arbitrariamente alta, que nos permita vencer la fuerza de la corriente y atravesar de vuelta la temible frontera del horizonte de sucesos. Sin embargo, el universo parece plegarse a las leyes de la relatividad de Einstein, que imponen un límite de velocidad a toda la materia: la velocidad de la luz. Esta restricción genera en los agujeros negros un horizonte absoluto, de manera que una vez que uno lo cruza para entrar ya no puede salir. En cierto sentido, ni la materia ni la luz pueden superar la corriente en contra del espacio-tiempo que las arrastra hacia la singularidad central. El horizonte de sucesos encapsula así una región del espacio, que queda aislada causalmente. Es decir, quienes queden fuera no podrán recibir ninguna noticia de lo que ocurra allí dentro. Nadie en el universo guarda mejor un secreto que un agujero negro. El precio a pagar por su discreción es desaparecer para siempre en su interior.



Figura 2. Un horizonte de sucesos circular en un fluido.

LOS AGUJEROS NEGROS PERDIDOS DE NEWTON

Fue precisamente en el Siglo de las Luces cuando se concibió la existencia de un astro que no dejaría escapar nada de sus dominios, «ni siquiera la luz». Newton pudo perfectamente haber fantaseado con él. Quién sabe si, en efecto, la idea no le rondó la cabeza, ya que para armar estos particulares agujeros negros, que podríamos llamar clásicos, hay que echar mano de dos de sus grandes creaciones: la ley de gravitación universal y su teoría corpuscular de la luz. La primera determina que dos masas cualesquiera siempre experimentan una atracción mutua. La segunda sostiene que, si fuéramos capaces de examinar muy de cerca un rayo de luz, descubriríamos que está compuesto por un chorro de partículas o proyectiles diminutos.

Fantaseara o no con estos astros singulares, Newton dejó el terreno abonado para que otros lo hicieran. En su *Óptica*, se preguntaba: «¿Los cuerpos no actúan a distancia sobre la luz y, mediante esta acción, doblan sus rayos; y no resulta esta acción más fuerte cuanto menor sea la distancia?». Si la luz está compuesta por partículas materiales sensibles a la atracción gravitatoria, un astro con suficiente masa podría desviar sus trayectorias. Es lo que hace la Tierra con cualquier piedra o proyectil que trate de abandonar su superficie. Cuanto mayor sea la masa del astro, mayor será su influencia sobre la luz. Una estrella modesta podría torcer la trayectoria rectilínea de las partículas luminosas y forzarlas a trazar una curva. Incrementando la masa de la estrella, aumentaríamos su efecto sobre la luz, acentuando la curvatura de la trayectoria, haciendo que esta se doble más y más. Hasta el punto de hacerla dibujar un arco que devuelva las partículas a la superficie. En ese punto, la luz quedaría atrapada. Por mucho empeño que pusiera en abandonar la estrella y conocer mundo, la atracción gravitatoria de la estrella la obligaría a dar media vuelta y regresar a casa.

Si nos situamos cerca de la superficie de esta hipotética estrella, seríamos testigos de este constante ir y venir, arriba y abajo, de la luz. Para nosotros, la estrella se comportaría como un monumental surtidor de partículas luminosas, el centro de infinidad de rayos que se proyectarían rumbo al infinito, tratando de escapar, trazando parábolas que los devolverían de manera inexorable a la superficie (figura 3). Sin embargo, si nos desplazamos más allá del punto donde las partículas dan media vuelta y emprenden su viaje de regreso a la estrella, la luz ya no podría alcanzarnos. Ninguna partícula impactaría nuestros ojos. Se produciría una transición de la luz a la oscuridad. Al dirigir nuestra mirada de vuelta a la estrella, no contemplaríamos otra cosa que oscuridad. Con todo, seguiríamos experimentando su atracción gravitatoria.

A partir de una cierta distancia, las estrellas oscuras resultarían invisibles, pero no indetectables, ya que su masa afectaría sin duda la trayectoria de otros cuerpos visibles. Al lanzar un proyectil en sus inmediaciones, veríamos asombrados cómo una presencia invisible, ominosa, la desviaría de su curso.

Estos agujeros negros retro, o *vintage*, no se comportan como cárceles perfectas. Por un lado, habitan un universo, diseñado por Newton, en el que no existen los límites de velocidad relativistas. Por tanto, nada impide arrojar un cuerpo a, pongamos, siete veces la velocidad de la luz desde la superficie de la estrella y conseguir que llegue más lejos que las partículas luminosas. También se puede escapar de la estrella a bordo de un cohete que se desplace a una velocidad mucho menor. En otras palabras, hay medios para vencer la atracción de la estrella por fuerte que

sea su tirón gravitatorio. Un astronauta podría acercarse a la estrella cuanto quisiera y luego regresar para contar lo que ha visto: el maravilloso espectáculo del surtidor de partículas luminosas atrapadas.

Parece inevitable que, si uno se para a pensar el tiempo suficiente en la gravedad, acabe soñando con agujeros negros. Por supuesto Newton, ocupado en revolucionar la física y las matemáticas del siglo XVII, no tuvo tiempo para resolver todos los detalles. De ello se encargarían sus epígonos, que fueron legión, y que se entregaron con celo a la ingente tarea de completar la visión newtoniana del universo. A este ejército se alistaría el reverendo John Michell, rector durante casi una treintena de años de la parroquia de Thornhill, una pequeña localidad minera del condado de Yorkshire.

Antes de casarse, hacerse párroco y adoptar la decisión de huir del mundanal ruido, Michell había seguido los pasos de Newton medio siglo después de que este muriera. Como Newton, había nacido un día de Navidad y había estudiado matemáticas en la Universidad de Cambridge, donde más tarde daría clases de aritmética y geometría. Dotado de una suma destreza tanto experimental como teórica, se dedicó a cultivar con devoción el jardín newtoniano. Para su felicidad, había terreno de sobra para desbrozar. La ley de la gravitación interpelaba a todas las masas, de ahí que hubiera recibido el apelativo de «universal». Ningún cuerpo, por grande o diminuto que fuera, se tratara de un grano de sal o de una estrella, quedaba exento de cumplirla. Los planetas o los cometas habían dado ya muestras suficientes de acatar la ley. Las órbitas elípticas de Kepler, que seguían Venus o Saturno, se ajustaban como un guante a las predicciones de Newton. Sin embargo, esta norma con rango de aplicación supuestamente universal no se había verificado en ámbitos más mundanos. Nadie había medido la atracción gravitatoria entre dos personas, por ejemplo, o entre un árbol y el pájaro que se posa sobre una de sus ramas.

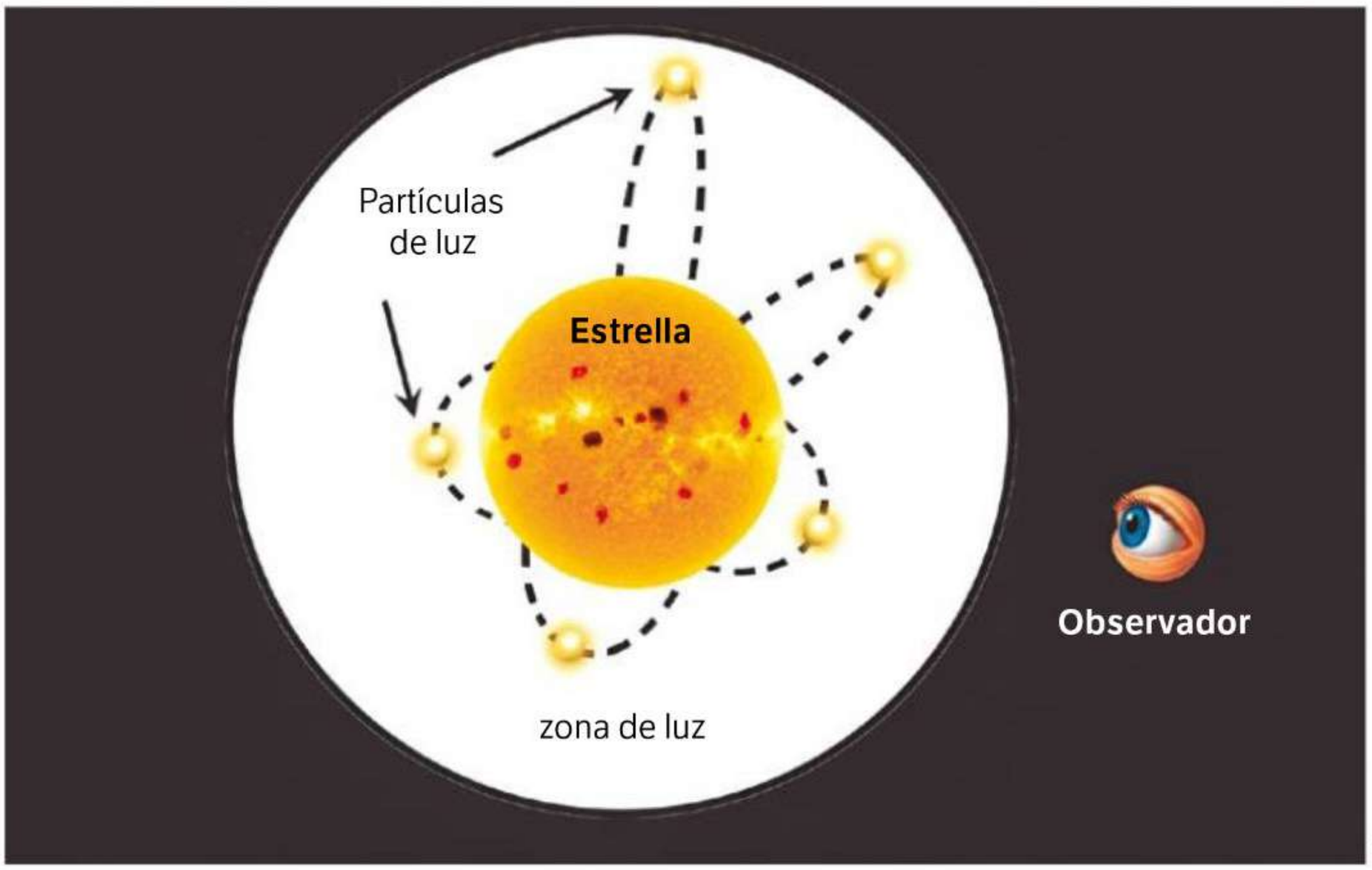


Figura 3. Una estrella oscura. Visible y luminosa dentro de una esfera determinada. Invisible a partir de una cierta distancia, que la luz no alcanza.

SI NOS PARAMOS A PENSAR EL TIEMPO SUFICIENTE EN LA GRAVEDAD, ACABAREMOS SOÑANDO CON AGUJEROS NEGROS

La razón hay que buscarla en la debilidad extrema de la fuerza de la gravedad. Basta compararla con una de sus hermanas, la fuerza electromagnética, para ponerlo de manifiesto. El más humilde de los imanes permanece pegado a la superficie de una nevera, sin caer al suelo, desafiando la atracción de todo un planeta. Cuando las masas son enormes, cuando tratamos con planetas o estrellas, resulta sencillo registrar los efectos de las atracciones gravitatorias, pero las fuerzas entre cuerpos pequeños son tan débiles que advertirlas supone todo un desafío experimental.

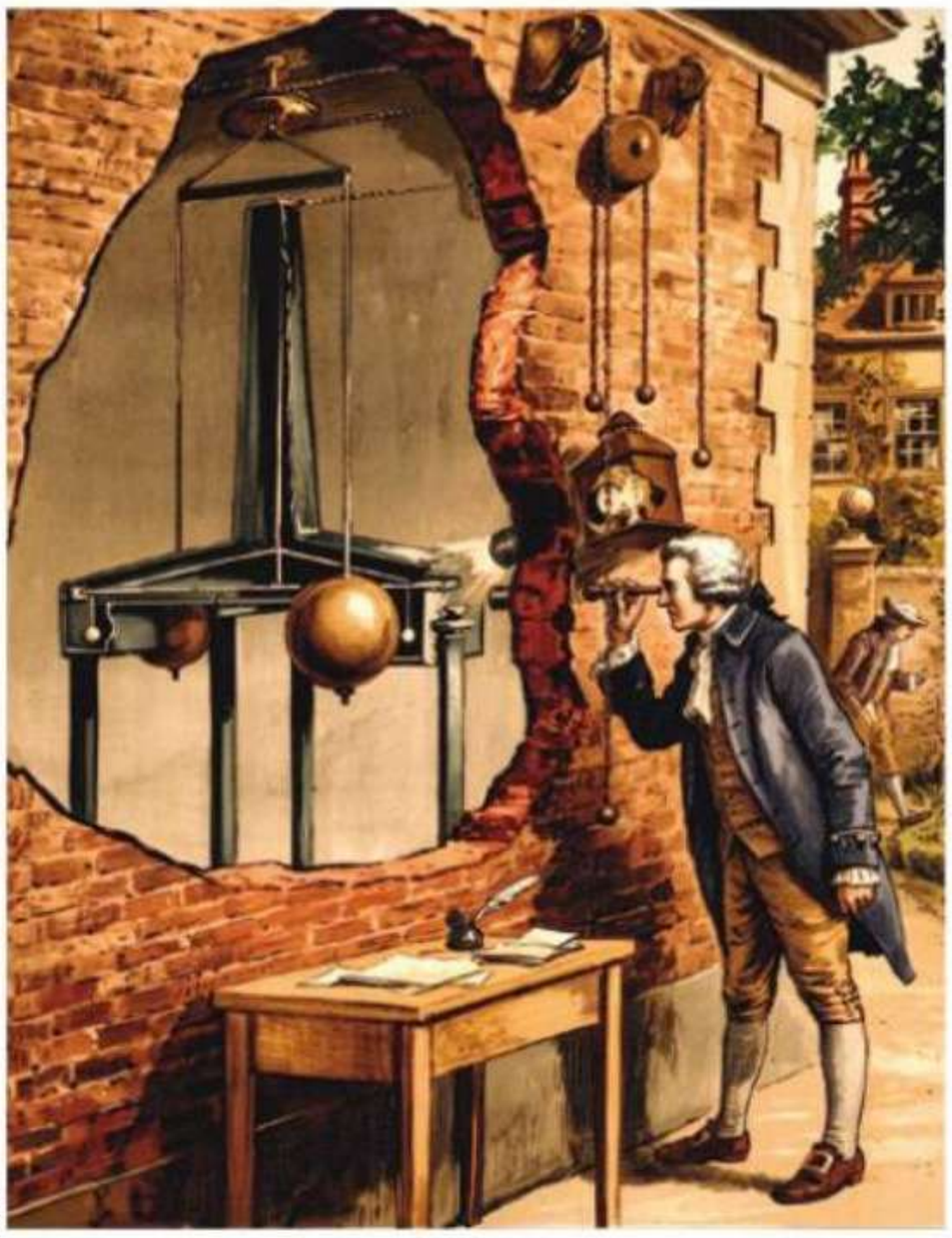
Michell se propuso reunir evidencias de la acción de la gravedad allí donde nadie había sabido encontrarlas. Lo hizo espoleado por su amigo Henry Cavendish, que se ganaría un lugar en los libros de texto por haber descubierto el hidrógeno y por haber sido la primera persona en medir la fuerza de atracción entre dos masas en un laboratorio. Este último experimento lo ideó en realidad Michell, que además diseñó y construyó una balanza de torsión, un instrumento concebido con total alevosía para registrar tan sutilísimo efecto. Por desgracia, la muerte sorprendió a Michell en 1793, antes de que hubiera visto cumplido su sueño. Cavendish quiso honrar la memoria de su amigo y tomó el relevo. Partiendo de la balanza que había construido Michell y de sus diseños, culminó el experimento con éxito. En el proceso, obtuvo una medida bastante precisa de la densidad media de la Tierra y, por tanto, de su masa.

La amistad entre Michell y Cavendish fue fruto de una afinidad electiva. Ambos dieron muestras de un carácter retraído, la marca de muchos pioneros en el estudio de la gravitación. Newton, desde luego, no fue el más sociable de los hombres. Tanto Cavendish como Michell quisieron llevar una vida retirada, consagrada a los estudios científicos. Michell, en su parroquia de Thornhill; Cavendish, en un apartado rincón del bullicioso Londres. Aunque Cavendish fuera uno de los hombres más ricos de Inglaterra, prefería dormir en el laboratorio que se había construido en un suburbio de Clapham que en su suntuosa mansión del Soho. El único motivo razonable para romper este aislamiento era acudir a las reuniones de la Royal Society. Con todo, Michell y Cavendish trabajaron al margen de la máxima «publica o muere» que atenaza hoy en día a los científicos y se permitieron el lujo de dejar inédita la mayor parte de sus descubrimientos, rasgo ciertamente muy newtoniano.

En su afán por verificar el ámbito universal de la gravedad, Michell también consideró sus posibles efectos sobre la luz. Una vez metido en faena, fue más allá de los cálculos e imaginó la existencia de estrellas mucho más grandes que el Sol, cuyo poder gravitatorio las convertiría en trampas de las que la luz no podría escapar. En 1784 escribió que, si un cuerpo estuviera dotado de masa suficiente, «su propio poder gravitatorio forzaría a toda la luz que emitiera [...] a regresar a él». ¿Qué consecuencias tendría esto? «Si en la naturaleza existieran realmente cuerpos con una densidad no inferior a la del Sol y diámetros más de 500 veces el diámetro

del Sol, dado que su luz no podría llegar hasta nosotros [...], no podríamos recibir ninguna información visual [...] de la existencia de [dichos] cuerpos». Gracias a esta afortunada mezcla de imaginación y razonamiento científico, Michell fue la primera persona en concebir un agujero negro. Él decidió llamarlo con un nombre más poético, casi un oxímoron: «Estrella oscura».

Michell supuso que, aunque no las viéramos, el universo bien podía albergar infinidad de estrellas oscuras. Siendo invisibles, ¿cómo podría uno verificar su existencia? Lo cierto es que la propia gravedad delataría su presencia. Bastaría con que la estrella oscura contara con una compañera visible, un sol luminoso que orbitase a su alrededor. Que las estrellas oscuras vivieran en pareja tampoco era una hipótesis aventurada, ya que para entonces los astrónomos habían identificado muchos sistemas de estrellas dobles. Para cazar una estrella oscura, tendrían que estar atentos al comportamiento peculiar de una estrella que describiera una órbita misteriosa tras otra, como hechizada, en torno a un centro gravitatorio invisible. El procedimiento esbozado por Michell revelaría a finales del siglo pasado la presencia de varios agujeros negros. Sin ir más lejos, el agujero negro supermasivo que habita en el centro de la Vía Láctea, donde una decena de estrellas bailan espectralmente alrededor de la más absoluta oscuridad. John Wheeler describiría esta técnica a través de una analogía musical. Imaginad, nos decía, un local de fiesta bien entrada la noche, la pista de baile en penumbra, sobre la que se deslizan y dan vueltas las parejas: hombres de trajes negros abrazados a mujeres que lucen deslumbrantes vestidos blancos. La falta de luz mantiene a los hombres en la oscuridad, pero inferimos su presencia a partir de los movimientos de las bailarinas, que giran sin descanso en torno a sus compañeros invisibles.



ASC

Litografía *Cómo Henry Cavendish pesó la Tierra en 1798*.

Ya dijimos que, si uno piensa el tiempo suficiente en la gravedad, acaba por soñar con agujeros negros. Michell fue el primero, pero no el único en vislumbrar un universo poblado por estrellas colosales e imperceptibles. Si hacemos caso a Edgar Allan Poe, Pierre-Simon Laplace —también conocido como el Newton francés— exhibía un dominio virtuoso de las matemáticas, a cambio de una clamorosa falta de imaginación. Sin embargo, tuvo la suficiente para concebir la existencia de un astro que ningún telescopio había observado hasta el momento y que ningún telescopio podría observar jamás: un *corps obscur*. «La atracción gravitatoria de una estrella con un diámetro 250 veces el diámetro del Sol y una densidad comparable

a la de la Tierra sería tan grande que ninguna luz podría escapar de su superficie». Hasta donde sabemos, llegó a esta conclusión de manera independiente, sin conocer los artículos que Michell había publicado en la *Philosophical Transactions* de la Royal Society. Laplace escribió en 1796: «Por tanto, es posible que los cuerpos luminosos más grandes del universo resulten, por estas razones, invisibles». Una paradoja que hubiera satisfecho a Chesterton: las mayores fuentes de luz del universo serían al mismo tiempo los astros más oscuros.

El artículo de Michell despertó la curiosidad de Cavendish, incitándole a determinar cuánto se desviaría un rayo de luz bajo el influjo gravitatorio de una masa. Cavendish no podía saberlo entonces, pero ese tipo de cálculo interpretaría, casi un siglo después, un papel decisivo en el triunfo de la relatividad general, porque la magnitud de la desviación difiere en función de si uno la estima utilizando las fórmulas de Newton o si echa mano de las de Einstein. En otras palabras, las dos teorías no se ponen de acuerdo y arrojan predicciones diferentes. Cavendish no se animó a publicar sus resultados, que quedaron enterrados bajo una montaña de papeles inéditos. Menos reservado se mostró el astrónomo alemán Johann Georg von Soldner, que sí dio a conocer en 1804 un cálculo muy semejante, motivado en su caso por la lectura de la obra de Laplace.

Un aspecto interesante del trabajo de Michell y Laplace es que su imaginación científica jugó dentro de los límites clásicos. De ahí que concibieran las estrellas oscuras con una densidad igual a la del Sol o la Tierra, es decir, compuestas por lo que para ellos era materia ordinaria. En estas condiciones, sus ecuaciones dictaban que las estrellas tenían que ser mucho más grandes que el Sol. Los astrónomos de la época solo habían logrado determinar el tamaño de nuestra estrella, pero para Michell y Laplace no supuso ningún problema imaginar estrellas de tamaño mucho mayor. Curiosamente, las mismas ecuaciones permitían construir estrellas oscuras del tamaño del Sol, o incluso del tamaño de una canica o de un átomo. A cambio, tenían que exhibir una densidad muy superior a la del oro, el material más denso conocido entonces. La densidad se convertiría en un obstáculo conceptual importante, como veremos, en el largo camino hacia los agujeros negros. Para que una estrella dé lugar a un agujero negro es preciso someter a la materia a estados ciertamente extraordinarios de acuerdo con los parámetros de nuestra experiencia cotidiana.

Por tanto, a caballo entre los siglos XVIII y XIX, la ciencia ya había tenido su primer encuentro con los agujeros negros, si bien en una versión algo prosaica, newtoniana, sin potestad alguna sobre el tiempo. Las superestrellas oscuras de Michell y Laplace no hubieran servido como máquinas para viajar al futuro ni como portales a otros universos. Por tanto, no hubieran servido para justificar los dramáticos giros argumentales de *Interstellar*. ¿Su nulo impacto en la cultura popular se debe a esta falta de *glamour*? Cuando, en noviembre de 1783, Cavendish presentó ante la Royal Society las especulaciones de su amigo Michell —que

MICHELL SUPUSO QUE, AUNQUE NO LAS VIÉRAMOS, EL UNIVERSO PODÍA ALBERGAR INFINIDAD DE ESTRELLAS OSCURAS

no se había animado a salir de su retiro provinciano y viajar hasta Londres—, la paradójica idea de una estrella emboscada en la más absoluta oscuridad fue recibida con una salva de aplausos. ¿Cuál fue la razón de que se apagara este sincero entusiasmo? El propio Laplace apostató con discreción de sus corps obscurs. Había aventurado su existencia en 1796, en la primera edición de su monumental Exposition du système du monde. Este EDC presentaba una minuciosa y convincente descripción del sistema solar basada en las leyes de Newton. Laplace mantuvo las estrellas oscuras en la segunda edición, pero en la tercera suprimió discretamente el fragmento donde las mencionaba. ¿Qué le hizo cambiar de opinión en los doce años transcurridos desde la aparición del texto original?

Como dijimos al principio de esta sección, las superestrellas oscuras de Michell y Laplace surgen del maridaje entre dos grandes creaciones de Newton: su ley de gravitación universal y su teoría corpuscular de la luz. Einstein no destronaría la primera hasta 1915, pero la segunda se vio seriamente cuestionada mucho antes. Ya en tiempos de Newton, la teoría que considera que la luz está formada por un chorro de partículas conocía una poderosa rival: la teoría ondulatoria abanderada por el holandés Christiaan Huygens. En las escaramuzas iniciales entre las dos teorías, pesó más el prestigio de Newton, pero en 1801, el descubrimiento por parte de Thomas Young de un nuevo fenómeno óptico, la interferencia, pareció dictar sentencia en contra de la teoría corpuscular.

La interferencia es un fenómeno que revela casi de forma inapelable la naturaleza ondulatoria de una entidad física cualquiera. Se manifiesta de manera evidente en la superficie del agua. Supongamos que arrojamos a un estanque dos piedras de igual tamaño, de manera que toquen la superficie al mismo tiempo y en dos lugares separados por una determinada distancia. A partir de los puntos de impacto, se propagarán dos frentes de onda circulares que terminarán por cruzarse, de forma que sus acciones se superpondrán en cada punto de la superficie del agua. Donde coincida un valle con otro valle se formará un valle más profundo; donde coincidan dos cumbres, se elevará una cumbre más alta. Si coincide un valle con una cumbre, sus efectos se cancelarán y el agua quedará al mismo nivel que antes de los impactos. Se forma así un patrón de interferencia: la marca que delata la presencia de ondas. Young logró producir precisamente ese mismo patrón a partir de dos focos de luz, donde los refuerzos generaban zonas más brillantes y las cancelaciones, zonas de oscuridad.

Si la luz estaba compuesta por partículas, tenía todo el sentido del mundo suponer que se vería afectada por la presencia de otras masas. Si, por el contrario, Huygens y Young tenían razón, ¿a través de qué medio podría afectar la gravedad a una onda luminosa inmaterial? Nadie fue capaz de concebir un mecanismo viable. Con este divorcio de la luz y la gravedad, las estrellas perdieron su capacidad de atrapar de vuelta las ondas luminosas que hubieran emitido. Así fue cómo las estrellas oscuras se desvanecieron del universo clásico.

LA INTERFERENCIA REVELA CASI DE FORMA INAPELABLE LA NATURALEZA ONDULATORIA DE UNA ENTIDAD FÍSICA CUALQUIERA



SHUTTERSTOCK

Retrato de Isaac Newton, el físico y matemático inglés que revolucionó la ciencia con sus leyes del movimiento y la gravitación universal.

De no ser por la interferencia —nunca mejor dicho— de Young, quizá la ciencia ficción decimonónica nos hubiera regalado algún viaje a las estrellas de Michell y Laplace. Historias protagonizadas por exploradores barbudos, tocados con sombreros de copa, que veríamos subir a bordo de vehículos con forma de bala. Un largo cañón los dispararía contra la más completa oscuridad del espacio, donde descubrirían repentinamente una estrella deslumbrante, invisible hasta entonces. Quizá esas historias hubieran introducido los agujeros negros en la cultura popular cien años antes, a través de las obras de Julio Verne o Herbert George Wells. Quizá esas historias se hayan escrito en algún universo paralelo. En el nuestro, su vuelo se cortó antes de que pudieran siquiera despegar del suelo. Tendremos que conformarnos, pues, con un atisbo de lo que no fue. *El jardín botánico*, el largo poema escrito en 1791 por el abuelo de Charles Darwin, Erasmus —quien fuera amigo de Michell—, esconde una críptica alusión a nuestros agujeros negros newtonianos:

¡Flores del cielo! Vosotras también sucumbiréis al tiempo,
tan frágiles como vuestras hermanas de la pradera.
Desde el alto arco del Cielo se precipitará una estrella tras otra, Soles se hunden en soles, y sistemas aplastan sistemas, Caen de cabeza, extintos, hacia un oscuro centro,
¡Y todos, Muerte, Noche y Caos, se mezclan entre sí!
Hasta que, de las ruinas, emergiendo de la tormenta,
la NATURALEZA inmortal alza su versátil forma,
se eleva desde su pira funeraria en alas de fuego,
y asciende y brilla, distinta y la misma. ■

EL UNIVERSO DE LAS VAN GUARDIAS

Representación de la deformación espacio-temporal provocada por la gravedad de un agujero negro masivo. SHUTTERSTOCK

Los agujeros negros son hijos naturales de la gravedad y la historia de la ciencia ha conocido dos grandes teorías capaces de explicar con éxito los fenómenos gravitatorios: la teoría de la gravitación universal, de Isaac Newton, y la teoría de la relatividad general, de Albert Einstein. En la primera, ningún nexo sofisticado relaciona espacio y tiempo. Con ellos se pone en pie un universo que admite agujeros negros —las estrellas oscuras—, despojados, eso sí, de sus aspectos más intrigantes: las distorsiones temporales. La trampa gravitatoria que tienden resulta hasta ingenua, ya que cualquier astronauta a bordo de una nave espacial provista de buenos motores puede escapar de su prisión. Al margen de que en el universo hubiera o no, en efecto, estrellas oscuras, su concepción no supuso ningún desafío para los físicos clásicos. Como vimos, la primera vez que Cavendish propuso su existencia, en una reunión de la Royal Society, la idea tuvo una excelente acogida. Los agujeros negros einsteinianos son ya harina de otro costal. Habitan un universo en el que espacio y tiempo esconden un vínculo profundo y en el que las masas afectan al paso del tiempo.

Newton hubiera aceptado sin reservas las estrellas oscuras de Michell y Laplace como hijos naturales de su teoría. Einstein renegó siempre de los agujeros negros. Aunque los repudiara como hijos bastardos de la relatividad general, las ecuaciones que sostenían su teoría no ponían reparos a su creación. Sin embargo, a pesar de contar con la bendición de las matemáticas, los agujeros negros tuvieron un parto largo y complicado. Cuanto más se definía su naturaleza, más parecían desafiar todos los códigos de etiqueta que los físicos exigían al buen comportamiento de la materia. Durante décadas fueron un intruso molesto, ese extraño que nadie sabe muy bien quién ha invitado a la fiesta y que todos esperan que se marche de un momento a otro.

Antes de profundizar en todos los quebraderos de cabeza que causaron, veamos qué tipo de universo habitan los agujeros negros. Veamos qué clase de revolución científica desató Einstein a comienzos del siglo XX y por qué albergaba, solapadamente, una bomba de relojería que ni siquiera él mismo supo desactivar.



ISTOCK

Ilustración de una sesión científica del siglo XVIII en la sede de Crane Court. Sentado en la silla presidencial se encuentra sir Isaac Newton.

LOS VÉRTIGOS DEL RELATIVISMO

En el plazo de una década, Einstein dio a conocer dos teorías de la relatividad —que se distinguen con los apelativos de «especial» y «general»—, con las que reformaría dos auténticos muros de carga de la física clásica, levantados por Isaac Newton en las postrimerías del siglo XVII. La primera teoría corregía sus célebres leyes de la dinámica. La segunda venía a reemplazar la ley de gravitación universal. La relatividad especial explora las consecuencias de aceptar dos sencillos postulados. Por un lado, está el principio de relatividad: si un observador permanece quieto o se desplaza con velocidad constante, su punto de vista es tan bueno como el de cualquier otro observador que tampoco se mueva o que lo haga siempre a la misma velocidad. Estos observadores disfrutan del mismo estatus y en la jerga relativista reciben el nombre de «inerciales». La teoría concluye que no existen referencias absolutas que nos permitan decidir si un cuerpo está «de verdad» quieto o se está moviendo siempre con la misma velocidad. Ningún observador puede imponer su forma de ver las cosas a los demás. Todos los puntos de vista inerciales se consideran equivalentes.



THE ALBERT EINSTEIN ARCHIVES, THE HEBREW UNIVERSITY OF JERUSALEM

Retrato de Albert Einstein de 1905, año en que publicó sus artículos de la relatividad especial.

Todos hemos experimentado la ambigüedad fundamental que sostiene este principio de relatividad. Con los ojos cerrados, a bordo de un coche en marcha, en un momento en el que el vehículo no frene ni acelere ni tome una curva, sentimos la ilusión de inmovilidad. O al revés, sentados en un vagón de tren, experimentamos la ilusión de movimiento, aunque estemos detenidos, cuando otro convoy arranca a nuestro lado y observamos su marcha al otro lado de la ventanilla. Durante unos segundos somos incapaces de decidir quién se está desplazando, ellos o nosotros. La aceleración, que nos clava en el respaldo del asiento o nos impulsa hacia delante, que impone un incómodo traqueteo o bandazos, es el verdadero chivato del movimiento. Incluso con los ojos cerrados, el cuerpo nos advierte de cuándo estamos sufriendo aceleraciones.

El segundo postulado relativista sostiene que, en el vacío, cualquier observador inercial medirá el mismo valor para la velocidad de la luz.

NEWTON HUBIERA ACEPTADO LAS ESTRELLAS OSCURAS DE MICHELL Y LAPLACE COMO HIJOS NATURALES DE SU TEORÍA

A pesar de la aparente modestia de los dos postulados que acabamos de enunciar, su aceptación expulsó a los científicos del paraíso de la física clásica. A cambio de ponerse de acuerdo en qué velocidad de la luz miden en el vacío, los observadores inerciales se ven obligados a discrepar en cuestiones que —de acuerdo con el sentido común— no deberían admitir ninguna desavenencia. Un observador puede concluir, así, que la longitud de un objeto es menor cuando se mueve que cuando está en reposo, o que el tiempo transcurre más despacio en el interior de un vehículo en movimiento, o que dos sucesos que otro observador considera simultáneos ocurren en instantes diferentes. Estas discrepancias a la hora de describir los fenómenos (contracción espacial, dilatación temporal y ruptura de la simultaneidad) parecen arrojarnos en brazos de un subjetivismo radical. «La realidad se vuelve ilusoria y centrada en el observador cuando estudias relatividad [...]. O budismo. O te reclutan», bromea el soldado protagonista de *La guerra interminable*, la novela de ciencia ficción de Joe Haldeman. Sin embargo, la relatividad revela cómo todas las discrepancias entre observadores inerciales emergen de una misma realidad subyacente perfectamente lógica y coherente. Podemos verlo recurriendo a una sencilla analogía.

Trasladémonos a un taller de pintura. La profesora está distribuyendo encima de una mesa media docena de objetos para componer con ellos un bodegón: una botella, una manzana, un azucarero, una vela, una copa de vino... A continuación, dispone a los alumnos con sus caballetes en círculo alrededor de la mesa. Cada alumno observa los objetos desde una perspectiva diferente y refleja sus posiciones relativas en un cuadro distinto. Desde el punto de vista de Rosa, la botella y el azucarero aparecen juntos, y así los pinta: la mitad del cuerpo del azucarero asomando detrás de la botella. Para Alberto, los dos objetos están claramente separados por una distancia de un palmo. La representación bidimensional, en un lienzo, de la posición de estos objetos, que hacen Rosa y Alberto, resulta a primera vista contradictoria. Al menos lo sería para una criatura bidimensional, plana, que habitara en cada uno de los cuadros. Si caminara en la superficie del cuadro de Rosa, en cuanto saliera del azucarero entraría en la botella. En el bodegón de Alberto, tendría que recorrer un espacio entre ambos objetos.

El desacuerdo entre las dos representaciones —si los objetos se encuentran juntos o separados—, no pone en evidencia ninguna interpretación incoherente de la realidad, porque una única disposición del azucarero y la botella, perfectamente definida, es responsable al mismo tiempo de las dos perspectivas. Eso sí, para advertirla, necesitamos añadir una dimensión más a la superficie plana de los lienzos, trasladándonos a un ámbito superior de tres dimensiones. Rosa y Alberto pueden visualizar ese ámbito hasta con los ojos cerrados y deducir sin dificultad bajo qué ángulo estará contemplando la escena su compañero de taller. Apoyándonos en esta analogía, podemos interpretar las diferentes perspectivas que adquieren los observadores inerciales al considerar los fenómenos relativistas. Su aparente contradicción se produce en un ámbito de representaciones tridimensionales, las que

MINKOWSKI REFORMULÓ MATEMÁTICAMENTE LA RELATIVIDAD ESPECIAL QUE EINSTEIN HABÍA CONSTRUIDO



SMITHSONIAN INSTITUTION

ENLACE AL CANAL
x.com/byneontelegram
Ó escanea el código QR:

Retrato del matemático alemán Hermann Minkowski. Fue profesor de Einstein y comprendió antes que nadie que la teoría de la relatividad exigía una estructura revolucionaria.

nos proporcionan los sentidos, y se deshace si las consideramos en un espacio más amplio, de cuatro dimensiones. En él, un mismo fenómeno, que podemos definir sin ninguna ambigüedad, da lugar a diferentes interpretaciones tridimensionales. La falta de consenso entre los observadores inerciales desafía al sentido común porque afecta al tiempo, porque nuestra mente es incapaz de visualizar un espacio tetradimensional y porque solo se ponen de manifiesto a velocidades próximas a la de la luz, lo que las sitúa fuera del ámbito de nuestra experiencia cotidiana, donde se han forjado la intuición y el sentido común.

El primero en interpretar la relatividad desde esta óptica geométrica no fue sin embargo Einstein, sino uno de sus profesores de la Escuela Politécnica Federal de Zúrich, el matemático lituano Hermann Minkowski. Minkowski tomó el espacio y el tiempo y los ensambló de una manera muy peculiar para componer con ellos una estructura de cuatro dimensiones —tres espaciales (largo, alto y ancho) y una temporal—, el «espacio-tiempo». El 21 de septiembre de 1908, en una conferencia dictada en Colonia, selló para siempre esta singular alianza:

Las ideas acerca del espacio y el tiempo que deseo exponer ante ustedes han surgido del terreno de la física experimental, y en ello radica su fuerza. Muestran una tendencia radical. De ahora en adelante, el espacio y el tiempo, como entidades aisladas, se desvanecerán por completo como espectros, y solo una especie de unión entre ambos gozará de existencia independiente.

Minkowski reformuló matemáticamente la relatividad especial que Einstein había construido a partir de sus postulados, revelando cómo cuando dos observadores no se ponen de acuerdo sobre la longitud de un objeto, el ritmo al que discurre el tiempo o si un suceso ocurrió antes o después de otro, en realidad solo están confrontando diferentes perspectivas del mismo fenómeno. Advierten distintas facetas tridimensionales de una realidad tetradimensional, del mismo modo que los cuadros en el taller de pintura captan diversas facetas bidimensionales de una composición

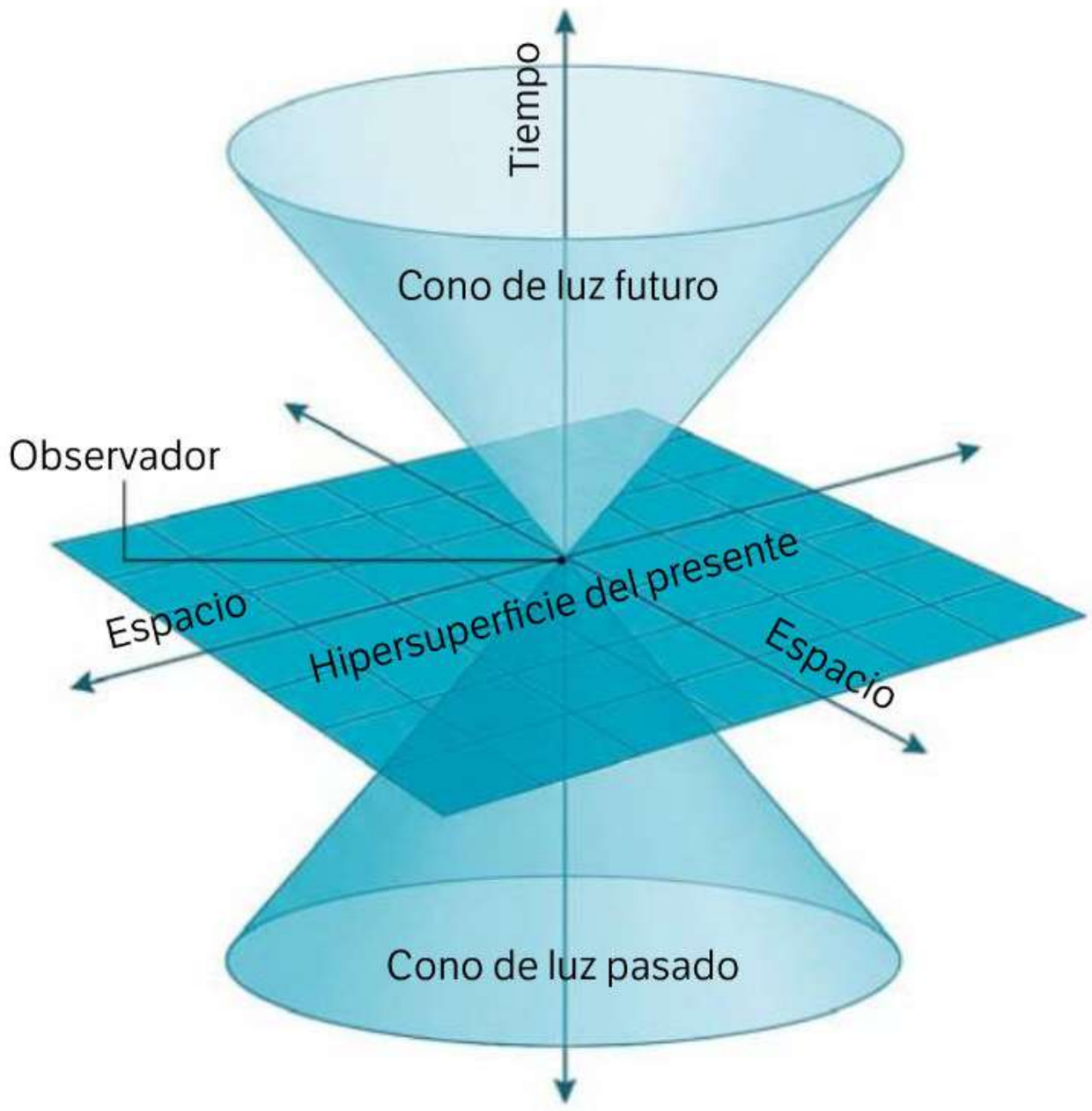


Diagrama del cono de luz en el espacio-tiempo de Minkowski. El observador se sitúa en el centro exacto (el presente), dividiendo el cosmos en un cono de luz pasado y un cono de luz futuro.

tridimensional. Bajo la aparente pluralidad de perspectivas, subyace en todos los casos una única realidad. De ahí que la relatividad, a pesar de su engañoso nombre, no abogue por la subjetividad o el relativismo, sino más bien por todo lo contrario.

Conviene precisar que la idea de ensamblar espacio y tiempo en una superestructura tetradimensional tampoco se debe a Minkowski. Como él mismo se ocupó de subrayar: «Nadie ha reparado nunca en un espacio, si no es en un instante dado, ni en un instante, si no es en un lugar determinado». En la física clásica, ubicamos los sucesos en un espacio y un tiempo. Hay, por tanto, implícito, un espacio-tiempo newtoniano, aunque pocos autores subrayaran su entidad tetradimensional. Adoptar esa perspectiva superior, tan incómoda e imposible de visualizar, no parecía aportar nada en el contexto clásico. La gracia del espacio-tiempo minkowskiano radica en cómo el tiempo se une a sus compañeras, las tres dimensiones espaciales, para generar todos los efectos relativistas. Al principio, Einstein no apreció demasiado la interpretación matemática de Minkowski. Se le antojaba una ocurrencia formal que de poco iba a servir, aparte de estorbar a la intuición física. Incluso se permitió algunas bromas al respecto: «Desde que los matemáticos han tomado al asalto la teoría de la relatividad, ni yo mismo la entiendo».

A Einstein, sin embargo, no le quedó más remedio que cambiar de opinión. A lo largo del tortuoso camino que lo conduciría desde la relatividad especial hasta la relatividad general, se vio forzado a asumir el marco conceptual de Minkowski. Eso sí, de algún modo Einstein le devolvería el golpe a su viejo maestro, ya que, si bien compró su ámbito tetradimensional, lo hizo para retorcerlo y distorsionarlo, ampliando de manera dramática el repertorio de posibles espacio-tiempos. En la interpretación geométrica de Minkowski, los observadores inerciales son como puntos o líneas rectas que se trazan sobre un folio apoyado encima de una mesa (un espacio-tiempo plano). Este rígido escenario cobra vida en la relatividad general. El espacio-tiempo se vuelve elástico, adquiere pliegues y accidentes, una orografía cambiante de cumbres y valles, que desvía el curso de las trayectorias inerciales. Esta geometría dinámica es la manifestación de la gravedad, de la presencia de masas y de energía en el universo.

Se puede entender que Einstein no cedió a la pulsión de los matemáticos de geometrizar la física, sino que más bien consiguió darle la vuelta a la tortilla y fisicalizó la geometría.

LA NATURALEZA SECRETA DE LA GRAVEDAD

¿Por qué los planetas orbitan alrededor del Sol? Newton ofreció una audaz respuesta a la pregunta. Como preámbulo a su explicación, señaló que los cuerpos exhiben un comportamiento inercial —permanecen inmóviles o se desplazan en línea recta con velocidad constante— siempre y cuando ningún agente externo los perturbe. Por tanto, para obligarlos a describir una curva cerrada, como hace un planeta, alguien debe ocuparse de incordiarlos todo el tiempo. Recordemos que la aceleración no es más que un cambio en la velocidad de un cuerpo, bien sea porque la velocidad aumenta o disminuye, bien sea porque cambia de dirección. Sin duda, para describir un círculo o una elipse, un planeta tiene que modificar constantemente la dirección de su movimiento hasta completar una vuelta y regresar al punto de partida. En el momento en el que deje de sufrir aceleración, se entregará a su naturaleza inercial, mantendrá constante su velocidad y seguirá en línea recta. En otras palabras, se saldrá por la tangente. Un sencillo experimento ilustra el principio. Basta con atar un peso al extremo de una cuerda y, sosteniéndola por el otro extremo, hacerla girar en círculo por encima de la cabeza. Si la cuerda se rompe, el peso saldrá disparado en una línea recta... que solo la atracción de la Tierra torcerá en una parábola.

La tensión de la cuerda tira del peso hacia el centro del círculo que traza en el aire y rectifica constantemente su tendencia a salirse por la tangente. En el caso de los planetas, ninguna cuerda los sujeta. ¿Qué los obliga entonces a trazar una curva cerrada en torno al Sol e impide que abandonen el sistema solar? Para explicarlo, Newton concibió una suerte de tensión intangible, que llamó «fuerza de la gravedad». Dictaminó que cualquier pareja de masas experimenta una atracción mutua, que se ejerce en la misma dirección que las une. Dicha atracción impide que los cuerpos se atengan a su carácter inercial y vivan siempre en reposo o desplazándose en línea recta. La fuerza gravitatoria impone aceleraciones, tira constantemente de las masas, alterando cualquier velocidad que lleven. Es la cuerda que rectifica sin tregua la propensión natural de los planetas a escapar. Newton expresó con precisión matemática la magnitud de este tirón, directamente proporcional al producto de las masas implicadas e inversamente proporcional a la distancia que las separe. Cuando uno recurría a sus ecuaciones para describir la dinámica del universo, este parecía ajustarse milimétricamente a su criterio. Lo que no hizo Newton fue explicar la naturaleza de tan misteriosa atracción. ¿Qué la provocaba? Newton se encogió de hombros y se contentó con solventar el cómo, soslayando el porqué de la gravedad. En privado, compartía la opinión de quienes le criticaban por esta omisión. Así lo hacía, por ejemplo, en una carta al filólogo inglés Richard Bentley: «Hasta tal pun-

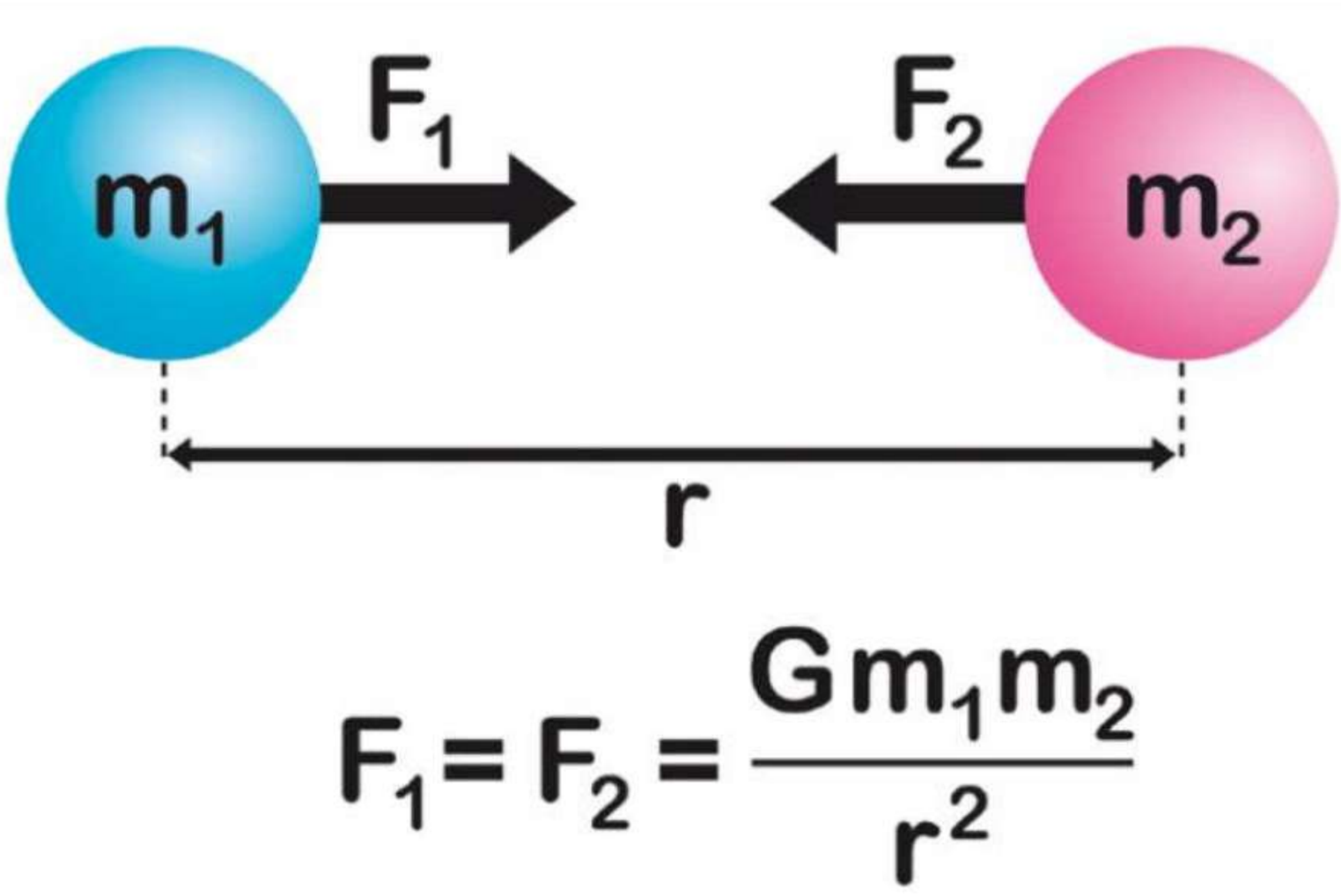
¿POR QUÉ LOS PLANETAS ORBITAN ALREDEDOR DEL SOL? NEWTON OFRECIÓ UNA AUDAZ RESPUESTA

DESCARTES CONCIBIÓ UN CIRCUITO CÓSMICO DE REMOLINOS, AGITADOS POR UNA CORRIENTE DE PARTÍCULAS DIMINUTAS

to me parece absurdo que un cuerpo pueda actuar a distancia sobre otro a través del vacío, sin la mediación de ningún agente, a través del cual se pueda transmitir de uno a otro la acción o fuerza de la gravedad, que pienso que ningún hombre que albergue una mínima facultad competente a la hora de pensar en asuntos filosóficos pueda jamás incurrir en él. La gravedad debe ser causada por un agente que actúe de manera constante, de acuerdo con ciertas leyes, pero si dicho agente es material o inmaterial es una cuestión que he dejado a la consideración de mis lectores».

No dejaba en manos de sus lectores una tarea sencilla. Descartes, sin ir más lejos, fracasó en ella. Concibió un circuito cósmico de remolinos, agitados por una corriente de partículas diminutas, que chocaban contra los planetas y los mantenían en movimiento. Sin embargo, todos los modelos matemáticos basados en vórtices de partículas invisibles fueron incapaces de reproducir las observaciones. Este fracaso inesperado terminó de encumbrar a Newton. Durante más de doscientos años, no hubo teoría capaz de proyectar la más mínima sombra sobre la fuerza newtoniana de la gravedad. Cuando esta se introducía en las leyes de la dinámica, se obtenían ecuaciones que reproducían con precisión asombrosa las trayectorias que seguían los astros en el firmamento o los proyectiles que los artilleros lanzaban desde la superficie de la Tierra.

¿Qué impulsó a Einstein a meterse en el jardín de Descartes y cuestionar una de las leyes científicas más exitosas y contrastadas de todos los tiempos? Un descubrimiento embarazoso: la ley de gravitación universal y la relatividad especial eran incompa-

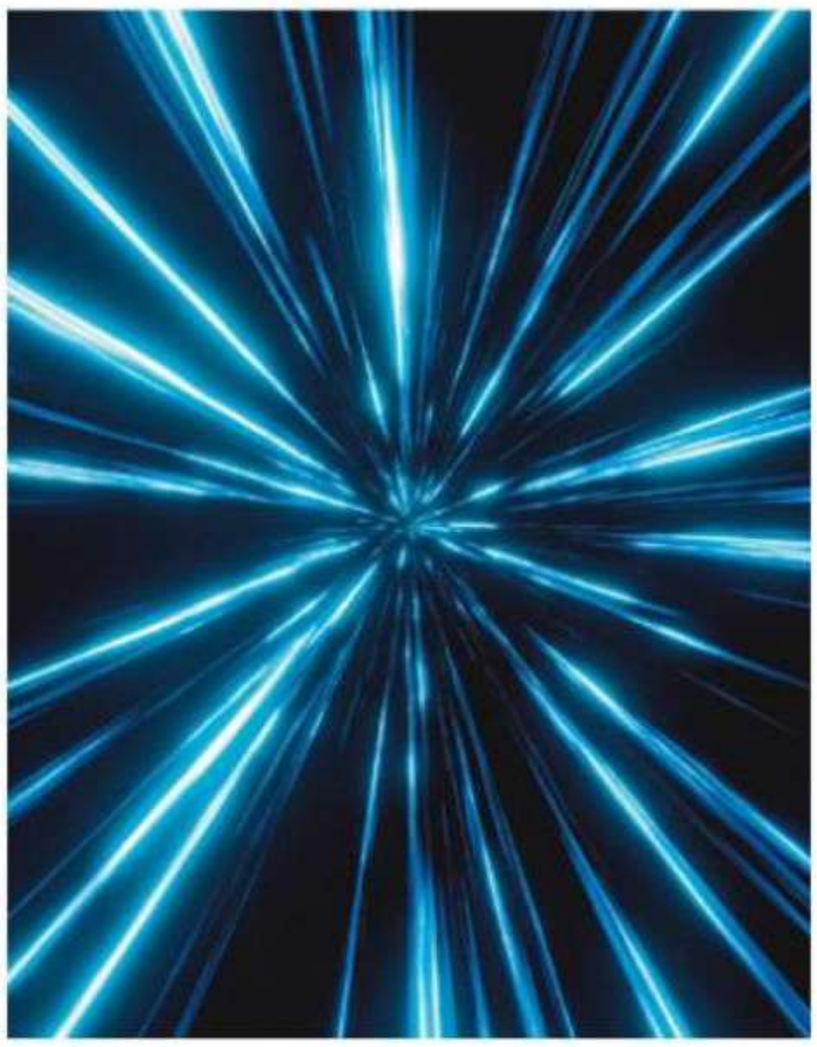


SHUTTERSTOCK

Ecuación clásica de la atracción universal. El esquema ilustra cómo la fuerza gravitatoria depende de la cantidad de masa y de la distancia entre los cuerpos.

tibles. Una vez que Einstein fijó sus dos postulados relativistas, hubo que modificar y ajustar a la nueva normativa las famosas leyes de la dinámica de Newton, que los estudiantes de física aprenden con diferentes grados de entusiasmo durante la secundaria. Al emprender la reforma, uno se da cuenta de que el vínculo relativista entre el espacio y el tiempo afecta a las reglas para sumar velocidades, algo que después de todo resulta razonable, puesto que la velocidad establece precisamente una relación entre espacio y tiempo. Sin embargo, de la reforma emerge un inesperado límite de velocidad, ningún cuerpo que se encuentre en reposo o se desplace a una velocidad inferior a la de la luz puede acelerar hasta superar la velocidad de la luz.

Y aquí es donde surgía el problema, la ley de gravitación universal no se sometía al nuevo límite de velocidad. Según Newton, la súbita desaparición del Sol afectaría de forma instantánea al resto de masas del universo. Roto el vínculo gravitatorio, el sistema solar se desharía de inmediato y todos los planetas se saldrían de sus órbitas. Esta inmediatez chocaba de frente con el credo relativista, que establecía que nada podía viajar más rápido que la luz. En caso de que el Sol hiciera mutis por el foro, tendrían que transcurrir, como mínimo, ocho minutos antes de que nos diéramos cuenta. Es el tiempo que necesita el mensajero más veloz, la luz, en salvar la distancia entre nuestra estrella y la Tierra. Nada, ni siquiera una mala noticia, podría llegarnos más deprisa.



SHUTTERSTOCK

Aunque la luz nos parece instantánea, sus fotones tardan unos 8 minutos y 20 segundos del Sol a la Tierra.

Ante este conflicto, a Einstein no le quedó más remedio que buscar una nueva formulación para la interacción gravitatoria, de manera que un cambio de estado en una masa tardase un tiempo en repercutir en las demás masas del universo. Sin embargo, esa nueva formulación debía reproducir al mismo tiempo todos los vaticinios exactos que había ofrecido la teoría clásica y que se llevaban verificando siglos. Parecía una tarea sobrehumana y, al completarla con un éxito rotundo, Einstein se encumbró a la altura de Newton.

¿Cuál fue su respuesta a la pregunta de por qué los planetas orbitan alrededor del Sol? Resulta fácil verlo a través de un símil. Imaginemos una canica que se desliza sobre una superficie horizontal tan pulida que nos permita ignorar el rozamiento. Mientras nada la perturbe, la canica seguirá una trayectoria en línea recta con velocidad constante, como un observador inercial. ¿Qué sucede si la canica entra en una región donde la superficie presenta pequeñas depresiones o resaltes? Su trayectoria se modificará para ajustarse al relieve. Cambiará de dirección una y otra vez, subirá o bajará desniveles. Es decir, sufrirá aceleraciones. Si se desliza por una concavidad de pendiente suave, puede llegar a describir una órbita cerrada y quedar atrapada en ella. Sería el tipo de trayectoria que seguiría la canica si la hiciéramos rodar en el interior de un cuenco.

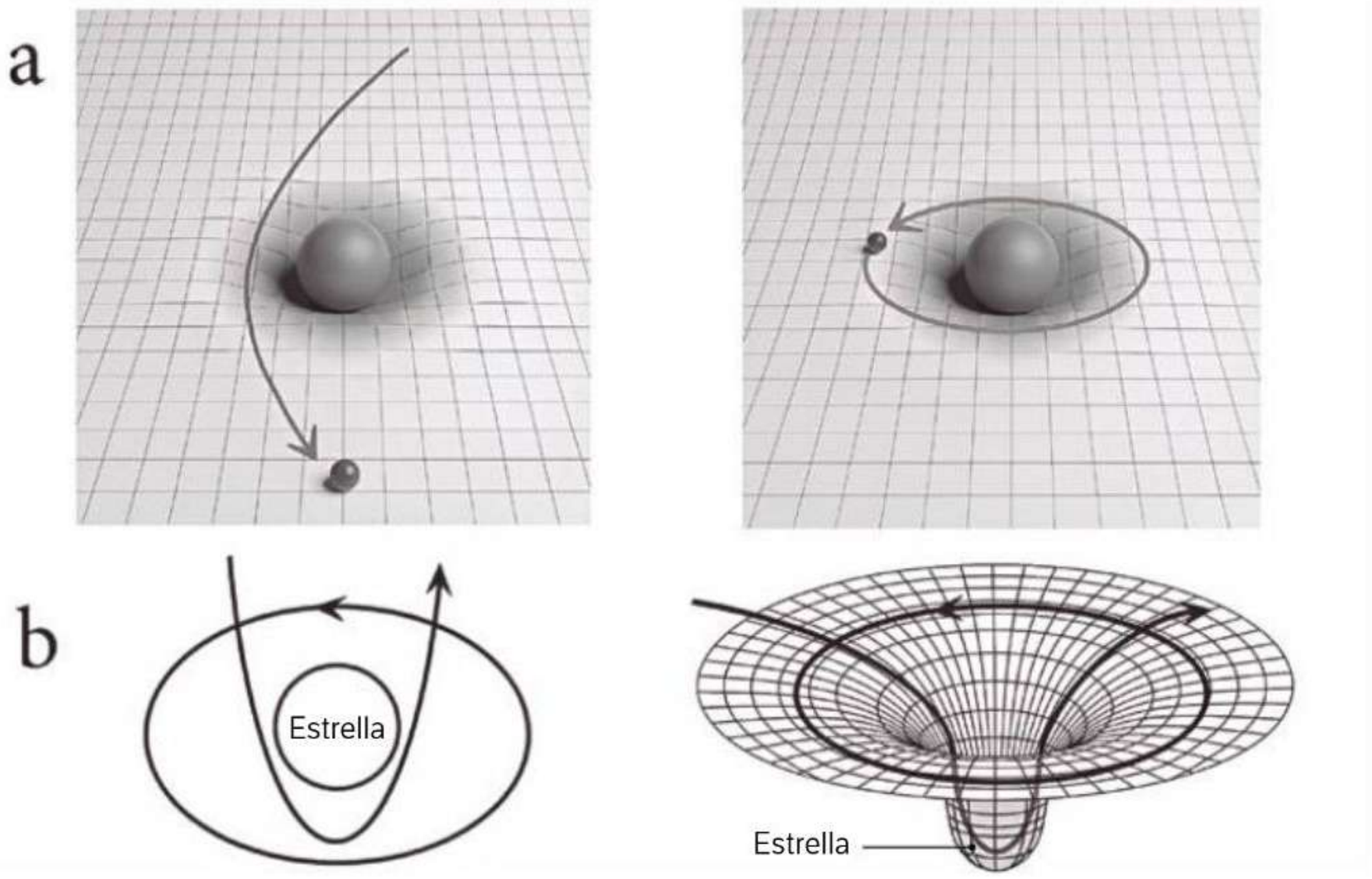


Figura 1. En a), la analogía de la lámina elástica para la gravedad. Dos canicas describen trayectorias abiertas y cerradas al internarse en la hondonada que crea otra esfera más masiva. En b), dos descripciones alternativas del movimiento de dos cuerpos en torno a una estrella. La primera descripción, clásica, obedece a una atracción instantánea. La segunda, relativista, a las restricciones que impone la geometría del espacio.

Sustituyamos ahora la superficie por una lámina elástica, de manera que las hondonadas las produzca el propio peso de los cuerpos que se apoyan en ella. Situemos una esfera pesada en un punto y echemos a rodar la canica en línea recta, a una cierta distancia. La presencia de la esfera pesada deforma la lámina, creando un declive que desvía el curso de la canica, atrayéndola, hasta forzarla a completar una vuelta a su alrededor. De no existir ningún rozamiento entre la lámina y la canica, esta describirá una órbita detrás de otra a perpetuidad.

En general, la forma de la lámina condiciona el movimiento de las esferas que ruedan sobre su superficie, pero las propias esferas son, además, las que crean los accidentes de la superficie (figura 1). En caso de que la lámina fuera invisible, ¿a qué atribuiríamos el obstinado peregrinar de la canica en torno a la esfera pesada? Quizá a una misteriosa atracción mutua, cuya verdadera razón de ser no sabríamos determinar, al no distinguir la superficie. ¿Cómo sospechar siquiera que la inercia de la canica se limita a ceñirse al contorno peculiar que adopta la lámina en cada región por la que pasa?

La analogía de la lámina ilustra cómo la geometría proporciona una fórmula para crear aceleraciones, es decir, para desbaratar el comportamiento inercial, consustancial a los cuerpos en ausencia de gravedad. El movimiento de la canica depende de las irregularidades de la superficie sobre la que se desliza. No se desplaza del mismo modo cerca de la esfera que lejos de ella. Según en qué punto de la lámina la situemos encontrará un entorno diferente y responderá en consecuencia. Donde es plana, no sufre aceleración y se mantiene en reposo o rueda en línea recta con velocidad constante. Donde hay una pendiente, su trayectoria se tuerce. Cuanto mayor sea el desnivel, mayor será la desviación y, por consiguiente, la aceleración. De modo semejante, Einstein imaginó que había una razón de ser geométrica detrás de

los diversos cambios de velocidad que experimenta un cometa, por ejemplo, según dónde se halle, en la vecindad del Sol o recorriendo el espacio entre Saturno y sus satélites. La irrupción de la aceleración, de las variaciones de velocidad que experimentaban los cuerpos celestes, obedecía al carácter irregular de una estructura subyacente invisible, el espacio-tiempo. Su naturaleza era dinámica, muy distinta del espacio-tiempo de la relatividad especial, plano en todos sus puntos. Al carecer de accidentes, el espacio-tiempo de Minkowski no modifica la naturaleza inercial de los observadores. Si estos quieren acelerar, deben hacerlo por sus propios medios, a través de una colisión, por ejemplo, o utilizando un cohete.

En el universo de Newton, espacio y tiempo levantan un escenario neutro que no se hace notar y nunca estorba a sus ocupantes. En él se representa el enigmático drama de las interacciones gravitatorias, que se introducen a través de un mecanismo artificioso. Por el contrario, en el universo de Einstein, espacio y tiempo se asocian para dar forma al espacio-tiempo, un medio que posibilita el diálogo entre las masas, del que emerge la gravedad con naturalidad. El espacio-tiempo presenta una curvatura local y dicha curvatura se manifiesta como una fuerza gravitatoria. Cuanta más masa se concentre en un volumen determinado, tanto más se alejará la geometría de esa región de un espacio plano, mayor será su curvatura y más impacto gravitatorio tendrá en los cuerpos que se internen en ella. Como veremos, los agujeros negros constituyen una distorsión extrema del tejido del espacio-tiempo.

Un aspecto fundamental de la relatividad general es que se reduce a la física de Newton cuando la gravedad es débil y los cuerpos se mueven a velocidades bajas comparadas con la de la luz. Entonces el relieve del espacio-tiempo se ajusta casi a la perfección a las aceleraciones que dicta la ley de gravitación universal. Estas condiciones se cumplen siempre y cuando las masas no se concentren dentro de ciertos volúmenes críticos y la lámina del espacio-tiempo, aproximadamente plana, presente solo hondonadas modestas con pendientes muy suaves como sucede en el entorno de la Tierra. Las divergencias entre las predicciones de ambas teorías se vuelven entonces casi imperceptibles. No obstante, si se contrastan con la realidad, la naturaleza siempre falla a favor de Einstein. Al mismo tiempo, esta nueva manera de interpretar las interacciones gravitatorias elimina los molestos efectos instantáneos de la ley de Newton. Si retiramos la esfera pesada de la lámina elástica, esta no se alisa de inmediato. La canica tarda un tiempo en acusar la ausencia y sigue dando varias vueltas a medida que la hondonada se va reduciendo hasta desaparecer. De modo semejante, el espacio-tiempo va modificando su geometría de manera gradual —acomodándose a los cambios que le impongan las masas—, a una velocidad que nunca supera la de la luz.

Llegados a este punto, podríamos caer en la tentación de considerar el espacio-tiempo como algo tangible. Un misterioso material, elástico e invisible, en el que los cuerpos se hallan inmersos. Sin embargo, no hay que interpretar la imagen de la lámina en un sentido literal. Nunca hay que perder de vista que se trata de una

CUANTO MAYOR SEA EL DESNIVEL, MAYOR SERÁ LA DESVIACIÓN Y, POR CONSIGUIENTE, LA ACELERACIÓN

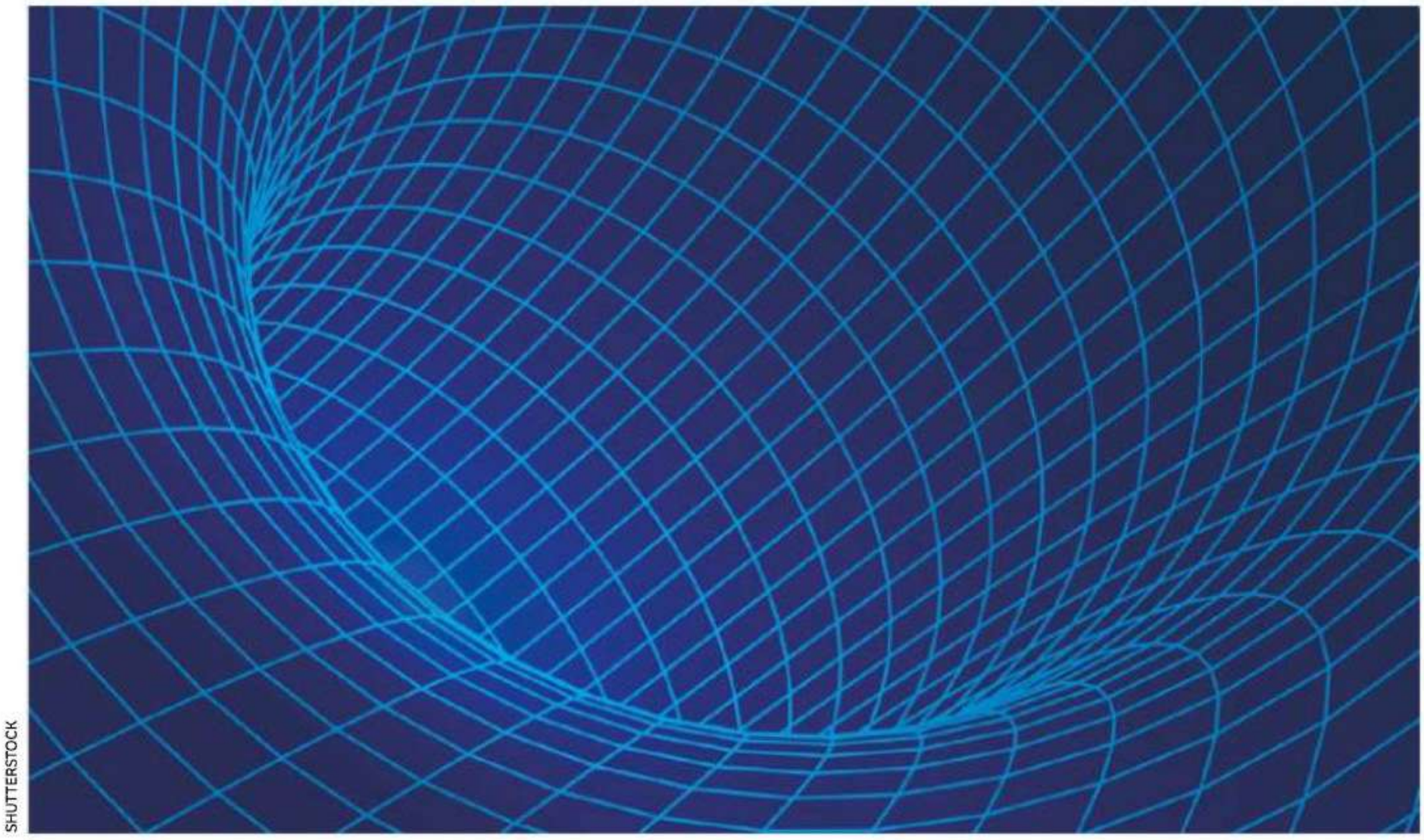
analogía. Las ecuaciones de Einstein se limitan a establecer que las propiedades del espacio cambian de un punto a otro, modificando las condiciones que encuentran los cuerpos que se desplazan a través de él. Que estas propiedades cambien en función de si uno está cerca de la superficie de Júpiter o en mitad de una nube de gas interestelar no se debe a la intervención de ningún material que lo permea todo. Es la presencia de masa o energía la que, a través de la gravedad, modifica las condiciones del espacio que atravesamos, interfiriendo en nuestra naturaleza inercial.

De hecho, la analogía de la lámina elástica no refleja bien algunos aspectos fundamentales de la relatividad general. Su superficie solo representa dos dimensiones espaciales del espacio-tiempo. La tercera dimensión que se observa en las distintas imágenes de la figura 1 (que es tridimensional y tiene profundidad), no encuentra un equivalente en la naturaleza y constituye un mero artificio para representar gráficamente, por medio de hondonadas y desniveles, cómo pueden cambiar las propiedades de un espacio —en este caso, de una superficie— de un punto a otro. En una versión completa, tetradimensional, del espacio-tiempo, los accidentes de su inestable geometría no se limitarían al espacio. Así, cuando un cuerpo recorre las cuatro dimensiones del universo, encuentra que el paso del tiempo tampoco es uniforme. Allí donde la gravedad es más intensa, avanza más despacio. Un reloj situado cerca de una masa marcha a un ritmo más lento que otro situado lejos de ella. El efecto pasa por completo desapercibido cuando intervienen gravedades tan modestas como la que impone la Tierra. En el caso del Sol, el tiempo cerca de su superficie transcurre un par de millonésimas de segundo más despacio que en un lugar remoto, en el que apenas se deje sentir su influencia gravitatoria. Dos relojes, uno próximo a la superficie del Sol y otro distante, acumularían una diferencia de poco más de sesenta segundos en el curso de un año.

En determinadas circunstancias, este espacio-tiempo tetradimensional puede adoptar una geometría muy particular en torno a una curvatura extrema, delimitando una región en la que las masas o la luz puedan entrar, pero no salir. Lo que impide huir de esa región no es en realidad una irresistible atracción gravitatoria, sino el modo en el que cambian las propiedades del espacio en su interior, desviando la trayectoria de la masa o de la luz que se ha internado en ella, como hacen los desniveles con la canica, conduciéndola siempre a un mismo punto. Ese punto está situado en el centro de la región y obedece al nombre de singularidad.

Cuanto más se aleja uno de la singularidad, más se va suavizando la curvatura del espacio-tiempo. Llega un momento en el que se vuelve imperceptible. A una distancia prudencial, la forma del espacio-tiempo se vuelve indistinguible de la que crearía una estrella o un planeta a su alrededor. Sus accidentes podrían desviarnos más o menos de nuestro curso o incluso podrían atraparnos en una órbita estable. Sin embargo, si viajamos a bordo de una nave equipada con cohetes de potencia suficiente, nada nos impediría abandonar la órbita y alejarnos. Pero existe una frontera invisible que debemos guardarnos de cruzar. Si la traspasamos,

CUANTO MÁS SE ALEJA UNO DE LA SINGULARIDAD, MÁS SE VA SUAVIZANDO LA CURVATURA DEL ESPACIO-TIEMPO



SHUTTERSTOCK

A diferencia de las «estrellas oscuras» mecánicas de la física clásica, los agujeros negros einsteinianos actúan como trampas geométricas extremas.

entraremos en una región en la que los propios accidentes del espacio-tiempo nos irán conduciendo paso a paso, sin remedio, hasta la singularidad. La frontera que, una vez traspasada, nos embarca en este viaje sin retorno, recibe el nombre de horizonte de sucesos. Ciertamente dibuja un límite desconcertante. Todo lo que se sitúe en su interior se halla desconectado causalmente del exterior. En un lenguaje más llano, nada situado en su interior puede comunicarse con el exterior. En particular, nada puede salir. Todos los caminos de esa región del espacio-tiempo conducen a Roma, a la singularidad.

Por supuesto, esta singular geometría que se arma en torno a una curvatura extrema es lo que se conoce como un agujero negro.

SUEÑOS Y PESADILLAS EN LA CUARTA DIMENSIÓN

A la hora de identificar los orígenes de la ciencia ficción, uno puede remontarse tan atrás como quiera. Puede conformarse con Julio Verne y Herbert George Wells, o recular hasta Mary Wollstonecraft Shelley, o seguir retrocediendo hasta los viajes satíricos de Cyrano de Bergerac o Jonathan Swift, hasta el *Somnium* de Johannes Kepler o, si lo que está buscando es respetabilidad a través de una conexión con el mundo clásico, hasta la *Historia verdadera* de Luciano de Samosata. Lo cierto es que, como género autoconsciente, cultivado por una comunidad estable de escritores y seguido por una legión de aficionados, se afianzó en el periodo de entreguerras, en las revistas *pulp* estadounidenses —llamadas así por la mala calidad de su papel de pulpa de madera—, justo en las décadas de 1920 y 1930 en las que Einstein y la relatividad coronaban la cima de su popularidad. El nuevo género rendiría culto a la ciencia y, al mismo tiempo, alumbraría nuevas maneras de imaginarla. Entre sus lectores figuraban muchos adolescentes, que descubrieron



A la izquierda, portada de la revista *Astounding Stories* de enero de 1930; a la izquierda, portada de *Amazing Stories Quarterly*, publicación fundada por Hugo Gernsback.

en las páginas de revistas como *Amazing Stories*, *Astounding Stories* o *Science Wonder Stories* la vocación que los llevaría a hacerse físicos, biólogos o químicos. Más adelante, su práctica profesional participaría de una cultura científica construida en parte a partir de la ficción.

También es verdad que la ciencia ficción proporcionó a muchos autores que no sentían el menor interés por la ciencia un nuevo marco —el espacio interestelar, planetas exóticos, la Tierra del futuro, viajes en el tiempo, dimensiones alternativas— en el que volver a contar las mismas historias que habían contado ya mil veces ambientadas en un atolón del Pacífico, en un rancho de Texas o en el Bajo Imperio romano. Paul Ernst, autor curtido en toda suerte de *pulps*, revelaba los ingredientes de la receta: «Cuando tenía que escribir ciencia ficción, añadía una pizca de ciencia al misterio». Sin embargo, en manos de otros autores con inquietudes científicas, el género trajo también nuevas maneras de pensar e imaginar la ciencia. A estos escritores no los animaba el afán de revender por enésima vez los trillados argumentos del pasado, sino un deseo de vislumbrar y comprender el futuro. El lema de Hugo Gernsback, editor de la primera revista de ciencia ficción, fue: «Hoy, extravagante ficción; mañana, realidad prosaica». Parecía la consigna del nuevo siglo, que transformaba el mundo a ojos vistas bajo el empuje de invenciones impensables para una generación anterior, como la radio, el automóvil, el avión o el cine sonoro. Muchos editoriales de Hugo Gernsback rendían tributo a la relatividad con títulos explícitos, como *El increíble Einstein* o *Las maravillas de la gravitación.*

La relatividad campó a sus anchas en sus revistas y también en las de la competencia. Una página de autopromoción del *Amazing Stories Quarterly* de otoño de 1930 trataba de llamar la atención de los lectores con el mensaje: «¡Einstein explicado a través de la ficción!». Debajo se anunciaba el relato *El príncipe de los mentirosos*, de Lucile Taylor Hansen, acompañado de la siguiente promesa: «Con

esta bonita historia sobre la relatividad y la cuarta dimensión, se pueden venir abajo muchas de sus ideas preconcebidas; pero recibirá tantas otras más a cambio que se sentirá más que compensado por la pérdida». Los autores de esta ciencia ficción optimista, que aún no había sufrido el golpe de la Gran Depresión, encontraron dos vías principales para explotar la nueva veta de la relatividad, ambas relacionadas con su carácter tetradimensional. En la primera vía, más ortodoxa, la cuarta dimensión era el tiempo y se podía recorrer con la misma facilidad que una carretera de doble sentido. En la segunda, era espacial y abría la puerta a explorar otras dimensiones desconocidas.

La idea de acoplar una cuarta dimensión, ya fuera temporal o espacial, a las tres dimensiones espaciales no fue desde luego un invento del siglo XX, aunque la obra de Einstein contribuyera insospechadamente a su popularización. Como sucede con casi cualquier cuestión que uno decida abordar, Aristóteles ya se había pronunciado al respecto: «Entre las magnitudes, la que se extiende a lo largo de una dimensión corresponde a la línea; la que lo hace a lo largo de dos, a la superficie; la que lo hace a lo largo de tres, a un sólido. Más allá de estas magnitudes, no existen más, puesto que todas las dimensiones posibles se reducen a tres [...]». La autoridad de Aristóteles desbarató durante siglos cualquier posibilidad de una cuarta dimensión. Siguiendo los pasos del maestro, Tolomeo trató de producir una demostración de su inexistencia, que convenció a Leibniz, pero no a Kant, que señaló con razón que la prueba descansaba en un razonamiento circular.

En sus inicios, las matemáticas tuvieron un fuerte anclaje en la geometría y en los conceptos que se podían visualizar y representar gráficamente. El álgebra dio sus primeros pasos como un discurso verbal, sin ecuaciones. Aquello que se ignoraba (la incógnita), se representaba como una línea. Si se multiplicaba por sí misma (la incógnita al cuadrado), se representaba mediante una superficie. Si se multiplicaba tres veces (la incógnita al cubo), se representaba a través de un volumen. ¿Qué sucedía si se multiplicaba cuatro veces? La incapacidad de dar sentido a estas expresiones mediante una imagen mental confundió a los algebristas, que de entrada las censuraron, considerándolas contra natura.

Sin embargo, la curiosidad mató al gato. El monje alemán Michael Stifel, defensor de Lutero, se permitió el estudio de las ecuaciones de cuarto grado, lo que suponía ir «más allá del cubo, como si hubiera más de tres dimensiones». Con la advertencia expresa, eso sí, de que ese nuevo ámbito se exploraba como una suerte de pasatiempo mental, porque no existía en la naturaleza. Un siglo después, John Wallis defendía básicamente la misma postura. Uno podía escribir en el papel cualquier potencia mayor que tres, del mismo modo que podía hablar de una quimera o de un centauro. Estos monstruos matemáticos suponían, sin embargo, un desafío mayor para la imaginación: «Longitud, ancho y grosor agotan todo el espacio. Ninguna fantasía puede concebir la existencia de una cuarta dimensión local más allá de estas tres». En dos mil años no se habían separado tanto de Aristóteles.

LA CIENCIA FICCIÓN TRAJO ADEMÁS NUEVAS MANERAS DE PENSAR E IMAGINAR LA CIENCIA

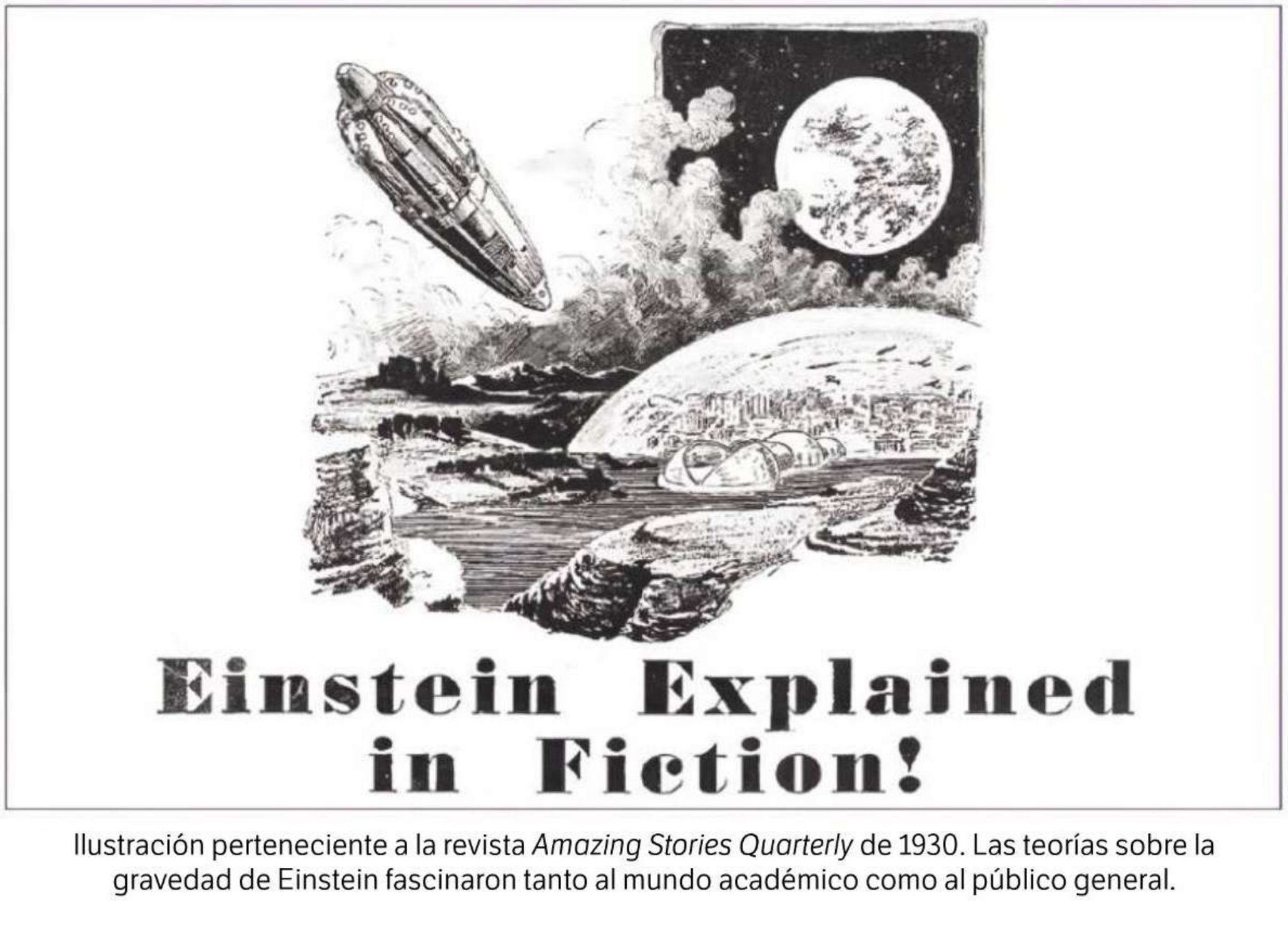


Ilustración perteneciente a la revista *Amazing Stories Quarterly* de 1930. Las teorías sobre la gravedad de Einstein fascinaron tanto al mundo académico como al público general.

A medida que las matemáticas se fueron volviendo cada vez más sofisticadas, en un camino sin retorno hacia la abstracción pura, se fueron abandonando las precauciones y los matemáticos terminaron formalizando con todo rigor la noción de espacios de dimensiones arbitrarias. La cumbre de este proceso se alcanzaría en 1854, con la presentación de *Sobre las hipótesis que subyacen los fundamentos de la geometría*, donde el alemán Bernhard Riemann caracterizaría espacios con una cantidad de dimensiones arbitraria, sentando las bases de la geometría diferencial, el lenguaje que más tarde utilizaría Einstein para componer la relatividad general.

Tarde o temprano, estos juegos dimensionales tenían que salir del exclusivo círculo de los matemáticos. En 1884, el maestro de escuela británico Edwin Abbott Abbott publicó *Planilandia*, una sátira de la sociedad victoriana al estilo de Swift, protagonizada por criaturas planas —polígonos— que habitan un mundo bidimensional. La población de *Planilandia* se ajusta a un rígido sistema de castas, determinadas por el número de lados que posea cada individuo. El protagonista, un cuadrado, recibe la visita de una esfera, un cuerpo tridimensional. Al principio, la recién llegada se manifiesta como un punto, que surge como por ensalmo de la nada, y que pasa a convertirse en un pequeño círculo. En función de qué sección de la esfera corte la superficie bidimensional en la que habita el cuadrado, este ve cómo la circunferencia crece o decrece. Lo más que él alcanza a percibir son secciones de la esfera (figura 2). Cuando esta decide marcharse, separándose del plano en el que vive el cuadrado, el círculo comienza a menguar hasta convertirse en un punto y por fin desvanecerse.

¿Los humanos podían extrapolar este juego entre dos y tres dimensiones a tres y cuatro dimensiones, interpretando el papel del cuadrado ante entidades tetradimensionales? En 1904 una imprenta de Londres sacó de sus prensas un libro titulado *La cuarta dimensión*. Contenía un apéndice donde se daban instrucciones detalladas para fabricar 81 cubos de colores. Borges se refirió a ellos como «los falaces cubos de Hinton». Su estudio concienzudo garantizaba el desarrollo de la capacidad para visualizar una cuarta dimensión espacial. Cuenta la leyenda que muchos que lo intentaron estaban comprando sin saberlo un billete sin retorno a la celda acolchada de un hospital psiquiátrico. Al parecer, la contemplación sucesiva de los cubos sumía en un trance autohipnótico, placentero, pero del cual resultaba imposible despertar. Como en un relato fantástico, la manipulación de los cubos abría la puerta de un laberinto mental de cuyos recodos y recovecos no se regresaba jamás.

El autor de esta trampa mortal, el inglés Charles Howard Hinton, supo permanecer inmune a los peligros de su invención. Fue profesor de matemáticas, se casó con una hija de George Boole —el patriarca del álgebra computacional—, escribió relatos de ciencia ficción, fue condenado por bigamia, escapó a Japón e inventó una máquina que lanzaba pelotas de béisbol para ensayar el bateo. En una carambola del destino, o quizá de la cuarta dimensión, Hinton acabó su vida profesional en el mismo punto donde la empezaría Einstein, como empleado de una oficina de patentes.

Hinton creía en la existencia real de un espacio tetradimensional y en la posibilidad de acceder a la cuarta dimensión, operación que para él suponía una suerte de elevación espiritual. Hinton acuñó el término teseracto. Si la extensión natural de un cuadrado de dos a tres dimensiones es el cubo, el teseracto sería la extensión natural del cubo de tres a cuatro dimensiones. Casi todos nos hemos visto en el colegio en la situación de tener que montar un cubo a partir de su desarrollo en dos dimensiones, es decir, a partir de una lámina recortable compuesta por seis cuadrados conectados entre sí. Una criatura de cuatro dimensiones se enfrentaría a una tarea semejante si le dieran un objeto tridimensional compuesto por ocho cubos conectados entre sí (figura 3). Al manipularlo a través de la cuarta dimensión, podría formar con él un teseracto.

Hinton otorgaba un carácter casi totémico al teseracto, ya que lo consideraba como un portal que daba acceso a la cuarta dimensión. Salvador Dalí explotaría su simbolismo en un sentido religioso. El desarrollo tridimensional del teseracto ocupa un lugar central en la composición de la crucifixión *Corpus Hypercubus*, que pintó en 1954. En ella, Cristo aparece suspendido frente a una cruz muy particular, formada por ocho bloques cúbicos. El octavo bloque, situado en posición frontal, se desmaterializa para dejar espacio al cuerpo de Cristo, que levita frente a una María Magdalena con los rasgos de la mujer de Dalí, Gala. Sobre un suelo ajedrezado, los cubos parecen proyectar una sombra que oscurece una cruz de baldosas, el desarrollo bidimensional de un cubo.

LOS MATEMÁTICOS FORMALIZARON CON TODO RIGOR LA NOCIÓN DE ESPACIOS DE DIMENSIONES ARBITRARIAS

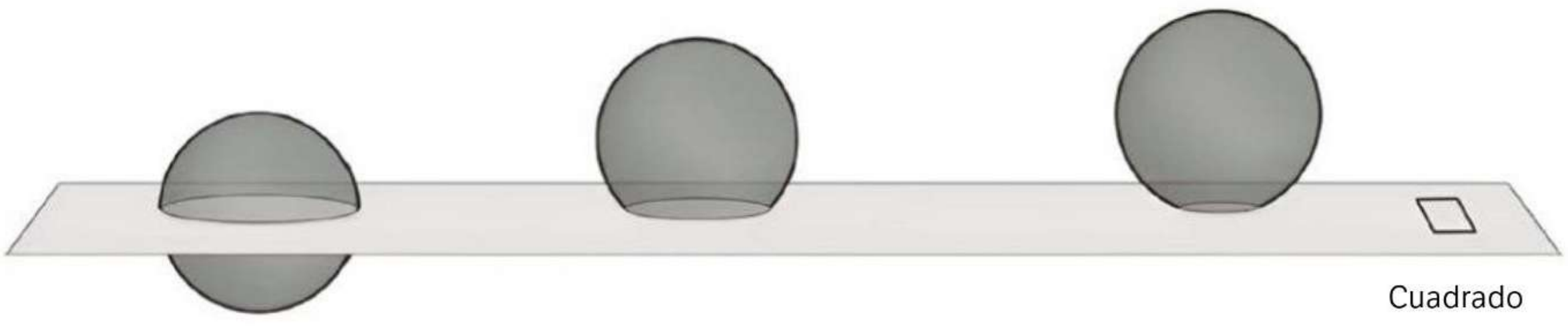


Figura 2. La esfera viajera abandona *Planilandia*. A medida que se aleja del plano en el que vive el cuadrado, su sección circular se va volviendo más pequeña hasta terminar desapareciendo.

Curiosamente, el mero acto de pintar con un estilo figurativo puede conducir al artista a meditar sobre la conexión entre dimensiones, sin necesidad de ninguna consideración física o matemática. La siguiente reflexión de Max Beckmann es un perfecto reflejo de las fantasías de Edwin Abbott y Charles Hinton: «De algo no hay duda: tenemos que transformar el mundo tridimensional de los objetos en el mundo bidimensional del lienzo [...]. Para mí, la experiencia de transformar tres dimensiones en dos está llena de magia. En ella vislumbro por un instante esa cuarta dimensión que anhelo con todo mi ser».

El carácter fantástico que Hinton otorgó al teseracto, su facultad de dar acceso a una dimensión superior —que podía limitarse al espacio o adquirir connotaciones místicas—, sedujo a otros creadores, tan dispares como Jorge Luis Borges, Alan Moore o Mircea Cărtărescu. Su poder simbólico ha llegado intacto hasta nuestros días. En *Interstellar* encontraremos precisamente un teseracto en el corazón de un agujero negro, para cumplir en la trama su función de portal interdimensional.

Borges mencionó a Hinton en infinidad de ocasiones y editó uno de sus libros: *Relatos científicos*. También es una referencia recurrente en las obras de Alan Moore, tanto en sus cómics como en su monumental novela *Jerusalem*. En una de las viñetas de *Providence*, su particular homenaje y reinterpretación del universo de Lovecraft, se muestra a un personaje que manipula ensimismado ocho cubos transparentes, empeñado en armar con ellos una estructura tetradimensional. La relación entre el teseracto y el terror gótico no es caprichosa. Lovecraft recurrió a la cuarta dimensión en sus veladas descripciones del horror absoluto que se agazapa tras nuestra ingenua interpretación de la realidad, para transmitir la impresión de un universo que se extiende mucho más allá del alcance de nuestra percepción y que, cuando no se manifiesta como abiertamente hostil, resulta ajeno por completo a la razón y los intereses de los seres humanos. En

EL ACTO DE PINTAR CON UN ESTILO FIGURATIVO PUEDE CONDUCIR A MEDITAR SOBRE LA CONEXIÓN ENTRE DIMENSIONES

muchos de sus relatos, se hace realidad la leyenda de los cubos de Hinton y el vislumbre de la cuarta dimensión conduce directamente a la locura.

En *Los sueños en la casa de la bruja*, Lovecraft llega a relacionar los ámbitos multidimensionales con el continuo espacio-temporal de la relatividad. Su protagonista, Walter Gilman, un joven que estudia matemáticas en la Universidad de Miskatonic, explora la posibilidad de acceder a otras dimensiones y, también, de que los moradores de esos dominios hagan incursiones en nuestro espacio. No sabemos si, de haberse establecido entonces la noción de agujero negro, Lovecraft hubiera utilizado uno como portal para facilitar el tránsito multidimensional. Quizá hubiera seguido optando por la brujería. O hubiera sido capaz de impregnar los agujeros negros de un poder mágico y antiguo. Es una operación que se ha llevado a cabo con éxito en ficciones más modernas, como la película *Horizonte final* o la serie *Dark*. En *Los sueños en la casa de la bruja*, el joven Gilman sitúa a Azathoth, símbolo del caos primordial y figura central del panteón de mitos de Cthulhu, en un vacío definitivo de vórtices negros en espiral. ¿Un agujero negro, quizá?

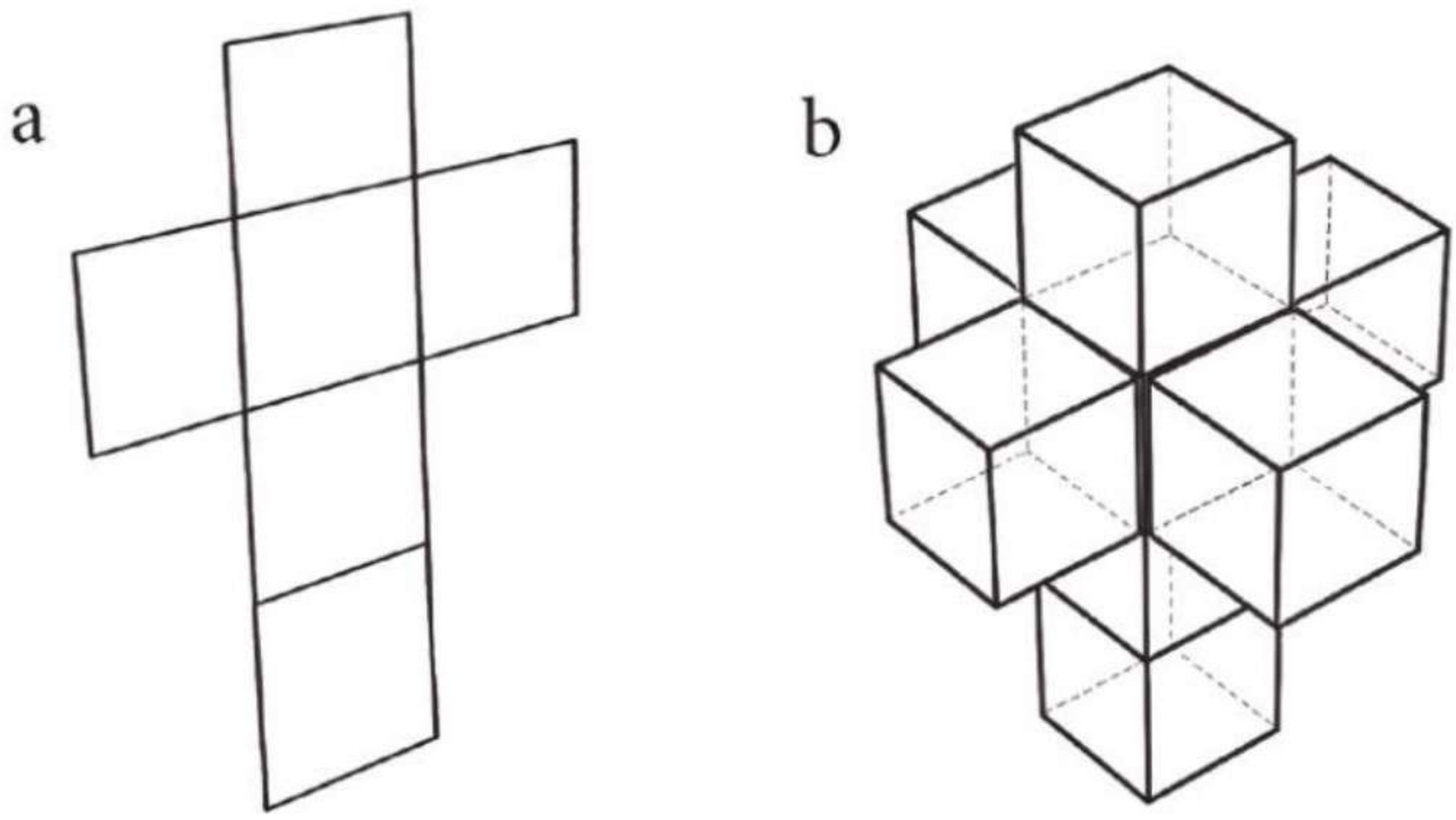


Figura 3. a) Desarrollo del cubo (en dos dimensiones). b) Desarrollo del teseracto (en tres dimensiones).

Como bien señalaron los primeros editores del relato, que se publicó en julio de 1933, en la revista *Weird Tales*, *Los sueños en la casa de la bruja* ofrece: «Una historia de matemáticas, brujería y la Noche de Walpurgis, en la que el horror se arrastra y crece». El cuento presenta una irresistible combinación de matemáticas y brujas de Salem. En sus páginas se habla de Einstein, Riemann y De Sitter, de la curvatura del espacio, de las geometrías no euclidianas, y se desgrana todo un rosario de referencias matemáticas y pseudomatemáticas, que Lovecraft entreteje hábilmente con el folclore, el pasado puritano y colonial de Estados Unidos, la nigromancia y su particular mitología de deidades cósmicas, las cuales podrían irradiar del centro irracional y aterrador de un agujero negro.

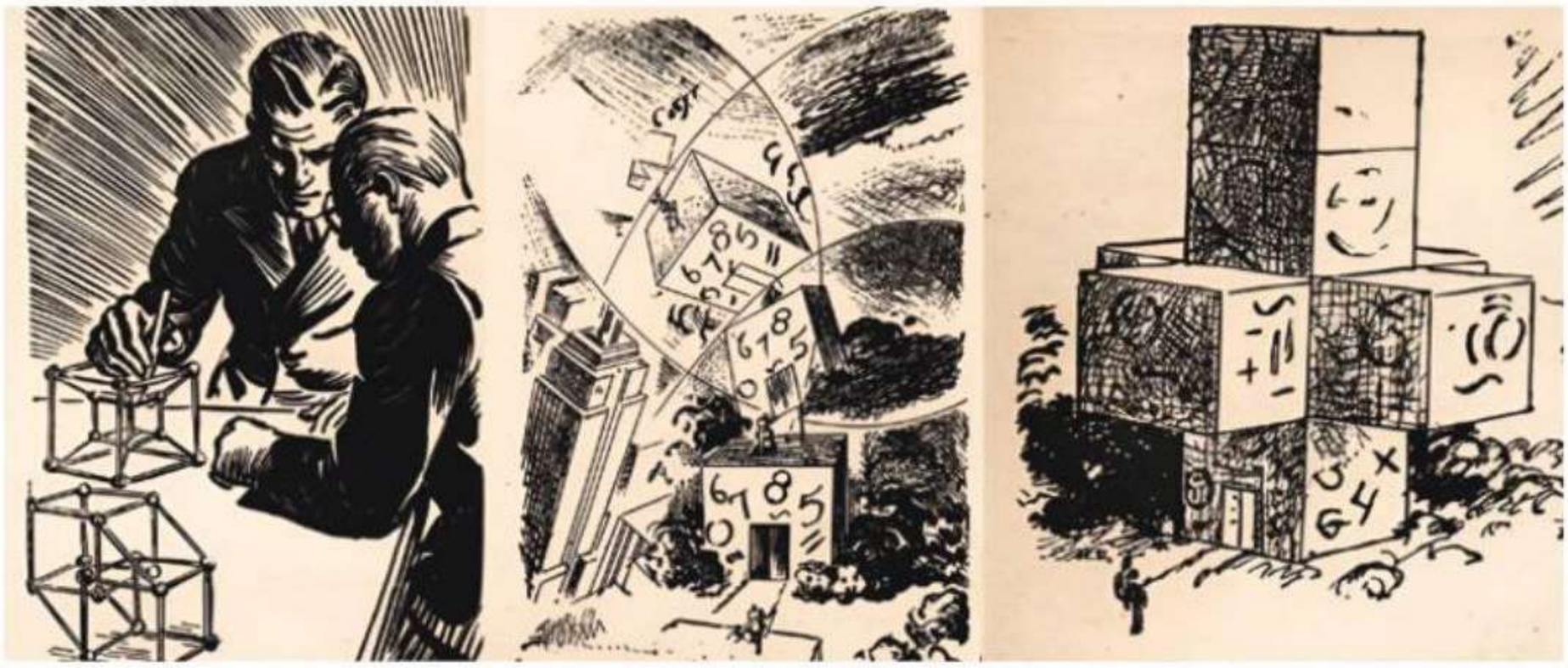
El espiritismo, una de las grandes modas decimonónicas, tampoco pasó por alto el potencial sobrenatural (y sobrecogedor) de la cuarta dimensión y recurrió a ella como una suerte de *backstage* del que podían salir toda clase de espectros y ectoplasmas. Allí era donde acudía a refugiarse el sufrido fantasma de los Canterville, en la novela corta de Oscar Wilde, para escapar de las travesuras con que lo atormentaban los niños de la familia estadounidense que había venido a arruinar la paz de su castillo encantado. La ciencia ficción trató de jugar al mismo juego bajo una apariencia más racional. En el fondo era un poco lo mismo. Las máquinas prodigiosas sustituían a las médiums, y las criaturas de otras dimensiones, a los fantasmas. La posibilidad de un ámbito al margen por completo de nuestros sentidos, aunque inmediato a nuestro espacio, que se volvía accesible gracias a la ciencia, obsesionó al estadounidense Miles John Breuer.

Breuer trabajaba como médico internista en el Hospital General de Lincoln en Nebraska y encontró en la cuarta dimensión un excelente refugio al que evadirse de las cuitas y zozobras de sus pacientes. Entregó a los *pulps* un puñado de aventuras, protagonizadas todas ellas por brillantes físicos y matemáticos, que entraban en escena con un breve monólogo trufado de palabrería pseudocientífica, perfectamente incomprensible, para justificar la existencia de la cuarta dimensión y la máquina que daba libre acceso a ella. En mitad de este abracadabra físico —«manipulación de tensores», «transformaciones paralelas», «integrales electromagnéticas»— no faltaban las alusiones a la relatividad. De hecho, uno de estos relatos se titulaba *El balancín de Einstein*. Uno de sus protagonistas se jactaba: «Bueno, este es el rollo de Einstein, solo que yo he ido más lejos que él». Y tanto.

En la más notable de estas historias, *La sección transversal capturada*, de 1929, Breuer a punto estaba de llenar de ecuaciones algebraicas su monólogo de justificación inicial. Lo que sucedía a continuación venía a ser una variación de la visita de la esfera a *Planilandia*, solo que en este caso el visitante era una criatura que se extendía a lo largo de cuatro dimensiones. Por tanto, surgía de la nada ante los estupefactos protagonistas, aumentaba y disminuía de tamaño a capricho y, finalmente, se desvanecía como por arte de magia. En torno a este juego dimensional, Breuer armaba una historia arquetípica. La criatura aprovechaba sus enigmáticas maniobras para, no se sabe muy bien por qué, arrinconar a Sheila, la novia del protagonista, y hacerla desaparecer. Para rescatarla, este debía sumergirse en una desafiante realidad tetradimensional. Es cierto que aquí Breuer caía en el manido cliché de la novia indefensa y en apuros propio de los *pulps*, pero, como atenuante, también proporcionaba a Sheila un currículum que desafiaba los estereotipos de la época: era matemática profesional y, según se nos dice, «había publicado un puñado de artículos originales».

Quizá la obra maestra de la ciencia ficción en lo que se refiere a espacios tetradimensionales sea la maravillosa *Y construyó una casa torcida*, que Robert Anson Heinlein escribió en 1941. Carl Sagan escogió este relato para mostrar el potencial de la ficción para divulgar aspectos de la ciencia que la mayoría de la gente desconoce: «Para mu-

LA OBRA MAESTRA DE LA CIENCIA FICCIÓN SOBRE ESPACIOS TETRADIMENSIONALES ES *Y CONSTRUYÓ UNA CASA TORCIDA*



ASC

Ilustraciones del relato Y *construyó una casa torcida* de Robert A. Heinlein de 1941 sobre el arquitecto Quintus Teal y su proyecto residencial hiperbólico.

chos lectores, supuso la primera introducción a la geometría en cuatro dimensiones con unas mínimas garantías de resultar comprensible». Heinlein tuvo además la gentileza de no mencionar en vano el nombre de Einstein y de no relacionar un ámbito de cuatro dimensiones espaciales con la relatividad. *Y construyó una casa torcida* arranca presentándonos a un peculiar arquitecto, Quintus Teal, que fantasea con la idea de construir una casa de ocho habitaciones, cuya estructura se ajuste al desarrollo tridimensional de un teseracto. Diseña, por tanto, un edificio integrado por ocho módulos cúbicos iguales, dispuestos en cruz. Se da la feliz casualidad de que la mujer de su amigo Homer Bailey está considerando la posibilidad de construir una casa nueva y Teal encuentra en la pareja a los inversores ideales para su excéntrico proyecto. La historia transcurre en Los Ángeles y, terminadas las obras, la noche antes de que Teal muestre la vivienda, la ciudad sufre un terremoto. El seísmo tendrá un efecto inesperado sobre la construcción, sacudiendo y desplazando los módulos cúbicos a través de una dimensión superior y plegándola en una configuración más estable, un teseracto.

Cuando Teal queda con los Bailey para enseñarles el flamante edificio, solo un módulo aparece a la vista. Teal se muestra tan estupefacto como los Bailey, que piensan que los ha estafado. Sin embargo, cuando entran en el módulo, nada les impide acceder al resto de las habitaciones. Aunque desde fuera solo distinguían un cubo, una vez dentro, la casa se presenta tal y como la diseñó Teal. A medida que recorren las habitaciones, sin embargo, suceden cosas muy extrañas. Cuando intentan acceder al mirador del tejado, las escaleras los conducen de vuelta al recibidor de la entrada. Las escaleras se han cerrado en un bucle. Al abrir la puerta principal, en lugar de salir a la calle, aparecen en otra de las habitaciones. Al perseguir a un desconocido, Teal descubre que está corriendo detrás de sí mismo. Cada una de las ventanas del estudio que ocupa el centro del teseracto se asoma a un paisaje diferente: una vista de Nueva York desde lo alto del Empire State, un desierto, un océano invertido... Descubren así que han quedado atrapados en una serie de pliegues tetradimensionales, igual que una criatura plana —como el cuadrado de *Planilandia*— quedaría encerrada en el recortable de un cubo si hiciéramos las dobleces correspondientes y lo cerráramos. Aunque la percepción de la cuarta dimensión quede fuera de su alcance, los módulos se han desplazado en ese ámbito superior. ■

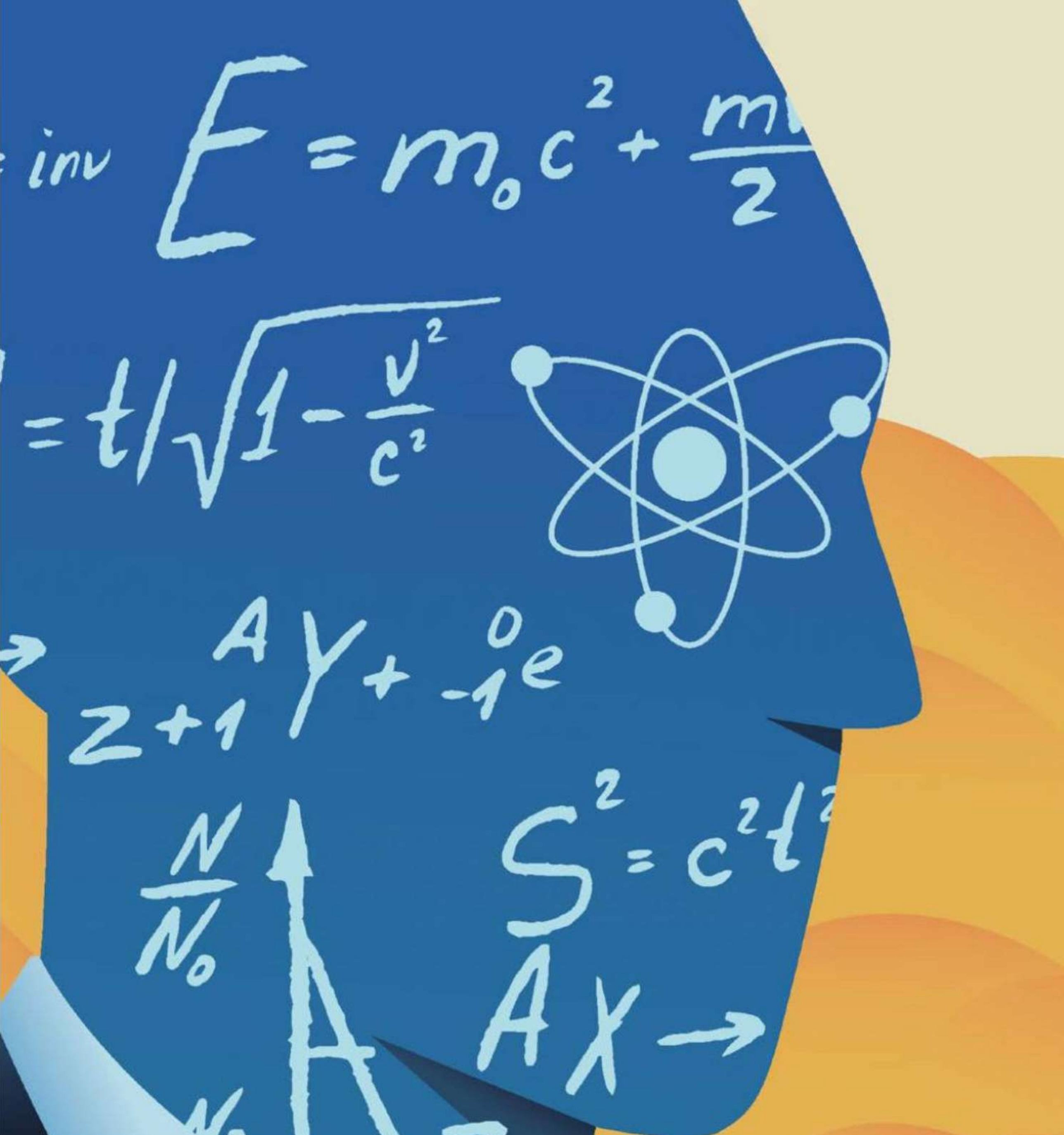


LA TEORÍA MÁS DIFÍCIL DEL MUNDO

ENLACE AL CANAL
x.com/byneontelegram
Ó escanea el código QR:

La formulación de lo que muchos consideran «La teoría más difícil del mundo» supuso un inmenso desafío matemático para Albert Einstein.

ISTOCK


inv
$E = m_0 c^2 + \frac{m}{2}$
$= t/\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$
$Z+1\ {}^{A}Y + {}^{0}_{-1}e$
$\frac{N}{N_0}$
$S^2 = c^2 t^2$
$AX \rightarrow$

La analogía de la lámina elástica que hemos venido manejando tiene la virtud de proporcionar un sentido intuitivo, casi inmediato, del mecanismo relativista de la gravedad, pero nos hurta un aspecto fundamental de la teoría: la extraordinaria dificultad de sus ecuaciones. Con frecuencia se le resistieron al propio Einstein, que las interpretó en un sentido y en su contrario, cambiando de opinión en más de una ocasión, defendiendo, por ejemplo, la existencia de ondas gravitatorias para combatirla años después. La relación fue tormentosa desde el principio, ya que Einstein tuvo que atravesar un verdadero calvario matemático para establecer la estructura formal de la teoría. Si finalmente lo consiguió, fue en gran medida gracias a la intervención providencial de un viejo amigo.

La amistad entre Albert Einstein y Marcel Grossmann se forjó a los dieciocho años, cuando ambos estaban estudiando en la Escuela Politécnica Federal de Zúrich. Einstein, con un temperamento más experimental, pronto empezó a saltarse las clases de matemáticas, con la tranquilidad de que, a la hora de preparar los exámenes, podía contar con los meticulosos y organizados apuntes que tomaba Grossmann. La divergencia en sus temperamentos e intereses marcaría sus respectivas trayectorias profesionales. Grossmann se haría matemático; Einstein, físico. Grossmann, un estudiante modélico y apreciado por sus profesores, desarrolló su carrera sin grandes contratiempos; Einstein se topó con un muro infranqueable al tratar de integrarse en el mundo académico, en gran medida por culpa de su carácter irreverente y poco convencional. Todas las solicitudes que envió para procurarse un puesto de ayudante en la universidad tras completar sus estudios fueron rechazadas o ignoradas. «Resulta realmente espantoso pensar en los obstáculos que estos viejos filisteos ponen en el camino de cualquier persona que no sea de su cuerda —se quejaba en diciembre de 1901—. Esta gente considera instintivamente a cualquier joven inteligente como una amenaza a su podrida dignidad».



ASC

Marcel Grossmann (a la izquierda) junto a su amigo y colega Albert Einstein (a la derecha) durante sus años de juventud.

EINSTEIN SE SALTABA LAS CLASES DE MATEMÁTICAS, YA QUE PODÍA CONTAR CON LOS APUNTES QUE TOMABA GROSSMANN

Fueron años de incertidumbre y precariedad, en los que Einstein vivió a salto de mata, hasta que Grossmann acudió al rescate y, con la mediación de su padre, le consiguió un puesto en la Oficina de Patentes de Berna. A cambio de un sueldo modesto, Einstein dispuso del tiempo libre y la paz mental y económica que necesitaba para organizar sus ideas. La estabilidad trajo consigo un estallido de creatividad como pocos se han visto en la historia de la ciencia. En 1905, con veintiséis años, Einstein publicó cuatro artículos en la revista *Annalen der Physik*. El primero interpretaría un papel capital en el desarrollo de la mecánica cuántica, refutando a Christiaan Huygens y Thomas Young, y estableciendo la naturaleza corpuscular de la luz. Los dos últimos sentarían las bases de la relatividad especial, incluyendo la famosa equivalencia entre masa y energía, que más adelante se expresaría en la celebérrima ecuación $E = mc^2$. La física cambió para siempre y, con ella, la suerte de Einstein.

Si la ayuda material de Grossmann había resultado providencial para la creación de la teoría de la relatividad especial, su asistencia intelectual se mostraría decisiva para el desarrollo de la relatividad general, una década después. Einstein había tenido una serie de intuiciones deslumbrantes sobre cómo integrar la gravedad dentro del marco conceptual de los postulados relativistas, pero no terminaba de dar con el lenguaje adecuado para expresarlas matemáticamente. Fue Grossmann quien le proporcionó ese lenguaje: el llamado cálculo tensorial, que prácticamente acababan de establecer dos matemáticos italianos, Gregorio Ricci-Curbastro y su alumno Tullio Levi-Civita.

Entre 1912 y 1914, los dos amigos buscaron el modo de combinar las ideas vanguardistas de Einstein sobre la gravedad con las innovadoras ideas tensoriales de Ricci y Levi-Civita, tratando de obrar una difícil alquimia entre física y geometría diferencial. No lograron establecer las ecuaciones definitivas de la nueva teoría de la gravitación, pero, gracias a Grossmann, Einstein descubrió y aprendió el manejo de las herramientas matemáticas necesarias para hacerlo. Juntos publicaron, en 1913, «Esbozo de una teoría de la relatividad generalizada y de una teoría de la gravitación», que puede considerarse como el primer artículo sobre la teoría de la relatividad general. No sería hasta dos años más tarde, sin embargo, cuando Einstein, ya en solitario, instalado en Berlín, conseguiría armar por fin una teoría operativa. Hizo públicas sus ecuaciones fundamentales el 25 de noviembre de 1915 en la Academia Prusiana de las Ciencias. No se trata de las mismas ecuaciones que encontramos en el «Esbozo», pero están expresadas en el lenguaje tensorial que Einstein había aprendido de Grossmann.

La estructura matemática de la relatividad general descansa sobre un conjunto de diez ecuaciones. Estas ecuaciones no son independientes, sino que están acopladas. ¿Qué significa esto? Que lo que sucede en cualquiera de ellas repercute en lo que ocurre en las demás. Para terminar de complicar las cosas, se trata de ecuaciones diferenciales. Es decir, en su solución asoman integrales, un artefacto matemático que se puede entender como una generalización del cálculo de áreas y que figura entre las pesadillas recurrentes de cualquier estudiante de matemáticas en bachillerato o la universidad.

Si traducimos la jerga intimidante del cálculo tensorial a un lenguaje más de andar por casa, podemos decir que las ecuaciones de la relatividad general muestran que la gravedad no es más que una manifestación de cómo cambian las propiedades del espacio-tiempo de un punto a otro. ¿Y por qué cambian? Debido a la presencia de masa y energía. Si examinamos las ecuaciones, observamos diferencias sustanciales a derecha e izquierda del símbolo de igualdad. A la izquierda encontramos básicamente geometría —una descripción de qué forma particular adopta el espacio-tiempo en la región que estemos considerando— y, a la derecha, física —una descripción de cómo se distribuye la materia y la energía en dicha región. La igualdad promueve una constante retroalimentación entre física y geometría. La distribución de materia y energía determina la forma del espacio-tiempo, y viceversa, la forma del espacio-tiempo condiciona cómo es la distribución de materia y energía. El físico John Wheeler, uno de los grandes protagonistas del próximo capítulo, expresó así esta dinámica: «El espacio le dice a la materia cómo debe moverse, y la materia le dice al espacio cómo debe curvarse».

AUGE Y CAÍDA DE KARL SCHWARZSCHILD

Las ecuaciones de Einstein permiten modelizar infinidad de regiones del espacio-tiempo, hasta universos enteros. En principio, basta con introducir en ellas la información de dónde se encuentra cada masa o fracción de energía, e indicar qué andan haciendo en un instante determinado (con qué velocidad se están moviendo), para que nos devuelvan una imagen exacta del espacio-tiempo correspondiente y nos muestren cómo va a evolucionar a continuación. En la práctica, las ecuaciones son extremadamente difíciles de resolver. Hasta el punto de que resulta casi imposible visualizar cómo se curva el espacio-tiempo en torno a la distribución de materia más sencilla que uno pueda imaginar. Los físicos necesitaron tiempo para familiarizarse con la teoría y aprender a interpretar, aunque solo fuera parcialmente, sus vaticinios. La información estaba ahí, sin duda. Solo que estaba cifrada en unas fórmulas que demandaban una tecnología matemática de desencriptación tan sofisticada que aún hoy está lejos de haberse desarrollado por completo. En los albores del siglo XX, en la época heroica en la que los físicos ni siquiera contaban con la ayuda de ordenadores, la situación era crítica. Tras el deslumbramiento inicial, la relatividad general se fue apagando hasta sumirse en su particular Edad Media. Un largo invierno en el que el conocimiento quedó estancado y los investigadores se desanimaron y perdieron interés por la teoría, mudándose a otros campos de la física más fáciles de labrar.

Esta indefinición afectó a todos los habitantes del universo relativista y aquí los agujeros negros no fueron una excepción. Durante décadas, no quedó nada claro que el espacio-tiempo pudiera adoptar las contorsiones extremas que exige la formación de una singularidad o un horizonte de sucesos. Incluso el escenario más fa-

SCHWARZSCHILD FUE UN JOVEN PRODIGIO. CON SOLO DIECISÉIS AÑOS, CONSIGUIÓ QUE LE PUBLICARAN SU PRIMER ARTÍCULO



AIP EMILIO SEGR`E VISUAL ARCHIVES.

Karl Schwarzschild trabajando en su estudio de Potsdam, Alemania. En 1915, mientras servía en el frente de la Primera Guerra Mundial, resolvió las ecuaciones de Einstein.

vorable, que la teoría admitiera la existencia de agujeros negros, no garantizaba en absoluto que se dieran en la naturaleza. Los esfuerzos por entender cabalmente qué diablos decían las ecuaciones al respecto dieron pie a toda clase de malentendidos, iluminaciones, prejuicios, errores, titubeos y desencuentros. En el fragor de las polémicas, los agujeros negros tan pronto se reivindicaban como eran vilipendiados.

El primer paso por esta accidentada senda lo dio Karl Schwarzschild, honor que le correspondería por méritos propios y por la señal que el destino quiso poner en su nombre. En alemán, Schwarzschild es una palabra compuesta, formada por la unión de Schwarz, «negro», y Schild, «escudo». El escudo remite a la barrera infranqueable del horizonte de sucesos y el adjetivo que lo acompaña, schwarz, sume la barrera en esa completa oscuridad que quedaría asociada para siempre con los agujeros negros. En suma, el nombre como emblema, una perfecta premonición etimológica y conceptual.

Schwarzschild fue un joven prodigio. Con solo dieciséis años, consiguió que le publicaran su primer artículo, sobre la determinación de órbitas planetarias, nada menos que en las *Astronomische Nachrichten*, la revista decana de la astronomía. En su familia el artículo pasó de mano en mano y se leyó con orgullo infinidad de veces, aunque, como reconocería su hermano Albert años después: «ninguno llegamos a entender una palabra». Completados sus estudios de secundaria, Schwarzschild dio a conocer su intención de estudiar astronomía, para desmayo de sus profesores, convencidos de que ese era el mejor modo de arrojar por un desagüe todo su talento. «Por Dios, ¿pero qué clase de trabajo es ese?», se escandalizaría un amigo de su padre. Inasequible al desaliento, Schwarzschild se convirtió en un sólido investigador, de la estirpe de Dicke, capaz de manejarse con igual maestría en el ámbito teórico y en el experimental. En este último campo fue un pionero en el uso de la fotografía como herramienta para medir la cantidad de luz que recibimos de las estrellas.

LA PASIÓN POR LA ASTRONOMÍA DE SCHWARZSCHILD SOLO PUDO IGUALARLA SU AMOR POR ALEMANIA

Schwarzschild pasó los años más felices de su vida en la Universidad de Gotinga, donde se había consolidado uno de los centros de investigación en física matemática más influyentes del mundo. Allí coincidiría con tres matemáticos que hicieron contribuciones extraordinarias a la relatividad, tanto general como especial: David Hilbert, Hermann Minkowski y Emmy Noether, por entonces todavía una estudiante.

La pasión por la astronomía de Schwarzschild solo pudo igualarla su amor por Alemania, amor que tuvo ocasión de poner a prueba después de que el 28 de junio de 1914 un joven se apostara en la esquina de una calle de Sarajevo y abriera fuego contra el heredero al trono del imperio austrohúngaro. El asesinato del archiduque Francisco Fernando proporcionaría a Austria-Hungría la coartada que llevaba años buscando para declararle la guerra a los serbios. Las demás potencias europeas, ungida cada una por sus propias razones, se apuntaron a la contienda con la convicción de que tendría una rápida y favorable resolución. Se ponía así en marcha la Primera Guerra Mundial. Schwarzschild, en principio, no estaba invitado a participar en el fragor bélico, puesto que ya había cumplido cuarenta años y ocupaba el puesto más prestigioso al que podía aspirar un astrónomo en Alemania —era director del Observatorio de Potsdam—, pero quiso marchar como voluntario al frente.

Schwarzschild pasó por diversos teatros de operaciones, sirviendo en Bélgica y Francia. Finalmente, se incorporó al cuerpo de artillería en el frente ruso. Como ejercicio patriótico, la resolución de problemas de balística resultaba sin duda gratificante. Como ejercicio matemático, para un hombre de sus capacidades, constituía una invitación al más mortal de los aburrimientos. Así las cosas, entre que intentaba evitar los obuses que arrojaban los rusos y que hacía todo lo posible para que acertaran los que lanzaban los alemanes, llegó a manos de Schwarzschild un ejemplar de las Actas de la Academia Prusiana de las Ciencias, publicado en noviembre de 1915. Allí encontró la exposición de Einstein de su teoría de la relatividad general. Su lectura le proporcionó una evasión efímera, pero completa, de las penurias del invierno en las trincheras. Aquellas páginas sí que encerraban desafíos matemáticos estimulantes. Un mes después de haber expuesto por primera vez en público su teoría terminada, Einstein recibió una carta inesperada del frente ruso. En parte, se trataba de una carta científica y, en parte, de una carta de agradecimiento. En ella, Schwarzschild le ofrecía la primera solución exacta a las ecuaciones de la relatividad general y se despedía: «A pesar del intenso fuego de artillería, la guerra ha tenido la gentileza de permitir que me evadiera y que pudiera dar este paseo por la tierra de sus ideas». Einstein respondió a Schwarzschild con entusiasmo: «Nunca pensé que el tratamiento estricto del problema de una masa puntual fuera tan simple». Con los años tendría ocasión de desdecirse, ya que la aparente simplicidad de la solución de Schwarzschild escondía cargas de profundidad que lo importunarían durante el resto de su vida.

Lo cierto es que, después de haber conseguido en apariencia lo más difícil, establecer las ecuaciones de la relatividad general, Einstein fue incapaz de extraer de ellas ninguna solución exacta. Jugó con las expresiones matemáticas, las interrogó y obtuvo respuestas parciales, pero en todos los casos trabajó con aproximaciones, que le bastaron para obtener tres resultados fundamentales. Por un lado, el complejo sistema de ecuaciones de la relatividad se reducía a la fórmula newtoniana en aquellos contextos familiares —gravedad débil y velocidades modestas— en los que la vieja teoría había probado con creces su eficacia. A la hora de lanzar proyectiles o estudiar la órbita de la Luna, uno podía seguir confiando en las recetas clásicas. Las correcciones que introducía la relatividad en esas situaciones eran tan sutiles que, a efectos prácticos, resultaban inapreciables. Einstein encontró además que sus nuevas ecuaciones discrepaban de las newtonianas en un escenario con una gravedad razonablemente intensa, como era la órbita de Mercurio, el planeta más próximo al Sol y, por tanto, el más expuesto a los influjos de su masa.

De acuerdo con las ecuaciones newtonianas, Mercurio debía describir una elipse cerrada alrededor del Sol. Sin embargo, con el curso de los siglos, el planeta no repasa una y otra vez la misma trayectoria. Antes de completar una vuelta, la orientación de la órbita cambia ligeramente, de modo que la elipse va rotando muy despacio alrededor del Sol, como si fuera dibujando los pétalos de una flor (figura 1). La ley de gravitación universal es incapaz de explicar esta lenta deriva, que sin embargo surge con naturalidad de los cálculos relativistas. En una carta a su amigo Paul Ehrenfest, Einstein confesó que al descubrirlo estuvo «fuera de sí de alegría y excitación durante días».

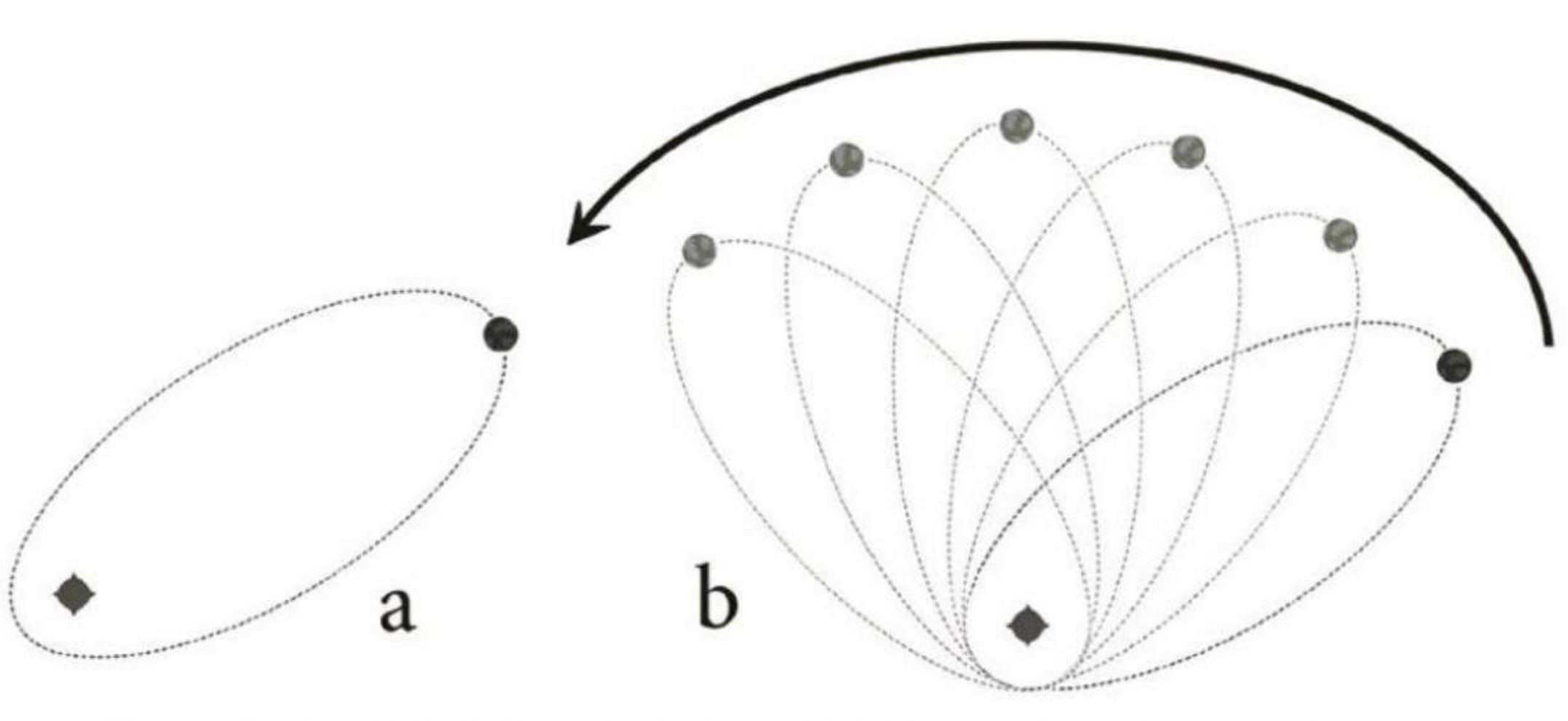
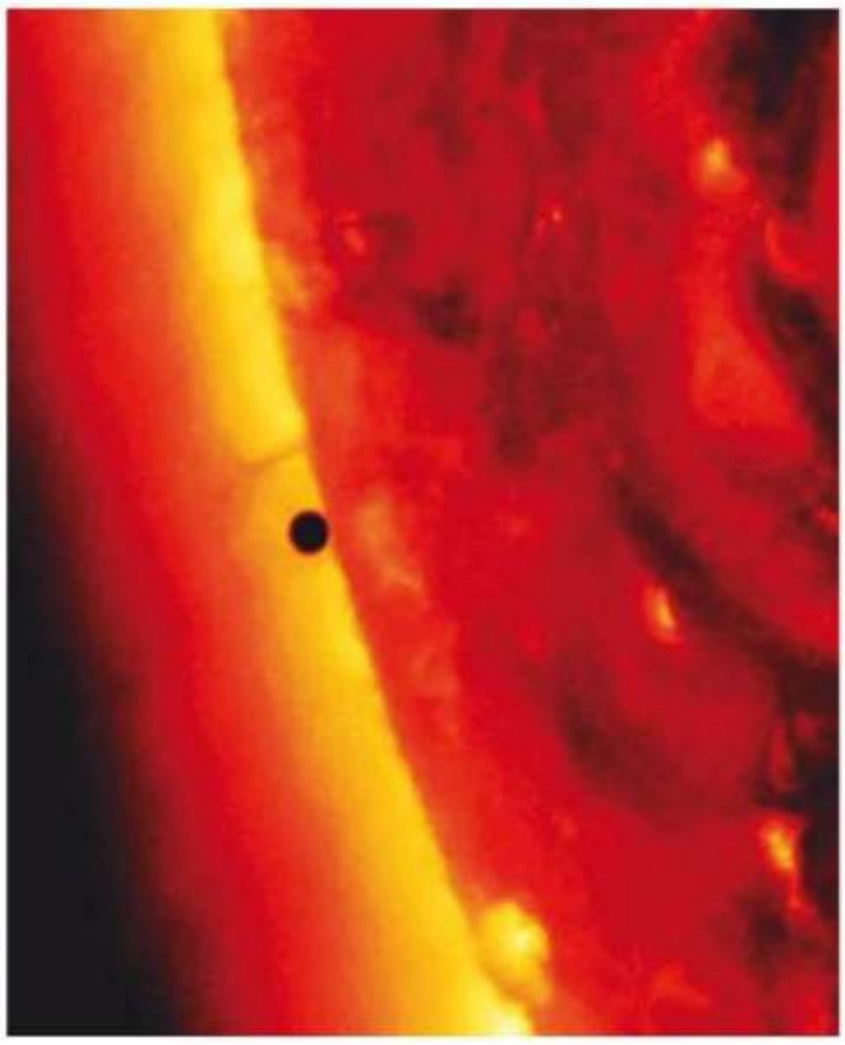


Figura 1. En a), la órbita de Mercurio alrededor del Sol de acuerdo con las leyes de Newton. En b), el movimiento real, que coincide con la descripción de la relatividad general.

Einstein retomó la vieja idea de Michell y Laplace de considerar la relación entre la luz y la gravedad, en este caso bajo las premisas de su nueva teoría. A partir de sus ecuaciones obtuvo una tercera solución aproximada con la que calculó el grado de desviación de la luz procedente de estrellas lejanas provocada por la masa del Sol. El resultado coincidía de manera espectacular con el que se deducía de las placas fotográficas tomadas durante el eclipse solar total de 1919.

Tras este trabajo de prospección de Einstein, el logro de Schwarzschild consistió en abandonar el terreno de las aproximaciones y poner encima de la mesa una primera solución exacta. Es decir, obtuvo una descripción completa de cómo sería el espacio-tiempo relativista en una situación determinada, casi la más sencilla que cabía imaginar. ¿Cómo se deformaría el tejido del espacio-tiempo ante la presencia de una sola masa? Podría tratarse de una estrella o de un planeta. En cualquier caso, sería un cuerpo solitario, el único habitante de un universo ideal. A pesar de no introducir más actores en la función, las matemáticas que describían este universo de juguete, casi trivial, eran complicadas.



NASA/ SDO

Tránsito de Mercurio frente al Sol, un fenómeno astronómico ideal para poner a prueba las teorías de la gravedad.

Schwarzschild publicó dos artículos. En un primer asalto, trató de averiguar qué clase de espacio-tiempo surgiría en torno a una masa puntual, cuya situación no cambiase con el paso del tiempo. Su propósito era ofrecer una solución exacta al problema de la trayectoria de Mercurio, que Einstein solo había resuelto de manera aproximada. En este cometido, obtuvo un éxito rotundo: «Resulta maravilloso que la explicación de la anomalía de Mercurio surja de manera tan convincente a partir de una idea tan abstracta».

En su segundo artículo, exploró un caso muy parecido, pero algo más realista. Infló la masa puntual hasta darle un volumen, transformándola en una esfera homogénea, compuesta por un líquido incompresible. Se trataba de un esfuerzo muy elemental de modelizar una estrella, dotándola de una cierta estructura. En este caso, Schwarzschild estudió el espacio-tiempo tanto en el exterior como en el interior de la esfera.

Sus soluciones, irreprochables desde un punto de vista matemático, ofrecían algunas predicciones difíciles de conciliar con una imagen realista de la naturaleza. En jerga matemática, presentaban singularidades. Las ecuaciones que describen fenómenos físicos están protagonizadas por magnitudes como la temperatura, la velocidad, la presión, que admiten toda clase de valores: veintitrés grados centígrados, setenta kilómetros por hora, una atmósfera y media... cualquier número resulta válido siempre y cuando sea finito. Es decir, no resulta aceptable que una teoría sostenga que, en una determinada circunstancia, un cuerpo terminará adquiriendo una velocidad infinita, o que un gas ejercerá una presión infinita, o que un horno alcanzará una temperatura infinita. Con todo, las ecuaciones a veces arrojan esos valores. Como ninguna medida ha dejado constancia, de momento, de que en efecto haya magnitudes infinitas en el universo, los físicos suelen interpretar su aparición en una teoría en el mismo sentido que los informáticos entienden la apertura de una ventana con la advertencia de «error fatal». El programa, la teoría, han fallado. Las singularidades son advertencias

de que el formalismo que predice su existencia se ha aventurado en una región que cae fuera de su jurisdicción. Transmiten un claro mensaje de claudicación: «no puedo ofrecerte una buena descripción de lo que aquí sucede».

Las singularidades de la solución de Schwarzschild eran puntos donde la hondonada del espacio-tiempo adquiría una curvatura infinita. Las ecuaciones arrojaban predicciones absolutamente razonables en el resto de puntos del espacio. ¿Cómo de grave era la aparición de estas anomalías indeseables? De entrada, no hay que perder de vista que las teorías que construimos plantean forzosamente simplificaciones de una realidad extremadamente compleja. En este sentido, las singularidades surgían en unas ecuaciones que consideraban al Sol como una esfera perfecta y de densidad uniforme. Cabía esperar que los infinitos desaparecieran en ecuaciones mucho más complejas que describieran la dinámica de la estrella teniendo en cuenta todos los fenómenos que ocurren en su interior. De nuevo, las singularidades simplemente estaban señalando limitaciones en la representación matemática de la naturaleza. Una descripción fidedigna de la realidad debía aportar a la fuerza más detalles, debía incorporar más estructura. Si en lugar de caracterizar la masa de la estrella como una bola de materia uniforme y continua, lo hiciéramos a través de un modelo que contemplara cuatrillones y cuatrillones de átomos interactuando —no solo a través de la gravedad, sino también de otras interacciones, como el electromagnetismo— era de esperar que los infinitos desaparecieran.

Con esto en mente, que la solución de Schwarzschild presentara una singularidad justo en el centro de la masa, no provocó ningún alzamiento de ceja. A fin de cuentas, sus ecuaciones estaban representando la materia de la estrella de una manera muy simplificada, que obviaba cualquier estructura interna. Además, esta singularidad se presentaba en una localización físicamente inaccesible. ¿Quién iba a abrirse camino a través de la materia de la estrella hasta tocar su centro? Pocos se quejaron de disponer de un oráculo que hacía infinitas predicciones y solo fallaba una vez, además, en una situación en la que presumiblemente nadie se iba a encontrar jamás. Pero la solución de Schwarzschild albergaba una segunda singularidad, de naturaleza más desafiante, que mantuvo en jaque a los físicos durante cuarenta años.

Para neutralizar su amenaza, lo que se hizo en primera instancia fue ponerle una etiqueta —«singularidad de Schwarzschild»— para, acto seguido, barrerla debajo de la alfombra y prestarle la menor atención posible. Esta segunda singularidad implicaba que la forma del espacio-tiempo se desquiciaba por completo a una determinada distancia del centro de la estrella. Allí colapsaba su dimensión temporal y una de las dimensiones espaciales adquiría una curvatura infinita, causando un desgarro en el tejido espacio-temporal. Este comportamiento patológico tenía lugar a una cierta distancia del centro, en todas las direcciones, lo que terminaba por dibujar la superficie de una esfera. El radio de esa esfera, la distancia crítica, recibió el nombre de «radio de Schwarzschild».

¿CÓMO SE DEFORMARÍA EL TEJIDO DEL ESPACIO-TIEMPO ANTE LA PRESENCIA DE UNA SOLA MASA?

Curiosamente, este radio parecía ser siempre más pequeño que el radio de la estrella. Es decir, si uno imaginaba masas con densidades similares a la del Sol, la superficie patológica quedaba encerrada siempre en su interior, ese interior cuya representación realista exigiría un tratamiento físico y matemático más sofisticado que, era de esperar, rompería el encantamiento de la singularidad. Para que la superficie patológica asomara fuera de la estrella, había que aumentar drásticamente su densidad, haciendo que alcanzara valores que se antojaban absurdos y que ningún científico había observado en la naturaleza (figura 2). El propio Schwarzschild realizó el cálculo con el Sol y, para que la singularidad expusiera sus vergüenzas fuera de nuestra estrella, esta tendría que experimentar una reducción drástica de tamaño y embutir toda su masa —nada más y nada menos que dos billones de trillones de kilogramos— dentro de una esfera con un radio menor de tres kilómetros. Sería como embutir toda la masa del Sol dentro de un asteroide. Schwarzschild también calculó qué presión interna tendría que ejercer esta versión ultracomprimida del Sol para mantenerse estable y encontró que tendría que ser infinita en el centro de la estrella. En ese punto, dejó caer el lápiz y respiró aliviado. Era ridículo suponer que la materia pudiera ejercer una presión infinita, así que estas estrellas, con la singularidad a la vista, quedaban desterradas del universo. Jamás se podrían formar. De algún modo, esta fue la primera vez que alguien renegó en público de los agujeros negros relativistas, justo cuando hubiera podido firmar su certificado de nacimiento.

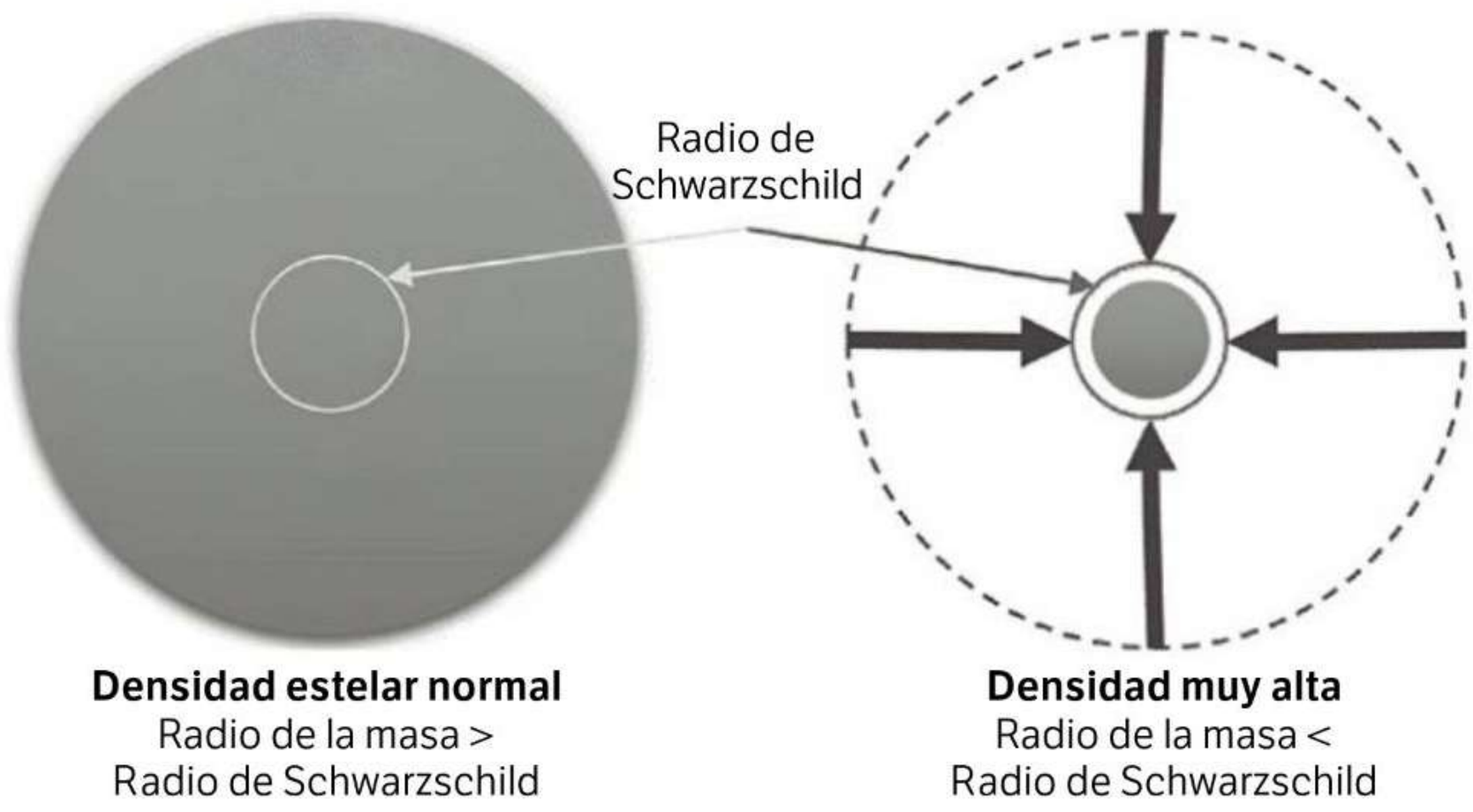


Figura 2. La superficie patológica de Schwarzschild queda escondida en el interior de la estrella o asoma al exterior en función de cuál sea la densidad de la masa.

El trabajo de Schwarzschild en relatividad general fue un fogonazo, una deslumbrante estrella fugaz que iluminó el cielo nocturno un instante antes de sumirlo de nuevo en la oscuridad. Es verdad que la suerte mantuvo a Schwarzschild a salvo del fuego enemigo, pero guardaba para él un destino igualmente aciago. No lo mataría una bala rusa, ni un obús, sino una enigmática enfermedad. Durante su estancia en las trincheras, Schwarzschild advirtió con preocupación cómo la boca se le empezaba a llenar de ampollas dolorosas. Eran los primeros síntomas del pénfigo, una enfermedad de la piel autoinmune, entonces fatal. Las ampollas no tar-

SCHWARZSCHILD TENDRÍA TIEMPO DE COMPLETAR UN ARTÍCULO SOBRE MECÁNICA CUÁNTICA ANTES DE MORIR

daron en extenderse al resto de la piel y las mucosas, y en convertirse en llagas. En marzo de 1916, Schwarzschild recibió la baja médica y se le concedió permiso para regresar a Alemania. Su curiosidad no se doblegó ante su rápido deterioro físico ni ante los fuertes dolores que lo hostigaban. Aún tendría tiempo de completar un artículo sobre mecánica cuántica antes de morir, en un hospital de Potsdam. El artículo vería la luz justo el día de su muerte, el 11 de mayo de 1916. Un mes después, el propio Einstein informaba del fallecimiento de Schwarzschild ante la Academia Prusiana de las Ciencias. En sus palabras de homenaje, encontramos una frase que pudo sonar entonces a fórmula protocolaria, pero que resultaría presciente: «Su obra rendirá sus frutos y ejercerá una influencia duradera en la ciencia, a la que consagró todas sus fuerzas». Daba la impresión de que Schwarzschild había firmado una suerte de pacto fáustico al alistarse. En las mismas trincheras en las que se desarrolló la enfermedad que lo conduciría a la muerte, encontraría la inspiración del trabajo que lo haría pasar a la historia de la ciencia.

La singularidad de Schwarzschild se puede entender como una bomba de acción retardada, oculta en la solución más sencilla de las ecuaciones de la relatividad general. Una bomba que permanecería latente durante décadas antes de estallar. Un cúmulo de reticencias ralentizaría la deflagración, pero una avalancha de enigmas teóricos y experimentales terminaría desbocando ese freno. Igual que sucede cuando uno cruza el horizonte de sucesos, sin que nadie lo advirtiera, se había iniciado ya un camino sin retorno.

MUERTE Y DERROTA DE LAS ESTRELLAS

Para que los problemas que escondía el espacio-tiempo de Schwarzschild se exhibieran en toda su crudeza, había que concentrar la masa de una esfera en volúmenes muy reducidos, hasta forzarla a adoptar densidades inconcebibles. Sin embargo, la irrupción de la mecánica cuántica iría dinamitando una a una las trabas para admitir estos estados tan extremos de la materia. De hecho, acabaría por volverlos inevitables. El campo en el que terminarían adquiriendo carta de naturaleza estas presuntas anomalías fue el estudio de la dinámica y la evolución de las estrellas.

A comienzos del siglo XX, hacía falta contratar una compañía de actores bastante reducida para representar el drama cósmico. En el cielo uno podía encontrar estrellas, planetas, asteroides, satélites, nebulosas, cometas y pare usted de contar. De vez en cuando, alguna estrella explotaba y desaparecía. En principio, y mientras no se demostrara lo contrario, no había más galaxias que la Vía Láctea. Con la mejora progresiva de los métodos observacionales, las imágenes que se obtenían del universo fueron ganando resolución y empezaron a registrarse fenómenos enigmáticos que no se podían imputar a los actores conocidos. El bestiario estelar tuvo que ampliarse. Ya a finales del siglo XIX se habían detectado estrellas que poseían una masa muy parecida a la del Sol, pero que emitían mucha menos

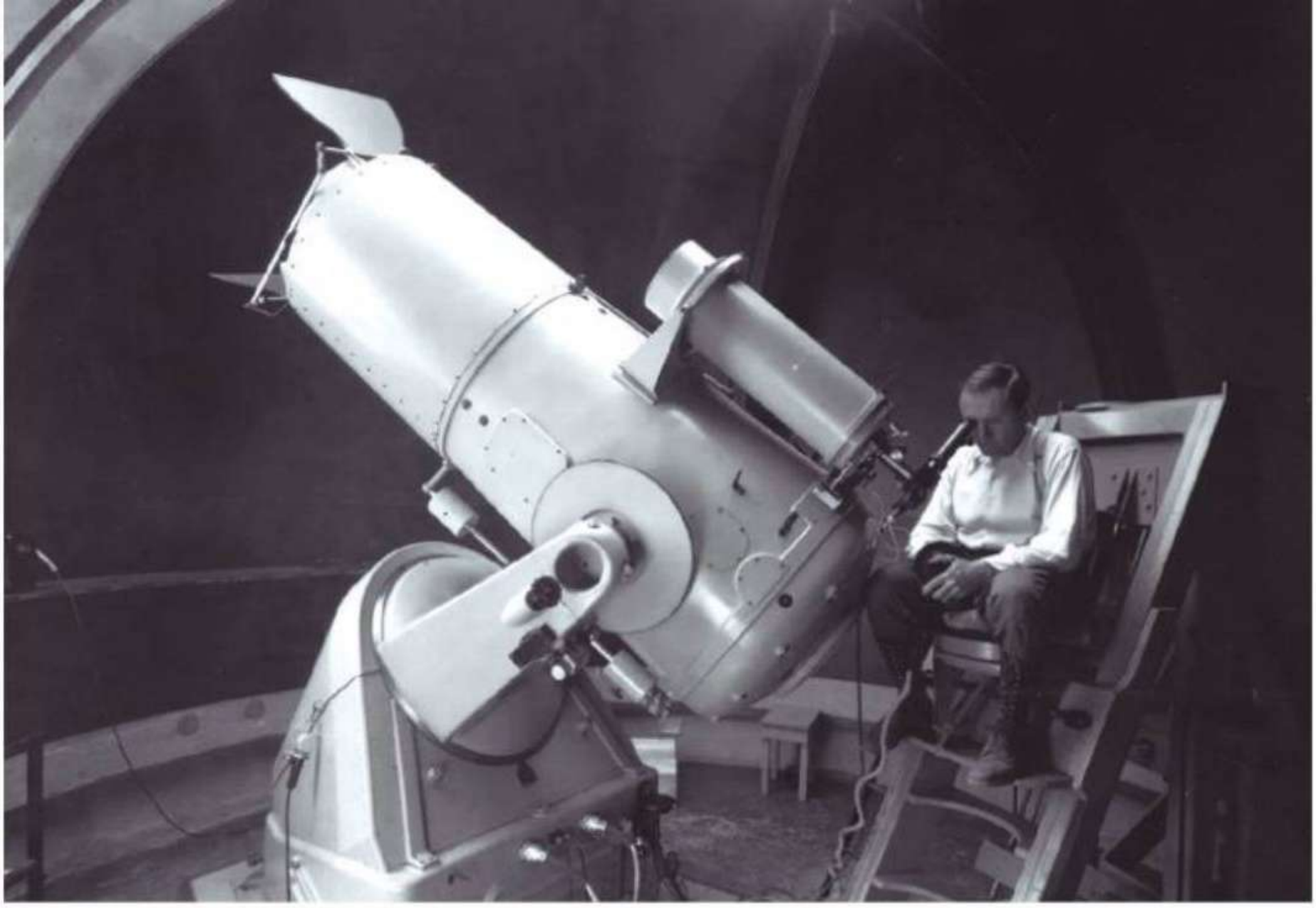
luz. ¿Acaso tenían una temperatura superficial más baja? De ser así, tendrían que emitir más luz roja, cosa que no hacían. ¿Disponían entonces de una superficie radiante mucho menor? En ese caso, una menor superficie entrañaba un volumen más pequeño, lo que, unido a la misma masa, suponía una mayor densidad. ¿Existían entonces estrellas mucho más densas que el Sol? A lo largo de las décadas de 1910 y 1920, se fueron acumulando evidencias a favor de esta hipótesis. Habían nacido las enanas blancas, estrellas que podían albergar una masa comparable a la del Sol dentro del volumen de la Tierra.

Una vez incorporadas al catálogo de criaturas estelares, cabía preguntarse de dónde salían y, ya puestos, plantearse otra cuestión casi más intrigante: si las enanas blancas eran más densas que las estrellas normales, ¿quedaba margen en la naturaleza para estrellas aún más densas? En 1932 se descubrió un segundo componente del núcleo de los átomos, el neutrón, y, de inmediato, los físicos introdujeron el nuevo ingrediente en sus especulaciones astronómicas. Uno de los primeros en hacerlo fue también una de las personalidades más singulares dentro de un ámbito, el de la física teórica, que no suele escatimar a la hora de producir personalidades singulares. Llama la atención todas las ideas innovadoras que llegó a anticipar Fritz Zwicky, como la materia oscura, el origen de los rayos cósmicos, el comportamiento de las galaxias como lentes gravitacionales o las estrellas de neutrones. Con semejante palmarés, hubiera merecido un reconocimiento mucho más amplio del que obtuvo en vida, pero su originalidad traía aparejada ciertos defectos del carácter que empañaron su imagen. Por un lado, su creatividad no conocía límites y disparaba ocurrencias sin parar, algunas de ellas decididamente extravagantes, lo que requería de una cierta paciencia por parte de sus colegas para separar la paja del trigo. Y paciencia no era precisamente lo que sobraba a los astrónomos cuando se paraban a pensar en Zwicky, que defendía todas y cada una de sus ideas con una vehemencia arrogante y pendenciera. Su opinión sobre el trabajo de los demás tampoco contribuyó precisamente a su popularidad:

Así que el destino de la astronomía, como el de tantas otras disciplinas y proyectos del hombre, fue que algunos capitostes de las correspondientes jerarquías la sumieran una y otra vez en la confusión. De ello ofrece un vívido testimonio toda la basura inútil que acumulan las abultadas revistas de astronomía.

Cuando quería, podía ser aún más conciso y expresivo: «Los astrónomos son unos cabrones esféricos. Da igual bajo qué ángulo los contemples, siempre se ven como unos cabrones». En justa correspondencia, los astrónomos condenaron su ácida brillantez al ostracismo. Su reputación resurgió después de que falleciera, cuando alguna de sus especulaciones más audaces —como que el 90 % de la materia del universo es invisible— obtuvo respaldo experimental, y cuando la mayor parte de la gente a la que había ofendido en lo más profundo se hubo retirado de la práctica profesional.

BAADE Y ZWICKY BAUTIZARON A LAS NOVAS INFLADAS DE ESTEROIDES COMO SUPERNOVAS



OBSERVATORIO PALOMAR/CALTECH

El astrofísico suizo Fritz Zwicky observa el firmamento a través del telescopio *Schmidt* de 18 pulgadas en el Observatorio Palomar en 1936.

Zwicky podía resultar francamente desagradable y, de vez en cuando, errar el tiro con hipótesis pintorescas, pero en sus mejores momentos vislumbraba el horizonte de su disciplina con décadas de anticipación. En el mismo año que se descubrió el neutrón, y en colaboración con otro astrónomo, Walter Baade —al que años después amenazaría de muerte tras determinar sin el menor atisbo de duda que era nazi, puesto que había tenido la ocurrencia de nacer en Alemania—, su interés se centró en el comportamiento de unas enigmáticas estrellas, llamadas novas. Eran estrellas que, sin previo aviso, incrementaban su emisión de luz durante varias semanas o meses. Tras examinar a fondo los registros de novas, Baade se había percatado de algo que los demás astrónomos habían pasado por alto. Había un pequeño conjunto de novas que emitían una cantidad de luz verdaderamente desmesurada, que las convertía en auténticos faros cósmicos, capaces de eclipsar galaxias enteras. Baade y Zwicky bautizaron a estas novas infladas de esteroides como supernovas. Habían llegado a la conclusión de que novas y supernovas eran estrellas que estallaban. Zwicky estaba al día de los últimos avances en física nuclear y aventuró una hipótesis: «Con todas las cautelas necesarias, proponemos la noción de que una supernova constituye la transición de una estrella ordinaria a una estrella de neutrones, compuesta fundamentalmente de neutrones. Tales estrellas pueden presentar un radio muy pequeño y una densidad extremadamente alta». En otras palabras, Zwicky estaba proponiendo la existencia de un nuevo actor en el drama cósmico.

Como veremos, las estrellas de neutrones admiten estados de la materia más densos que las enanas blancas. Los nuevos descubrimientos iban perfilando así una progresión de densidad creciente: estrellas normales, enanas blancas, estrellas de neutrones... ¿Se podía fijar un límite a la densidad que podía alcanzar la materia? ¿Existían estrellas tan pequeñas y densas en las que la superficie patológica de Schwarzschild quedara fuera de la masa estelar? La revolución de la mecánica cuántica, unida a la exploración del núcleo de los átomos, comenzó a ofrecer respuestas a esos interrogantes.

A escala humana, pocas cosas parecen más estables que el Sol. No obstante, como sucede con el resto de las estrellas, bajo su fachada inmutable late un pulso feroz entre dos fuerzas antagónicas: la gravedad y la presión de radiación. La gravedad tiende a comprimir al máximo la materia estelar, que se compone sobre todo de gas de hidrógeno. Cuanto más se comprime el gas, más se calienta. Llega un momento en el que el interior de la estrella alcanza temperaturas tan elevadas que los núcleos de los átomos de hidrógeno vencen su repulsión eléctrica y chocan entre sí, iniciando la fusión nuclear (figura 3). Las reacciones nucleares generan helio y liberan una enorme cantidad de energía, fuente de la luz y el calor de la estrella. Esta energía radiante ejerce una fuerza dispersiva sobre la materia y la empuja hacia fuera, contrarrestando la contracción gravitatoria. Las estrellas llevan así una vida atribulada, sumidas en una batalla entre la gravedad, que pugna por comprimirlas, y la actividad nuclear, que tiende a expandirlas.

Durante millones de años, ambas pulsiones se equilibran, pero tarde o temprano el combustible nuclear se agota y deja de ofrecer resistencia a la gravedad. ¿Qué sucede a continuación? Dejada a sus anchas, la gravedad se obstinará en comprimir la materia hasta concentrarla en un solo punto de densidad infinita. Este desenlace implica una singularidad y, de entrada, parece fuera de lugar en una descripción realista de la naturaleza. Entonces, ¿existe algún procedimiento alternativo capaz de pararle los pies a la apisonadora gravitatoria y evitar el colapso? La respuesta es que depende de la masa de la estrella. En torno a 1930 se descubrieron dos mecanismos que podían tomar el relevo de la energía radiante de las reacciones nucleares. Ambos mecanismos se fundan en fenómenos puramente cuánticos, que ponen de manifiesto la resistencia de los integrantes de los átomos —electrones y neutrones— a situarse todos en un mismo estado, en el mismo lugar, por ejemplo. Cuando el combustible nuclear se agota, los primeros en acudir al rescate son los electrones. La compresión gravitatoria reduce el espacio que tienen a su disposición para moverse. De algún modo, los confina. De hecho, la gravedad tiende a encerrar los electrones en volúmenes cada vez más pequeños. De este modo, los fuerza a congregarse en una misma ubicación. Sin

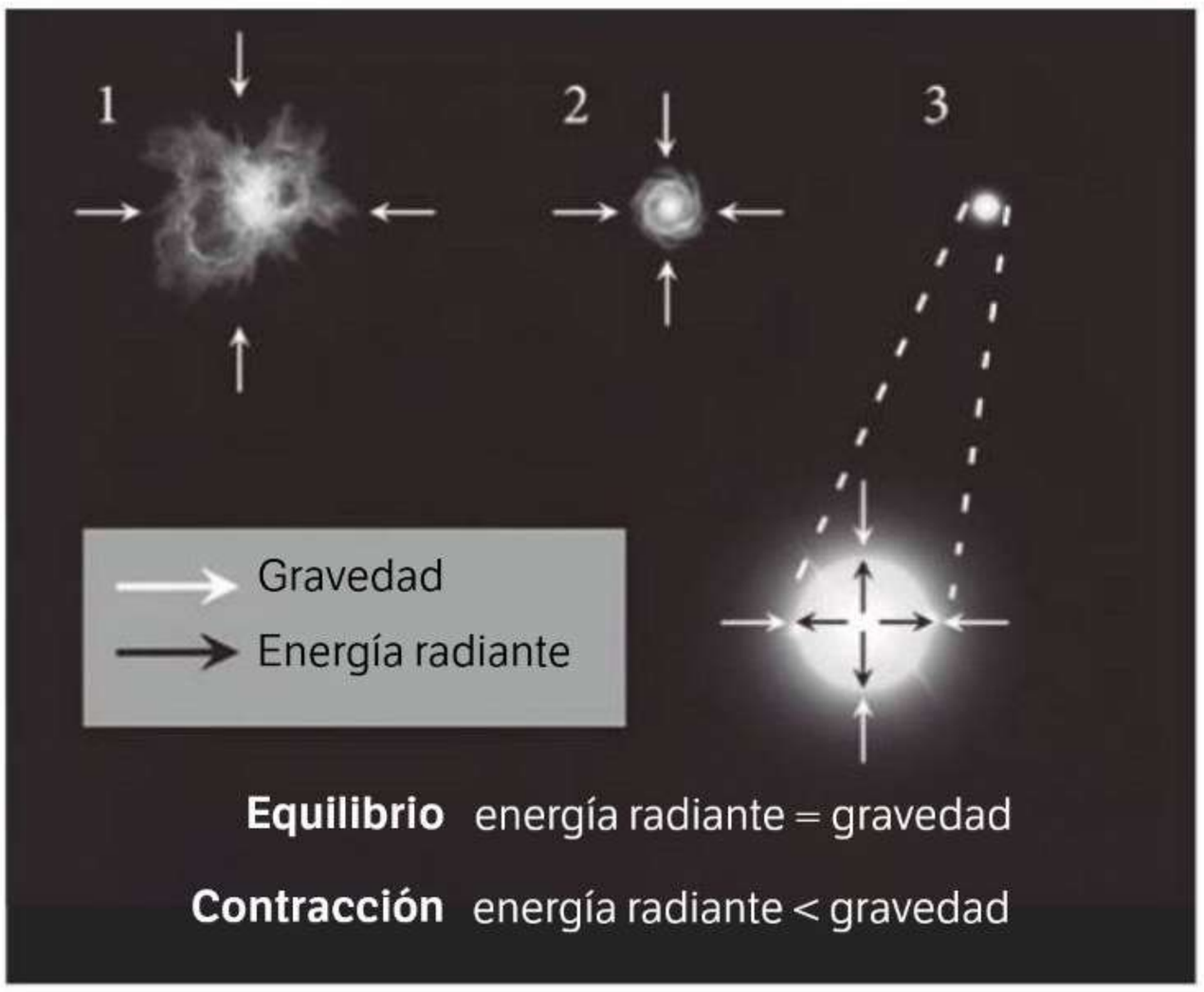


Figura 3. La gravedad comprime una nube de polvo y gas interestelar sin encontrar oposición (1 y 2) hasta que el ascenso de la temperatura prende la fusión nuclear (3).

embargo, las leyes de la mecánica cuántica prohíben que se sitúen todos en el mismo estado. Una manera de difuminar el valor de la posición de una partícula consiste en aumentar su velocidad. Un electrón que se desplaza muy deprisa resulta más difícil de localizar. Ese aumento de la velocidad incrementa también la presión que ejerce. Si encerramos a un electrón dentro de una caja, al elevar su velocidad aumentaremos también el número de veces que choca por segundo contra las paredes.

En resumen, a medida que la gravedad comprime la estrella, confina las partículas que integran su materia en espacios cada vez más reducidos, lo que tiende a situarlos en un mismo estado, tendencia que se contrarresta cuánticamente con un aumento de la velocidad, que a su vez sube la presión que se opone al colapso. Así, esta presión cuántica concede un segundo equilibrio a la estrella, que ya no se basa en el consumo de combustible nuclear. Este segundo equilibrio se traduce en la formación de un astro mucho más pequeño y denso que las estrellas ordinarias: una enana blanca. En ella, una masa solar acaba concentrada dentro de un volumen del tamaño de la Tierra. Una cucharada de materia de enana blanca pesaría varias toneladas. A pesar de que las enanas blancas poseen densidades extraordinarias, la superficie aberrante o singular de Schwarzschild se mantiene dentro de ellas.

Cuando una estrella agota su combustible nuclear, ¿puede la presión cuántica de sus electrones neutralizar cualquier presión gravitatoria que se le venga encima? Pues depende. Cuanto mayor sea la masa de la estrella, mayor será la fuerza compresora que tendrá que soportar. Cuando los electrones se sienten confinados en un espacio que se reduce progresivamente, se defienden incrementando su velocidad y su presión, pero la naturaleza impone un tope a la velocidad máxima que pueden alcanzar. ¿Cuál es ese tope? No es otro que la velocidad de la luz, el límite establecido por Einstein en uno de sus dos postulados relativistas. En cuanto los electrones rozan la velocidad de la luz, ya no pueden seguir aumentando la presión. Esa es la máxima resistencia que podrán ofrecer. En muchas ocasiones, basta. De hecho, es suficiente siempre que la materia de la estrella no supere el límite de una masa solar y media. Dentro de ese margen, cuando se agote su combustible nuclear, cederá en primera estancia a la compresión y se contraerá, pero la resistencia de sus electrones terminará por plantar cara al colapso y logrará establecer un segundo equilibrio. Fue Subrahmanyan Chandrasekhar quien determinó por primera vez ese límite de una masa solar y media en 1931. El Sol se encuentra dentro del límite de Chandrasekhar y, llegado el momento, encogerá hasta jubilarse como una respetable enana blanca.

Chandrasekhar nos devuelve a la India, al punto donde iniciamos nuestra historia, como si los ecos del trágico episodio del fuerte Henry persiguieran como un espectro a los físicos empeñados en sondear las singularidades de Schwarzschild. Chandrasekhar fue un joven prodigio y dio con el límite que lleva su nombre a los diecinueve años, a base de combinar ingredientes cuánticos y relativistas, mientras combatía el aburrimiento en un viaje en barco que lo llevaría de Madrás

CUANTO MAYOR SEA LA MASA DE LA ESTRELLA, MAYOR SERÁ LA FUERZA COMPRESORA QUE TENDRÁ QUE SOPORTAR

a Southampton. Un viaje de naturaleza muy diferente había trasladado a John Holwell desde la India a Inglaterra y había inspirado el mito del agujero negro de Calcuta. Cuando Chandrasekhar embarcó en Madrás, en 1930, dejaba atrás una India todavía bajo la férula del Raj británico, el mismo Raj que había encontrado una poderosa justificación en las atormentadas memorias de Holwell. Dos relatos de índole muy distinta, auspiciados por travesías de mar muy semejantes, conectan a los dos viajeros. Uno puede imaginar a Holwell y a Chandrasekhar, los dos apostados en la borda de un barco, con la mirada perdida en el horizonte, absortos en cavilaciones en torno a una crítica acumulación de materia que conduce al colapso. Un relato científico y un drama humano, que se entrelazan por los vínculos caprichosos de la cultura y el destino.

Cuando una estrella posee más de una masa solar y media, sus electrones no disponen de fuerza suficiente para tomar el relevo del combustible nuclear. La estrella se doblega entonces ante la brutal prensa gravitatoria. Sus propios átomos se quiebran. Los electrones (con carga eléctrica negativa) se precipitan sobre los núcleos atómicos y, al alcanzarlos, reaccionan con los protones (con carga eléctrica positiva), produciendo neutrones y neutrinos (ambos neutros, sin carga eléctrica, como indican sus nombres). Los neutrinos escapan del campo de batalla y la estrella se transforma en un colosal conglomerado de neutrones, que se comportan de manera muy parecida a los electrones en las enanas blancas. Un espacio que se reduce progresivamente define su posición más allá de lo que toleran las leyes cuánticas, y los neutrones reaccionan ganando velocidad y colisionando unos con otros con más energía, aumentando su presión hacia fuera. En el corazón de la estrella, la presión cuántica de los neutrones se alza en un esfuerzo heroico por plantar cara a la gravedad. Los protones tienen mucha más masa que los electrones, y sus impactos comunican más energía, así que ejercen una presión mucho mayor que la electrónica. En estrellas que no superan las dos o tres masas solares, esta presión logra contrarrestar la aplastante presión de la gravedad. En el proceso, se forma una peculiar criatura estelar: una estrella de neutrones. En ella, una masa mayor que la del Sol se aprieta en una densísima esfera de unos diez kilómetros de radio. Una cucharada de su materia pesaría mil millones de toneladas. A pesar de exhibir una densidad extrema, la superficie singular de Schwarzschild todavía no asoma fuera de las estrellas de neutrones.

Este segundo límite de entre dos y tres masas solares lo establecieron Robert Oppenheimer y uno de sus estudiantes de doctorado, George Volkoff, en 1939, siguiendo muy de cerca la argumentación previa de Chandrasekhar y contando con la ayuda de un físico veterano, Richard Tolman, para hacer las adaptaciones pertinentes. En lugar de lidiar con electrones, ellos tuvieron que vérselas con neutrones, lo que introducía un nuevo actor en los cálculos: las fuerzas nucleares, de las que entonces se sabía muy poco. El nuevo límite celebró en su nombre el triunvirato Tolman-Oppenheimer-Volkoff.

LOS PROTONES TIENEN MUCHA MÁS MASA QUE LOS ELECTRONES Y SUS IMPACTOS COMUNICAN MÁS ENERGÍA



AIP EMILIO SEGRÈ VISUAL ARCHIVES, PHYSICS TODAY COLLECTION

El astrofísico indio-estadounidense Subrahmanyan Chandrasekhar, galardonado con el Nobel de Física en 1983 por sus descubrimientos sobre la estructura y evolución de las estrellas.

Costó varias décadas armar la historia que acabamos de resumir en unos párrafos. Hay que tener en cuenta que hasta 1932 no se descubrieron los neutrones, así que difícilmente nadie hubiera podido concebir antes la existencia de astros compuestos exclusivamente por estas partículas. Hubo que esperar hasta 1938 para que Hans Bethe desentrañara otro de los puntos clave de la vida de las estrellas, el mecanismo nuclear que alimenta su metabolismo radiante. Los físicos de las primeras décadas del siglo XX tuvieron que asimilar una auténtica avalancha de novedades. No todos hicieron bien la digestión. El dictamen del papa de la astrofísica, Arthur Eddington, sobre el límite establecido por Chandrasekhar para las enanas blancas fue demoledor: lo calificó de «bufonada estelar».

En el momento en el que Chandrasekhar viajaba de Madrás a Southampton, todavía no se había elaborado una teoría que integrase la mecánica cuántica y la relatividad especial, ambas necesarias para describir el confinamiento de cualquier partícula subatómica que se viera forzada a alcanzar velocidades próximas a la de la luz. Chandrasekhar había confeccionado su propia receta de relatividad cuántica en un contexto muy particular, el de la dinámica estelar. Eddington no quedó muy contento con el maridaje: «No considero que la descendencia de esa unión proceda de un matrimonio legítimo», comentó despectivamente. Eddington experimentaba un rechazo visceral hacia la noción de colapso gravitatorio, ante la posibilidad de que una masa estelar se pudiera contraer hasta alcanzar una densidad infinita. Sus prejuicios muestran que incluso los mejores científicos a menudo se guían más por la intuición —vale decir, por sus prejuicios o emociones— que por la razón. Prefirió creer en la versión de otro físico, el británico Ralph Fowler, que también había incorporado ingredientes cuánticos en el estudio del ciclo vital de las estrellas. En sus cálculos, Fowler había omitido las correcciones debidas al límite de la velocidad de la luz. Con esta omisión, la presión cuántica de los electrones garantizaba el equilibrio a cualquier estrella que iniciara el colapso. Dicho de otro modo, cualquier estrella podía confiar en terminar sus días como una enana blanca. Eddington decidió acogerse a esa versión más tranquilizadora.

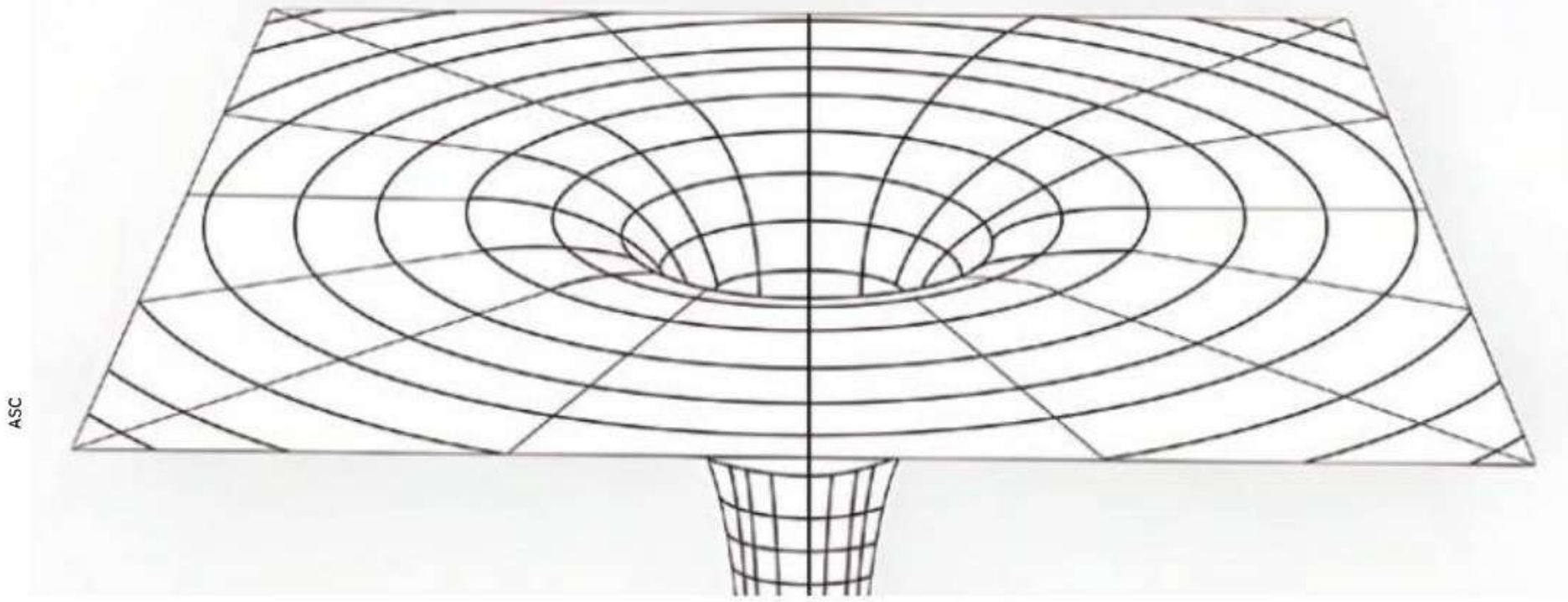
Eddington era una leyenda viviente entre los astrónomos y Chandrasekhar era un joven semidesconocido. Eddington era en gran medida responsable de la imagen que se habían formado los científicos de las estrellas y estaba obsesionado con el equilibrio estelar. Eddington detestaba la mera posibilidad de los agujeros negros; Chandrasekhar estaba abriendo la senda que los hacía viables. Eddington consideraba a las estrellas casi como pacientes siquiátricos, a los que negaba el derecho a un comportamiento patológico. Estaba convencido de que todas las estrellas debían morir en paz, como enanas blancas. Eddington contribuyó notablemente a retrasar la entrada de los agujeros negros en el panteón de ideas científicas respetables. Eddington estaba equivocado y Chandrasekhar llevaba razón. Chandrasekhar trató de recabar el apoyo de otros científicos capaces de contrarrestar el carisma y el ascendente de Eddington, expertos en mecánica cuántica como Niels Bohr, Wolfgang Pauli o Werner Heisenberg. Todos le dieron la razón de manera directa o indirecta en privado. Sin embargo, ninguno quiso subir a la palestra y enredarse públicamente en una controversia con Eddington, en una disputa que además caía en un terreno en el que no se sentían expertos. Ninguno de ellos era astrónomo. Sin apoyos, Chandrasekhar no se vio con ánimos de jugar la carta de David contra Goliat y decidió, con buen juicio, tirar la toalla y no librar una batalla condenada de antemano al fracaso contra Eddington. Se hizo a un lado, buscó otros temas de investigación y solo regresó al estudio de los agujeros negros después de que el tiempo hubiera colocado a cada uno en su sitio.

Los límites de Chandrasekhar y de Tolman-Oppenheimer-Volkoff generaban inquietud porque no alzaban diques de contención absolutos. Salvaban a las estrellas que se situaban dentro de un estrecho margen de masas, a cambio de convertirlas en entidades algo extravagantes, pero finalmente aceptables. El mismo argumentario que había conducido al establecimiento de los límites parecía indicar que el recurso de la presión cuántica no era capaz de librar del colapso gravitatorio a las estrellas que superaban las tres masas solares. En su caso, la gravedad quebrantaría incluso la resistencia numantina de los neutrones y no quedaría nada que pudiera hacer frente a su compulsión compresora. Si la estrella no podía coger el tren de las enanas blancas ni de las estrellas de neutrones, ¿en qué se convertía? ¿Menguaría hasta concentrar toda su masa en un punto de infinita densidad? ¿La superficie de Schwarzschild quedaría entonces expuesta ominosamente a la vista de todos?

CIENCIA OSCURA

Ante el cariz que estaban tomando los acontecimientos, Einstein se sintió en la obligación de pronunciarse. En 1939, se decidió a matar al monstruo que su propia teoría parecía invocar. El arma sería un artículo publicado en la revista *Annals of Mathematics*. Su título, a primera vista, no guardaba relación alguna con el problema del colapso gravitatorio: «Sobre un sistema estacionario con simetría esférica compuesto por muchas masas gravitatorias». En él trataba de demostrar que la materia del universo jamás caería en una espiral de densidad creciente que desembocara en la formación de una aberrante singularidad de Schwarzschild. No era la primera vez que intentaba disciplinar a sus díscolas ecuaciones, empeñadas en predecir fenómenos a los que no encontraba ningún sentido, como los agujeros negros o un universo en expansión.

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



Ecuación matemática del Radio de Schwarzschild junto a una representación geométrica de la curvatura extrema del espacio-tiempo provocada por una masa concentrada.

Para su demostración, Einstein puso en escena un enjambre de partículas materiales que giraban en torno a un mismo centro, trazando órbitas circulares situadas en diferentes planos. Visto desde una cierta distancia, el conjunto mostraría el aspecto de una esfera de partículas, que giraban en todas las direcciones. Einstein logró probar que, para que la esfera se contrajera más allá del radio de Schwarzschild, las partículas tendrían que superar la velocidad de la luz. Como nada podía infringir ese límite sagrado de la relatividad, la materia no tenía modo de concentrarse en volúmenes arbitrariamente pequeños: «El resultado esencial de esta investigación es una comprensión clara de por qué las singularidades de Schwarzschild no se dan en la realidad física». Hablando del rey de Roma, el artículo de Einstein no hacía sino presentar un viejo argumento de Schwarzschild con un vestido nuevo. Este había mostrado que una estrella con un radio menor que el radio de Schwarzschild tendría que ejercer una presión interna infinita para resistir la compresión. Circunstancia que le había llevado a concluir que dichas estrellas no eran viables. Tanto Schwarzschild como Einstein estaban poniendo de manifiesto la imposibilidad de que se formaran cuerpos extremadamente compactos y estables con un radio más pequeño que el radio de Schwarzschild. Aquí el punto clave estaba en la búsqueda del equilibrio. Implícitamente no estaban considerando la evolución de ningún sistema hacia configuraciones de la materia inestables, como el colapso sostenido de una estrella.

EDDINGTON EXIGÍA A LAS ESTRELLAS UN COMPORTAMIENTO TOTALMENTE PREDECIBLE Y NORMAL

La posibilidad de que en la naturaleza se pudiera producir una implosión gravitatoria completa resultaba inconcebible desde una perspectiva newtoniana y encontró enormes resistencias incluso desde presupuestos relativistas o cuánticos. Muchos científicos experimentaban una verdadera aversión ante la idea. A veces lo expresaban abiertamente, otras ni siquiera se daban cuenta de lo que sentían. Era una herida abierta en el inconsciente de los físicos. Por un lado, estaban las ecuaciones y, por otra, las personas que las interpretaban, y las ecuaciones contemplaban situaciones y fenómenos que las personas rechazaban de plano en función de sus prejuicios. Prejuicios que se debían a la cultura científica en la que se habían formado y que dictaba restricciones que no imponían las matemáticas.

Los argumentos de Einstein y Schwarzschild en realidad no impedían el colapso, solo la formación de cuerpos estelares estables hiperdensos. Venían a decir que no existía una tercera parada después de las enanas blancas y las estrellas de neutrones. La materia no podía alcanzar una tercera configuración de equilibrio, que diera lugar a un tercer tipo de astro más denso aún que añadir al catálogo estelar. Tácitamente, Einstein y Schwarzschild estaban descartando la mera posibilidad de la alternativa: un colapso llevado hasta sus últimas consecuencias. Negaban a la gravedad su victoria final sobre la materia. Solo alcanzaban a concebir un agujero negro como un nuevo tipo de estrella, por exótica que fuera. Puesto que ninguna fuerza interna podría sostenerla, jamás habría agujeros negros.

Pocos meses después de que Einstein sacara a la luz su artículo, Robert Oppenheimer publicó una suerte de refutación, en colaboración con otro de sus estudiantes de doctorado, Hartland Snyder. Ya desde el título anunciaban que sus conclusiones eran de naturaleza muy distinta: «Sobre la contracción gravitatoria continua». Su trabajo anterior con Volkoff y Tolman, que marcaba los límites para que las estrellas masivas accedieran a una muerte digna, había convencido a Oppenheimer de que la vía de la implosión a veces resultaba inevitable. Esa convicción lo convertiría en uno de los primeros físicos en creer en la realidad de los agujeros negros relativistas y en ofrecer argumentos razonables de cómo se podían producir en la naturaleza. Dichos argumentos había que extraerlos de las ecuaciones de la relatividad general. Era una dura cantera. Tan dura que, de hecho, terminaba por volver impracticable la tarea. A lo largo de más de dos décadas, los matemáticos más avezados solo habían logrado calcular soluciones exactas de las ecuaciones de Einstein en situaciones muy particulares y, desde luego, ninguna de ellas era tan compleja como la que planteaba la dinámica estelar. Sin embargo, Oppenheimer poseía un instinto certero para separar la paja del trigo, para identificar cuáles eran los factores realmente determinantes a la hora de estudiar cualquier proceso físico.

Aparcó a un lado la estrella real, inabordable, y exploró en su lugar un objeto mucho más sencillo, una versión idealizada. Las estrellas que pueblan el universo rotan, son un hervidero de reacciones nucleares, desprenden materia y radiación electromagnética y presentan una distribución de masa irregular. En la década de

EINSTEIN Y SCHWARZSCHILD SOLO ALCANZABAN A CONCEBIR UN AGUJERO NEGRO COMO UN NUEVO TIPO DE ESTRELLA

1930, nadie hubiera podido resolver unas ecuaciones que tuvieran en cuenta todos esos factores, así que Oppenheimer y Snyder eliminaron la rotación y la radiación. Hicieron que su estrella adoptase la forma de una esfera perfecta, con una distribución uniforme de masa, que además no ejercía ningún tipo de presión hacia fuera. Esta última propiedad llama particularmente la atención. Oppenheimer juzgó que si la gravedad iba a terminar venciendo cualquier oposición (presión) que presentara la estrella, su papel no resultaría determinante en el proceso. Al reducir la presión a cero, las ecuaciones se volvían abordables. Tanto Oppenheimer como Snyder eran conscientes de que en la naturaleza no existía ningún astro como el que ellos estaban considerando, pero confiaban en que, aun así, su modelo retuviera los rasgos esenciales que condicionaban el colapso estelar. No estaban interesados en una descripción detallada, realista, del fenómeno. Bastaba con que su descripción retuviera los aspectos clave que decidirían el destino de una estrella.

A pesar de haber despojado al máximo a la estrella de sus atributos, tuvieron que hacer frente a un cálculo arduo en el que Tolman, de nuevo, acudió a echar una mano. El colapso sostenido de las estrellas masivas de Oppenheimer y Snyder concentraba más y más materia en una región del espacio cada vez más reducida. Sin armas para defenderse, sin ofrecer resistencia, la esfera gaseosa se sometía por completo al brutal aplastamiento de la gravedad, que llegaba a reducir su volumen a cero. La progresiva acumulación de masa acentuaba la distorsión del espacio-tiempo, hasta generar una curvatura infinita (figura 4). De hecho, espacio y tiempo cesaban de existir en el centro mismo del colapso. Después de alcanzar ese punto singular, la materia de la estrella no seguía desplazándose hacia ningún otro lugar. Allí se transmutaba en energía pura que, como un fantasma, rondaba el centro del colapso para sostener la traumática contorsión del espacio-tiempo. La peculiar geometría que se consolidaba entonces correspondía a un agujero negro.

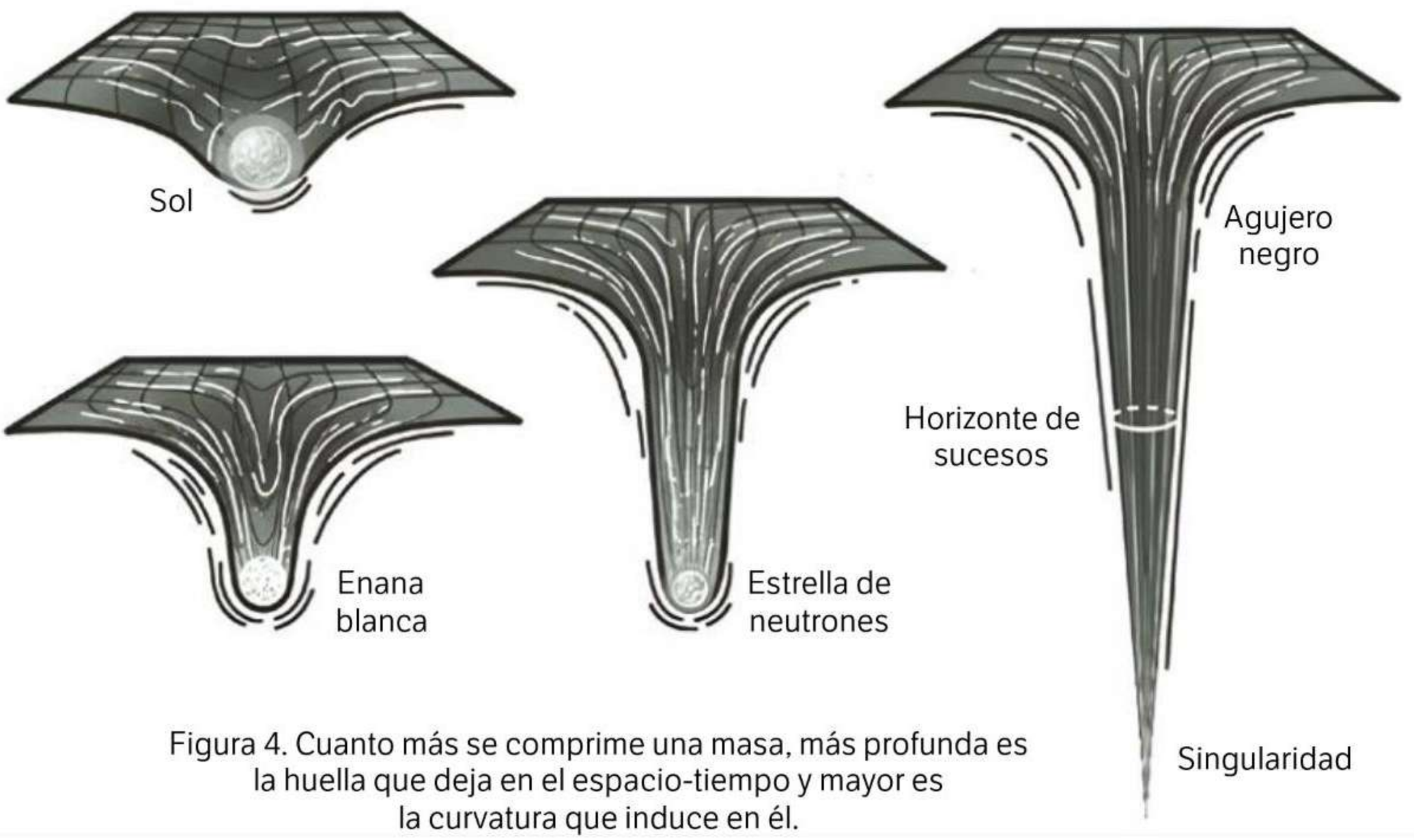


Figura 4. Cuanto más se comprime una masa, más profunda es la huella que deja en el espacio-tiempo y mayor es la curvatura que induce en él.

¿Qué efecto causaba esta gravedad desbocada sobre la masa de la estrella mientras esta desfilaba hacia el centro del colapso? ¿Qué sucedía con sus neutrones y electrones cuando la densidad se disparaba? La relatividad general no ofrece una descripción de la naturaleza a escala subatómica —dominio que corresponde a la mecánica cuántica—, así que sus ecuaciones no proporcionan ningún detalle sobre cómo se produce la metamorfosis final de la estrella en un agujero negro. Se limitan a declarar que su masa se comprime hasta concentrarse en un punto de infinita densidad. ¿Qué permanece después de que se haya consumado el colapso? La respuesta puede causar desconcierto, pero resulta del todo natural para las ecuaciones de Einstein. Puro espacio-tiempo. La masa se precipita hasta desaparecer en la singularidad. En un acto de prestidigitación física, se transforma en energía, energía que sostiene la torsión del espacio-tiempo. John Wheeler describió esta insólita transmutación recurriendo a un símil literario. La masa: «desaparece de la vista como el gato de Cheshire. Uno deja tras de sí solo su sonrisa; la otra, solo su atracción gravitatoria».

Un aspecto particularmente enigmático de esta implosión, que no pasaron por alto Oppenheimer y Snyder, tenía que ver con el desplazamiento al rojo, un fenómeno que Einstein ya entrevió en las versiones más primitivas de su interpretación relativista de la gravedad. Consiste en lo siguiente. Como apuntamos anteriormente, la presencia de una masa en el universo no solo modifica las propiedades del espacio (creando una hondonada que desvía la trayectoria de los cuerpos en su proximidad, generando la ilusión de una fuerza, la fuerza gravitatoria). También afecta a las propiedades del tiempo, como corresponde al ámbito relativista, en el que tiempo y espacio comparten un vínculo profundo. Dado que la gravedad distorsiona el tejido tetradimensional —en ciertos puntos lo da de sí, en otros lo contrae—, afecta tanto a las medidas espaciales como a las temporales. Allí donde la gravedad sea más intensa, el ritmo de los relojes será más lento. La magnitud del efecto depende de cómo de pronunciada sea la curvatura que la masa induce en el tejido del espacio-tiempo. Resulta más notable en la vecindad de una enana blanca que en la del Sol; más en la proximidad de una estrella de neutrones que en la de una enana blanca. Tras la formación de un agujero negro, llega al extremo y el tiempo sencillamente parece detenerse en la famosa superficie de Schwarzschild.

Esta interferencia de la gravedad en los ritmos del tiempo afecta a una propiedad de la luz que se pone de manifiesto con particular claridad cuando la interpretamos como una onda, es decir, como una sucesión de crestas y valles que se van alternando (figura 5). Hay dos atributos que definen por completo la forma de esta onda: su altura (la distancia entre el punto más bajo de un valle y el punto más alto de una cresta) y su longitud (su grado de estiramiento o compresión, que también se puede interpretar como la distancia entre dos crestas consecutivas). Las ondas muy largas, como las ondas de radio, son invisibles y transportan poca energía. Si cogemos una onda y la vamos comprimiendo, acercando unas crestas a otras, se irá cargando de energía. Llegará un momento en que, a partir de una longitud determinada, se

LA LUZ VIAJA A VELOCIDAD CONSTANTE EN EL VACÍO, PERO SU ENERGÍA VARÍA SEGÚN SU LONGITUD DE ONDA

volverá visible: luz roja. Si continuamos estrechando la onda, el acortamiento se traducirá en un cambio de color. Así iremos recorriendo los diversos tonos del arcoíris: naranja, amarillo... hasta llegar al violeta. Si seguimos comprimiendo la onda, volverá a desaparecer de nuestra vista: tendremos luz ultravioleta. Cuanto más corta sea la onda, más energía transportará. Esta relación entre longitud y energía explica por qué las ondas de radio, largas, nos atraviesan sin afectarnos, mientras que los rayos gamma, ondas cortas, dañan nuestros tejidos.

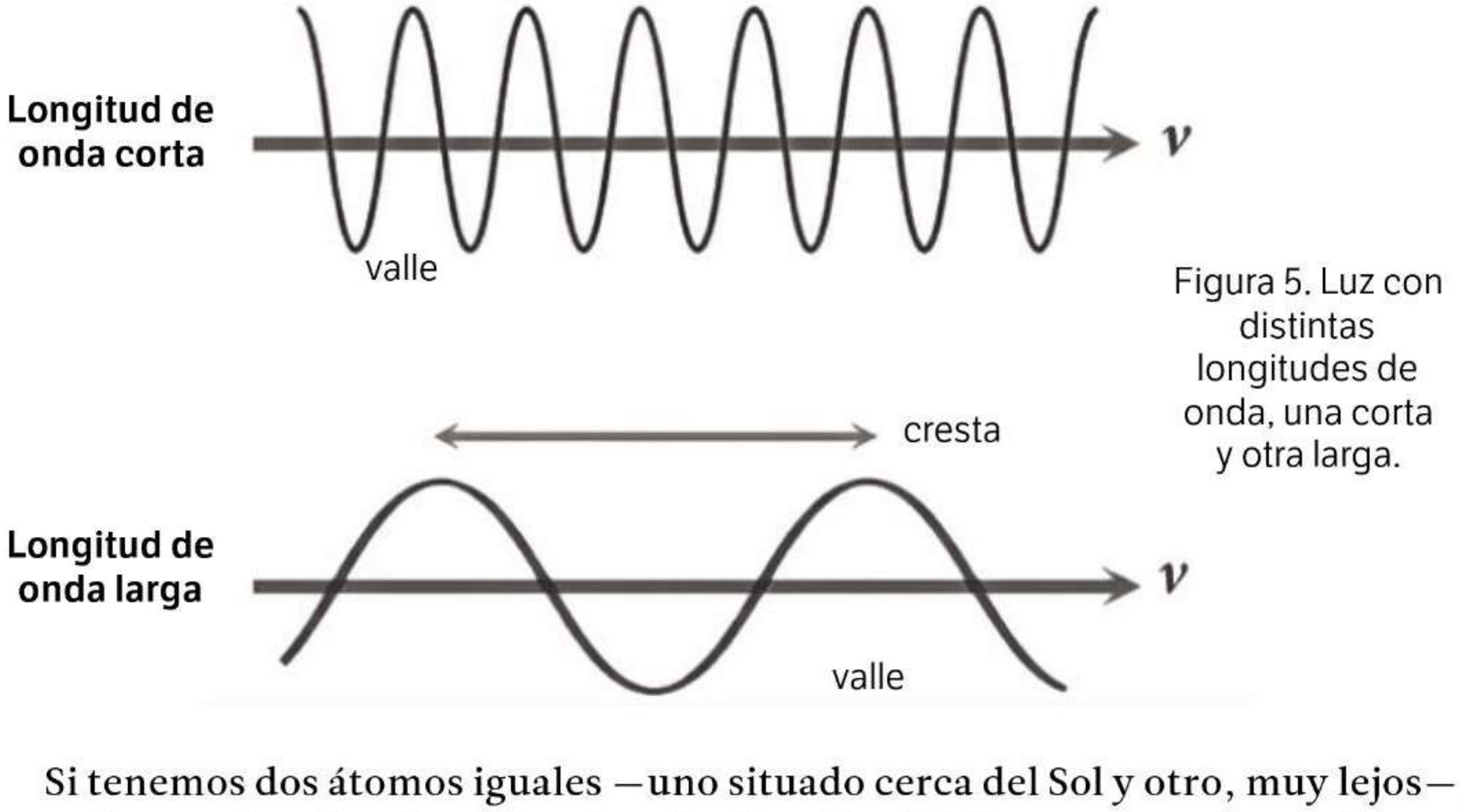


Figura 5. Luz con distintas longitudes de onda, una corta y otra larga.

Si tenemos dos átomos iguales —uno situado cerca del Sol y otro, muy lejos—, y ambos emiten la misma luz, la ralentización del tiempo causada por la gravedad del Sol estirará la longitud de la luz que emita el átomo más próximo y volverá más roja su luz. James W. Brault, un estudiante de posgrado de Robert Dicke, fue el primero en medir este efecto en el caso del Sol, en 1962. Conviene recordar que la luz se desplaza siempre a la misma velocidad en el vacío, pero la energía que transporta depende de su longitud de onda. La luz roja es menos energética que la luz azul.

La magnitud del desplazamiento al rojo depende de la distorsión gravitatoria que ralentiza el tiempo. Cuanto más reducido sea el espacio en el que encerremos una masa radiante, la luz que emita se volverá más roja o, lo que es lo mismo, menos energética. Si la densidad continúa aumentando y reducimos el volumen de la estrella hasta el radio de Schwarzschild, la longitud de su luz se estirará hasta el infinito. La ralentización gravitatoria sustrae así toda la energía de la luz y la vuelve invisible. De este modo, el colapso da lugar a un cuerpo oscuro, pero de una naturaleza muy diferente a la de los gigantes estelares que habían entrevisto Michell y Laplace. Su luz no se verá frenada y traída de vuelta a la superficie. Por el contrario, su luz se desplazará siempre a la misma velocidad, pero la gravedad la alargará hasta agotar toda su energía.

Un espectador que observe —en reposo y a una distancia prudencial— cómo colapsa una estrella, verá primero cómo esta se va encogiendo. No tardará en advertir los efectos de la distorsión temporal causada por la gravedad. Comprobará entonces que el proceso de implosión comienza a ralentizarse, al mismo tiempo

que la luz de la estrella se va volviendo cada vez más roja, menos energética. Justo en el instante en el que el radio de la estrella se reduce al radio de Schwarzschild la película del colapso se detendrá: la luz habrá perdido toda su energía. Se acabó el espectáculo. Los siguientes episodios de la muerte de la estrella no llegarán nunca a los ojos del observador. De ahí que antes de su bautizo oficial, los agujeros negros recibieran también la denominación de «estrellas congeladas».

Llegados a este punto conviene señalar que esta es solo una versión de los hechos. Como vimos en el segundo capítulo al repasar los fundamentos de la relatividad, observadores inerciales en diferentes estados de movimiento realizan descripciones distintas de los mismos fenómenos. Si un testigo del colapso, en lugar de disfrutar de la acción quieto, a una distancia prudencial, decidiera acompañar a la superficie de la estrella en su caída (convenientemente protegido, eso sí, dentro de algún vehículo espacial), asistiría a un espectáculo bien distinto. Dicho observador no apreciaría ralentización alguna y para él la película no se congelaría en ningún momento. De hecho, cruzaría la superficie singular de Schwarzschild sin advertir nada particular. Eso sí, una vez traspasado ese umbral, ninguno de sus mensajes podría alcanzar el exterior. Aunque esta última circunstancia no llamó entonces la debida atención, ahí residía la clave de lo que vendría a conocerse como horizonte de sucesos. El radio de Schwarzschild no albergaba ninguna singularidad, sino que marcaba la frontera de una barrera causal. Nada de lo que ocurriera dentro de sus límites podría afectar jamás a lo que se encontrara en el exterior.

Esta discrepancia entre las versiones de dos observadores en diferentes estados de movimiento —uno en reposo, a una cierta distancia de la estrella; otro que se desplaza, acompañando el colapso— se ajustaba a los preceptos del credo relativista. Al mismo tiempo, era la discrepancia entre observadores más radical descubierta hasta entonces, fruto de una gravedad intensísima, que nada tenía que ver con la que desviaba los rayos de luz de estrellas lejanas al pasar cerca del Sol o la que afectaba a la órbita de Mercurio. Nadie tenía muy claro cómo relacionar relatos tan discordantes, es decir, cómo describir el fenómeno subyacente que generaba las dos perspectivas.

A pesar de estas incertidumbres, Oppenheimer y Snyder conseguían romper el embrujo de la segunda singularidad de Schwarzschild. Su análisis sugería que el espacio-tiempo no sufría ningún desgarro en la famosa superficie singular, ya que un observador que acompañara el colapso no percibiría nada particular en el momento de atravesarla. Para él esa región del espacio resultaría indistinguible de las demás. Los cálculos mostraban cómo, a medida que se comprimía la estrella, se acentuaba la huella que dejaba en el espacio-tiempo. Su tejido se hundía cediendo ante el aumento de densidad, pero la curvatura no se volvía infinita, ni siquiera cuando la estrella quedaba encerrada dentro del radio de Schwarzschild. La fractura del espacio-tiempo solo se producía en el centro del colapso. ¿De dónde salía entonces el misterioso infinito que tanto había intrigado a Einstein y al resto de físicos relativistas? Con el tiempo se vería que se trataba de un

OPPENHEIMER Y SNYDER CONSEGUÍAN ROMPER EL EMBRUJO DE LA SEGUNDA SINGULARIDAD DE SCHWARZSCHILD

espejismo que solo afectaba a ciertos observadores. El infinito no estaba en el fenómeno, sino en su descripción matemática, que presentaba algunas deficiencias para observadores muy particulares. La única singularidad real era la que habitaba en el centro del agujero negro.

ENLACE AL CANAL
x.com/byneontelegram
Ó escanea el código QR:



Portada de la revista *Life* del 10 de octubre del año 1949, dedicada al físico teórico J. Robert Oppenheimer.

El artículo de Oppenheimer y Snyder, «Sobre la contracción gravitatoria continua», se puede considerar como la partida de nacimiento de los agujeros negros relativistas. Cuando una superaba el límite de las tres masas solares, se agotaban todos los conejos que la naturaleza guardaba en la chistera para detener el colapso gravitatorio. Para Oppenheimer los agujeros negros no eran una nueva variedad exótica de estrella. Eran el resultado de un proceso dinámico de colapso indefinido. Esta forma de enfocar el problema suscitó reacciones encontradas. Muchos astrónomos se negaron a aceptar sus conclusiones. Era tanto lo que se ignoraba acerca de la dinámica estelar que quedaba margen más que suficiente para evitar el drama de la implosión completa. Cuando una estrella grande colapsa, se desprende de forma explosiva de sus capas exteriores y se convierte en nova o supernova. Por tanto, se deshace de una considerable cantidad de materia gaseosa. Quizá el proceso dejara un remanente que nunca superaba el límite de Tolman-Oppenheimer-Volkoff. Así, el desenlace de la historia sería siempre, o bien una enana blanca, o bien una estrella de neutrones. También es cierto que este feliz desenlace demandaba de las estrellas un ejercicio de autocontrol notable. Fuera cual fuera su tamaño de partida, tendrían que deshacerse justo de la materia necesaria para no acabar con más de tres masas solares después de su estallido final.



LAWRENCE BERKELEY NATIONAL LABORATORY

De izquierda a derecha, los físicos J. Robert Oppenheimer, Enrico Fermi y Ernest O. Lawrence en el campus de la Universidad de California en Berkeley.

Otros achacaron el aberrante ocaso de las estrellas masivas a la artificiosidad del modelo de Oppenheimer. Defendían que el colapso solo se podía llevar hasta sus últimas consecuencias en el caso de un cuerpo idealizado que ningún astrónomo avistaría jamás en el universo. Con seguridad, un análisis relativista que tuviera en cuenta la rotación, la emisión de radiación, la presión interna de la estrella, la distribución irregular de su masa o la pérdida de materia en la fase de nova, conjuraría la contorsión del espacio-tiempo en torno a una singularidad.

A pesar de que sobraban motivos para una larga y encendida polémica, la disputa fue breve. El artículo de Oppenheimer y Snyder llevaba fecha de publicación del 1 de septiembre de 1939, el mismo día en el que el ejército de Hitler inició la invasión de Polonia. También es el día en el que Francia y Reino Unido reaccionaron por fin a las provocaciones de Alemania con una declaración de guerra. Los físicos abandonaron sus controversias cuánticas y relativistas y marcharon al frente o se entregaron a investigaciones de interés militar. La atención de Oppenheimer pasó de las reacciones nucleares que animaban el corazón de las estrellas a las que podían forjar un arma de destrucción masiva.

Después del hiato impuesto por la Segunda Guerra Mundial, cuando los físicos abandonaron el diseño de tecnología bélica o simplemente tuvieron la suerte de sobrevivir al frente, regresaron a los despachos de las universidades y contemplaron de nuevo las ecuaciones que habían dejado escritas en las pizarras seis años atrás y los artículos que se amontonaban en sus mesas de trabajo. ¿Era el momento de releer el artículo de Oppenheimer y Snyder? En palabras de Werner Israel, había sólidos argumentos para considerarlo «el artículo más audaz y asombrosamente profético que se hubiera publicado nunca en nuestro campo». Por desgracia, no siempre se presta la debida atención a los oráculos. El artículo no fue relegado del todo al olvido, pero pasó a un discreto segundo plano, obteniendo pocas citas hasta la década de 1960.

¿Cuál fue la razón de este desinterés? Lo cierto es que la comunidad científica no creía en los resultados francamente contraintuitivos de Oppenheimer y Snyder. No creía en la consumación del colapso. No creía, en suma, en la realidad de los agujeros negros. John Wheeler consideró el problema del colapso gravitacional como «la mayor crisis en la física de todos los tiempos». Él mismo reconocería la antipatía, hasta cierto punto irracional, que le suscitaba: «Sencillamente no me gustaba. Hice cuanto pude por encontrar una forma de evitar la implosión forzosa de las grandes masas». A pesar de los incómodos indicios presentados por Chandrasekhar y Oppenheimer, existía la convicción de que la naturaleza sabría arreglárselas para evitar, aunque fuera en el último momento, el desenlace fatal.

Por fuerza debían existir otras maneras de salir del apuro, ya que, aunque el modelo de estrella de Oppenheimer y Snyder fuera más complejo que el de Schwarzschild, seguía muy alejado de la realidad. Cuando se incorporasen todos los detalles, irregularidades y asimetrías propios de las estrellas que pueblan el universo, la amenaza de la singularidad sería conjurada. Esta resistencia hizo que hasta finales de la década de 1950 los agujeros negros se esfumaran prácticamente de la literatura científica. En este sentido, la publicación del artículo de Oppenheimer y Snyder se puede considerar como una oportunidad perdida.

Sin embargo, la naturaleza es tozuda. Mientras los teóricos mandaban al destierro la perturbadora idea del colapso estelar, en el frente experimental una serie de descubrimientos enigmáticos conspiraba por traerla de vuelta.

LA SOLEDAD DEL INVESTIGADOR DE FONDO

Como en una novela de misterio bien armada, las pruebas de la existencia de agujeros negros estuvieron a la vista de todos casi desde el principio, solo que expuestas de un modo que nadie supo reconocer su trascendencia. Seis años antes de la publicación de «Sobre la contracción gravitatoria continua», se registraron las primeras señales procedentes del entorno de un agujero negro, es decir, del resultado del colapso gravitatorio continuo que Oppenheimer y Snyder estaban planteando como una aventurada hipótesis.

En 1928 Karl Guthe Jansky entró a trabajar para los laboratorios Bell Telephone, en un departamento que se ocupaba de perfeccionar el servicio transatlántico de telefonía por radio. Entonces se empezaba a operar dentro de una nueva franja de longitudes de onda, más cortas de lo acostumbrado, y encargaron a Jansky que investigase qué interferencias podían afectar a estas señales. Hacia finales de 1930 terminó de construir una antena orientable, instalada sobre una plataforma rotatoria, capaz de rastrear cualquier ruido electromagnético que acechara las transmisiones. En diciembre de 1932, logró completar un año de observaciones. Su análisis evidenció que las interferencias caían nítidamente dentro de dos categorías: unas las provocaban las tormentas; otras producían «un siseo de estática constan-

LA COMUNIDAD CIENTÍFICA NO CREÍA EN LOS RESULTADOS CONTRAINTUITIVOS DE OPPENHEIMER Y SNYDER

te, de origen desconocido». Jansky no logró determinar la causa de ese misterioso siseo, pero sí localizó dónde estaba la fuente: en el centro de la Vía Láctea.

El descubrimiento mereció una atención mediática moderada. El 5 de mayo de 1933, el titular «Nuevas ondas de radio procedentes del centro de la Vía Láctea» se abrió un hueco en la portada de *The New York Times*. Sin embargo, el hallazgo de una fuente de radio extraterrestre no consiguió atraer financiación suficiente para investigar el fenómeno más a fondo. En los laboratorios Bell casi se lo tomaron a broma. La señal era tan débil que ni siquiera resultaba «interesante como fuente de radiointerferencia». Muy a su pesar, Jansky tuvo que abandonar su estudio y dedicarse a labores más prosaicas. Murió sin oír pronunciar siquiera la palabra «radioastronomía», la nueva disciplina que él mismo había inaugurado en solitario. Hasta la construcción de su antena, la astronomía se había limitado a recoger información del universo a través de la luz visible que llegaba a la Tierra. Jansky abrió una nueva ventana al cosmos, obteniendo información desconocida hasta entonces. Venía cifrada en luz que los ojos humanos no podían percibir: ondas de radio. Jansky también murió sin saber que había sido la primera persona en detectar radiación electromagnética emitida en la vecindad de un agujero negro. En particular, de Sagitario A*, el monstruo gravitatorio que reina en el centro de nuestra galaxia, un agujero negro supermasivo, con un radio de Schwarzschild de más de diez millones de kilómetros.

Puesto que los astrónomos no parecían muy por la labor, fue un ingeniero quien tuvo que recoger el testigo que Jansky se había visto obligado a abandonar. Grote Reber hizo una de las contribuciones más notables y singulares a la historia de los agujeros negros, al más puro estilo estadounidense, cargando él solo con todo el peso de la iniciativa y sin el apoyo de ninguna institución. Reber se familiarizó con las peculiaridades de la luz de longitud de onda larga desde muy joven, como radioaficionado, llegando a establecer contacto con personas de más de cincuenta países. Sin embargo, las emisiones de radio humanas pronto le supieron a poco. La lectura del artículo de Jansky fue providencial y despertó su interés por las ondas de radio que venían de fuera de la Tierra. No sabemos si fue un ferviente seguidor de las revistas *pulp* de ciencia ficción, pero hubiera resultado apropiado, ya que el padre del género, Hugo Gernsback, fue un promotor entusiasta de los radioaficionados. Reber escribió a los laboratorios Bell solicitando trabajar con Jansky, para descubrir consternado que ni el propio Jansky había conseguido el trabajo que tanto anhelaba.

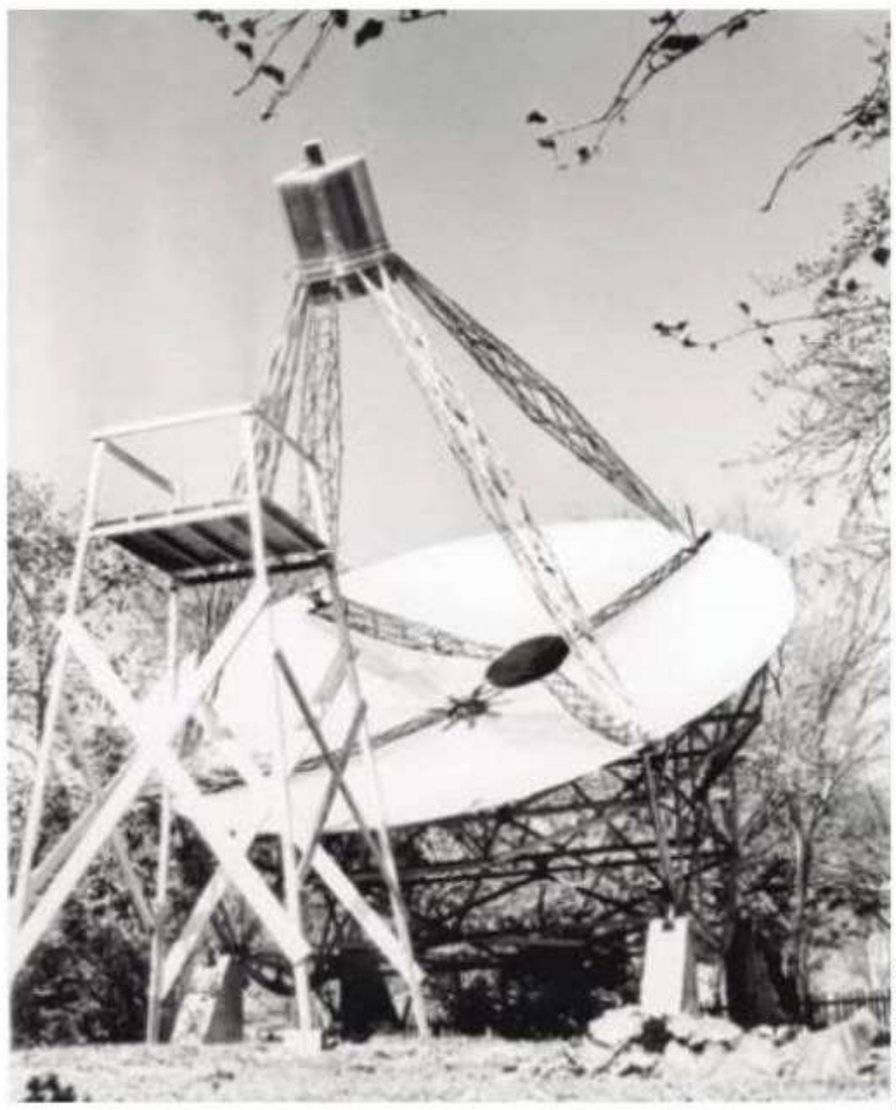
Hubo de aceptar entonces que tendría que hacerlo todo por su cuenta, con sus propias manos, así que se apuntó a varios cursos de óptica y astronomía en la Universidad de Chicago. En lugar de comprarse un coche, siguió yendo al trabajo en autobús, con el fin de ahorrar dos mil dólares que invirtió en la construcción del primer radiotelescopio del mundo. Este adoptaría la característica forma de disco, que reconocemos en las antenas parabólicas que se multiplican en los tejados

REBER HIZO UNA DE LAS CONTRIBUCIONES MÁS NOTABLES Y SINGULARES A LA HISTORIA DE LOS AGUJEROS NEGROS

y fachadas de medio mundo. Es el mismo diseño que podemos encontrar, en un contexto más astronómico, en el cartel de la película *Contact*, detrás de Jodie Foster y Matthew McConaughey. En el verano de 1937, Reber diseñó y fabricó un disco parabólico con un diámetro de casi diez metros. Cuenta la leyenda que lo hizo en el patio trasero de la casa de su madre que, ironías del destino, había sido maestra de Edwind Hubble. No era exactamente el patio trasero que uno imaginaría así, a bote pronto, con su césped, su barbacoa y su canasta de baloncesto, sino más bien un solar adyacente a la vivienda. En cualquier caso, la madre de Reber encontró bastante útil la estructura que había levantado su hijo para tender la ropa a secar. Los habitantes de Wheaton, la localidad de Illinois donde vivían los Reber, no habían visto nada parecido por aquellos lares. Cuando el disco descansaba en posición horizontal y llovía con fuerza, se convertía en una piscina y el agua se derramaba como una catarata a través del agujero que se abría en su centro. Entre los vecinos de Wheaton comenzó a circular el rumor de que el radiotelescopio era en realidad una máquina para acumular lluvia y tratar de controlar el tiempo.



NRAO/ AUI/ NSF



NRAO/ AUI/ NSF

A la izda., Grote Reber en 1975, pionero de la radioastronomía. A la dcha., el primer radiotelescopio de antena parabólica de la historia, construido por Reber.

Nada más lejos de la intención de Reber que hacerse dueño y señor de las tormentas. Con paciencia, fue probando receptores de radio sensibles a diferentes longitudes de onda, que situaba en el foco del disco, hasta que una noche de primavera, en 1939, consiguió sintonizar la señal de Jansky. A partir de ese momento, Reber fue acumulando registros, que tomaba de noche para evitar las interferencias producidas por el arranque de los motores de los coches. Apuntando su disco en todas las direcciones, fue bosquejando el primer mapa de señales de radio del firmamento. En él se fue perfilando la silueta de la Vía Láctea, con sus brazos espirales y un potente foco en el centro: Sagitario A* (figura 6).

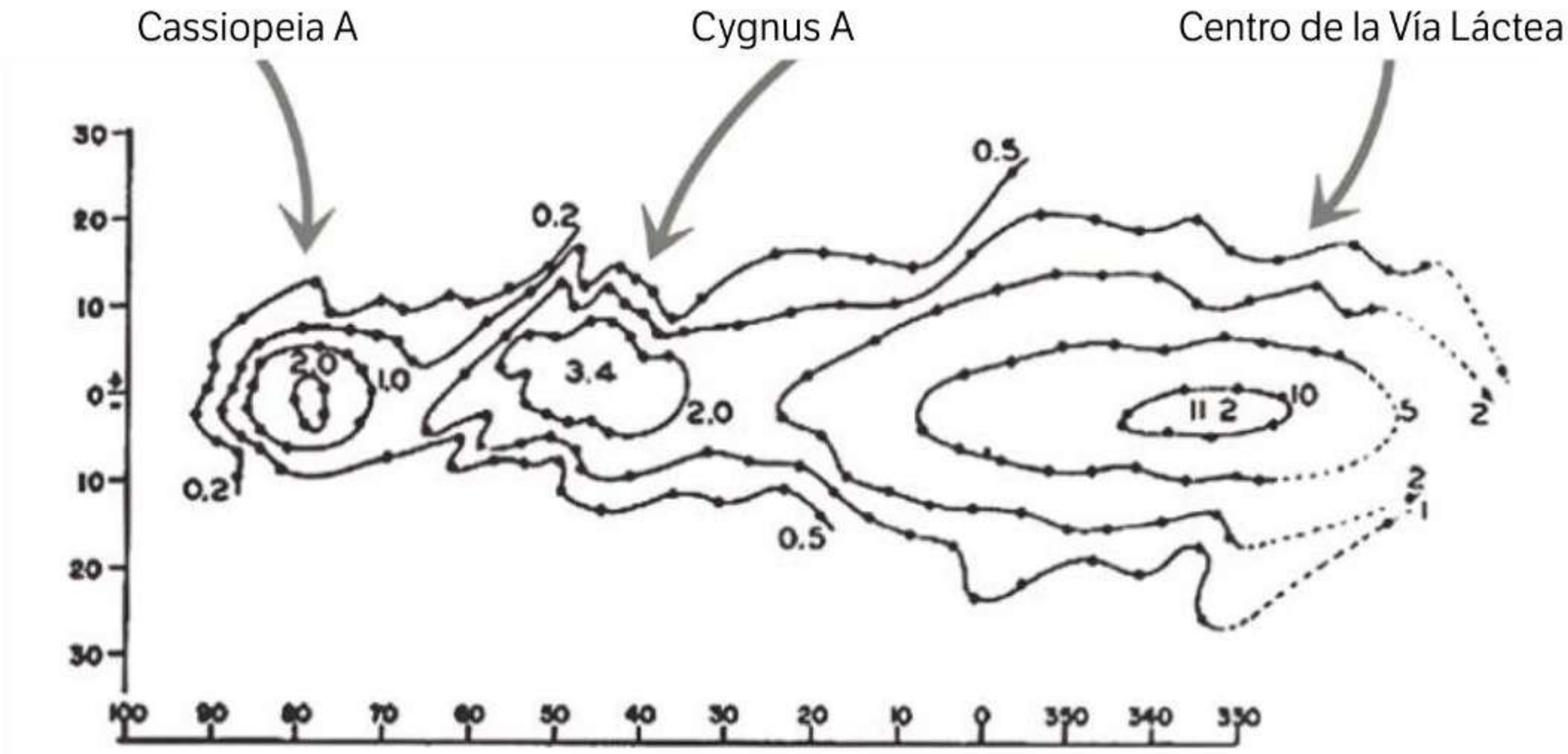


Figura 6. Registro de las señales de radio detectadas por Reber. Tres picos de intensidad revelan la presencia de tres fuentes. Dos de ellas corresponden a agujeros negros supermasivos ubicados en el centro de dos galaxias: Cygnus A y la Vía Láctea. La tercera, Cassiopeia A, corresponde al resto de una supernova que se encuentra situada en nuestra galaxia.

Se trataba de un logro impresionante incluso en un campo, el de la astronomía, famoso por la cantidad y calidad de descubrimientos realizados por aficionados. Sin embargo, a Reber le costó Dios y ayuda publicar un artículo en el *Astrophysical Journal*. El editor de la revista era un viejo conocido nuestro: Subrahmanyan Chandrasekhar. El trabajo de aquel diletante, sin afiliación alguna a una universidad o centro de investigación respetable, despertó tanto interés como suspicacias. Una romería de astrónomos inició entonces el peregrinaje hasta Wheaton, para tratar de discernir si Reber era un embaucador o un genio. El *Astrophysical Journal* acabó publicando su artículo después de un severo trabajo de edición que eliminó detalles técnicos y algunas especulaciones. A estas alturas, la opinión de Reber acerca de los astrónomos era casi tan buena como la de Zwicky. Lamentaba su «incompetencia de mente estrecha» y llegó al convencimiento de que él quería hacer justo «el tipo de cosas en las que no querrían involucrarse jamás las personas con un cargo institucional». Terminó por alegrarse de no tener que soportar la presencia de «pontífices autoproclamados mirando por encima de mi hombro para darme malos consejos».

Sus desencuentros con la ciencia institucional reafirmaron el carácter de lobo solitario de Reber. La sensación de que nadie lo apoyaba mientras trataba de sacar adelante un duro programa experimental produjo un efecto contraproducente cuando algunos astrónomos mostraron un genuino interés por sus logros y le ofrecieron trabajo. La financiación traía consigo someterse a ciertas exigencias administrativas. Para Reber ya era demasiado tarde. Se había acostumbrado a hacer las cosas a su manera y a seguir sus impulsos sin tener que rendir cuentas ante nadie. Declinó todas las ofertas. Durante años disfrutó del privilegio de ser el único radioastrónomo del mundo. Para ser una profesión con un solo trabajador y contar con medios tan modestos, sus resultados fueron extraordinarios. Reber exploró los cielos como quiso, como un *cowboy* solitario, autosuficiente y audaz.

Antes de que terminara la década de 1930, las piezas fundamentales del puzle, aunque dispersas, se hallaban ya encima del tablero. Oppenheimer y Snyder habían sabido leer las ecuaciones de la relatividad general, estableciendo que, en

determinadas circunstancias, las estrellas morían matando, creando una herida profunda en el espacio-tiempo. Su colapso generaba una región de gravedad tan intensa que la aislaba causalmente del entorno. Por otra parte, Karl Jansky y Grote Reber habían detectado ondas de radio que no hubiera podido emitir ningún objeto estelar conocido. Si uno juntaba las dos anomalías, la anomalía teórica y la anomalía experimental, obtenía un esbozo bastante razonable de agujero negro. Claro que esa imagen reveladora solo surgiría décadas después al adoptar una mirada retrospectiva. A finales de los años treinta nadie sabía bien qué representaban esas piezas y mucho menos que pertenecieran al mismo puzle. Ni siquiera se había llegado a medir la intensidad de las ondas de radio que llegaban a la Tierra y, por tanto, no se había podido calibrar hasta qué punto había de ser excepcional el fenómeno que las originase.



ASC

Karl Jansky señalando donde detectó, por primera vez en la historia, ondas de radio del espacio profundo.

Resulta irónico que los artículos fundacionales de la radioastronomía y de la astrofísica relativista los escribieran ingenieros cuyas preocupaciones se hallaban completamente al margen de la relatividad general o de la dinámica de las estrellas. Las investigaciones de Jansky y Reber muestran que para hacer un descubrimiento no basta con reunir pruebas experimentales. Es necesario ubicarlas en un contexto que las dote de significado. En los años treinta del siglo pasado, todavía no se había producido el cambio de mentalidad necesario para interpretar las evidencias bajo una luz adecuada. Se puede establecer un cierto paralelismo con la detección de la radiación de fondo de microondas por parte de Arno Penzias y Robert Wilson. La diferencia estriba en que ellos tuvieron la fortuna de contar con alguien, como Robert Dicke, que sí fue capaz de entender las implicaciones de su descubrimiento, convirtiendo la nueva información, en el acto, en un hallazgo sensacional. Pero, como bien señaló el propio Reber: «Los astrónomos de la época no sabían nada sobre radio o electrónica, y los ingenieros de radio no sabían nada sobre astronomía». Si alguien como Dicke hubiera reconocido la trascendencia de estos primeros registros de ondas de radio procedentes del espacio, Jansky y Reber hubieran recibido un Premio Nobel, como en su día hicieron Penzias y Wilson. El primer Nobel de Física que premió explícitamente evidencias empíricas de la existencia de agujeros negros tendría que esperar hasta 2020, cuando Jansky y Reber llevaban décadas muertos. ■

Tras trabajar en fusión nuclear en los años 50, John A. Wheeler revolucionó la física al acuñar el concepto de «agujero de gusano» (1957) e inmortalizar el término «agujero negro» durante una conferencia en 1967.

SHUTTERSTOCK

LA EDAD DE ORO DE LOS AGUJEROS NEGROS

Resultaba inevitable el colapso de las grandes masas estelares? ¿El pulso titánico entre la gravedad y la presión de radiación solo se podía resolver a través de la formación de una enana blanca o de una estrella de neutrones? Chandrasekhar y Oppenheimer ya se habían pronunciado al respecto, proporcionando claros indicios de que existía una tercera vía, mucho más oscura, que la comunidad de astrónomos no se mostraba muy dispuesta a considerar. Ni Chandrasekhar ni Oppenheimer saltaron realmente a la arena para partirse la cara por sus ideas incómodas. Chandrasekhar era demasiado joven para medirse en una pelea con Eddington y se resignó a trabajar en otros frentes, a la espera de que cambiara la dirección del viento. Tras la Segunda Guerra Mundial, Oppenheimer pareció perder todo interés por los agujeros negros. Cierto es que la resaca política y militar del Proyecto Manhattan se empeñó en mantenerlo alejado de una plácida vida de investigación. Con todo, siempre que pudo tomarse un respiro prefirió dirigir su atención hacia otras cuestiones que nada tenían que ver con el colapso estelar, como las teorías cuánticas de campos. ¿Por qué Oppenheimer dejó de investigar un fenómeno tan intrigante, que muchos consideran su principal legado científico? Uno de sus colaboradores, Freeman Dyson, definió esta deserción como «el misterio más llamativo en la vida de Oppenheimer». Los dos trabajaron durante años en el Instituto de Estudios Avanzados de Princeton y Dyson no dejó pasar la oportunidad de importunarle un poco con su curiosidad: «En varias ocasiones, le pregunté por qué no volvía a trabajar en [los agujeros negros]. Nunca respondió a mi pregunta, siempre cambiaba de tema».



CAMBRIDGE

Retrato del joven Subrahmanyan Chandrasekhar en la Universidad de Cambridge (1934).

Aunque Oppenheimer no volvió a tocar el asunto, las investigaciones en física nuclear de Estados Unidos —a las que tantos esfuerzos había dedicado— ofrecieron una inesperada continuidad a su análisis del colapso estelar, que conduciría sin desvíos hacia la singularidad. Para avanzar en el estudio de la muerte de las estrellas, había que incorporar más detalles al modelo que Oppenheimer había elaborado con ayuda de Snyder. Había que tener en cuenta la radiación de la estrella, había que dotarla de presión y reacciones nucleares, había que considerar las pérdidas de masa que pudiera sufrir... Estas mejoras en la simulación exigían más capacidad computacional, ya que cada nueva capa de realismo que se quisiera añadir volvía las ecuaciones mucho más complejas. Y precisamente el poder computacional y el conocimiento más profundo de la física nuclear fueron dos regalos inesperados del Proyecto Manhattan.



UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY

Prueba nuclear Bravo en el atolón de Bikini, con una potencia de quince megatones. Este experimento termonuclear de superficie formó parte de la histórica Operación Castle.

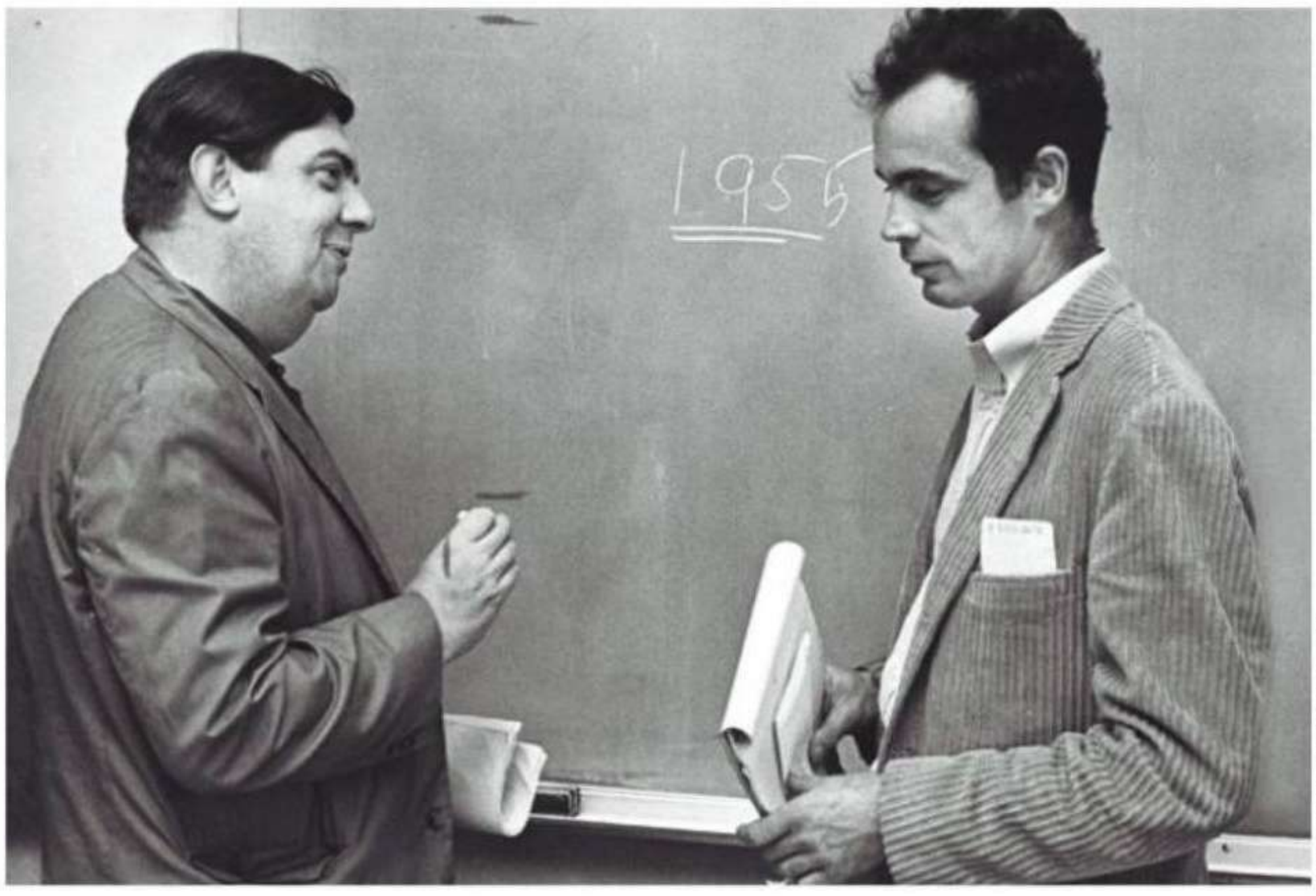
Las bombas de Hiroshima y Nagasaki forzaron la rendición incondicional de Japón y la abrupta caída del telón sobre el drama bélico, un telón que se volvería de acero. A pesar de la desmovilización, muchos físicos del bando ganador siguieron comprometidos con el desarrollo de programas militares. Stirling Colgate —su familia, en efecto, estaba vinculada a la famosa marca de pasta de dientes— formaba parte de ese colectivo de científicos que en Estados Unidos continuó trabajando en el diseño de armas nucleares. En particular, contribuyó a la consolidación de una segunda generación de bombas, más letales, centradas en el proceso de fusión y no en el de fisión, las famosas bombas de hidrógeno o bombas termonucleares. Con el paso de los años, sin embargo, y para combatir la monotonía, comenzó a hacer pequeñas incursiones en el estudio de la evolución estelar. Esta deriva resultaba de lo más natural, ya que en el corazón de una estrella y de una bomba termonuclear late el mismo fenómeno: reacciones de fusión.

LAS BOMBAS DE HIROSHIMA Y NAGASAKI FORZARON LA RENDICIÓN INCONDICIONAL DE JAPÓN

LA FÍSICA NUCLEAR, LA RELATIVIDAD GENERAL Y LA INFORMÁTICA RESCATÓ A LOS AGUJEROS NEGROS DEL OLVIDO CIENTÍFICO

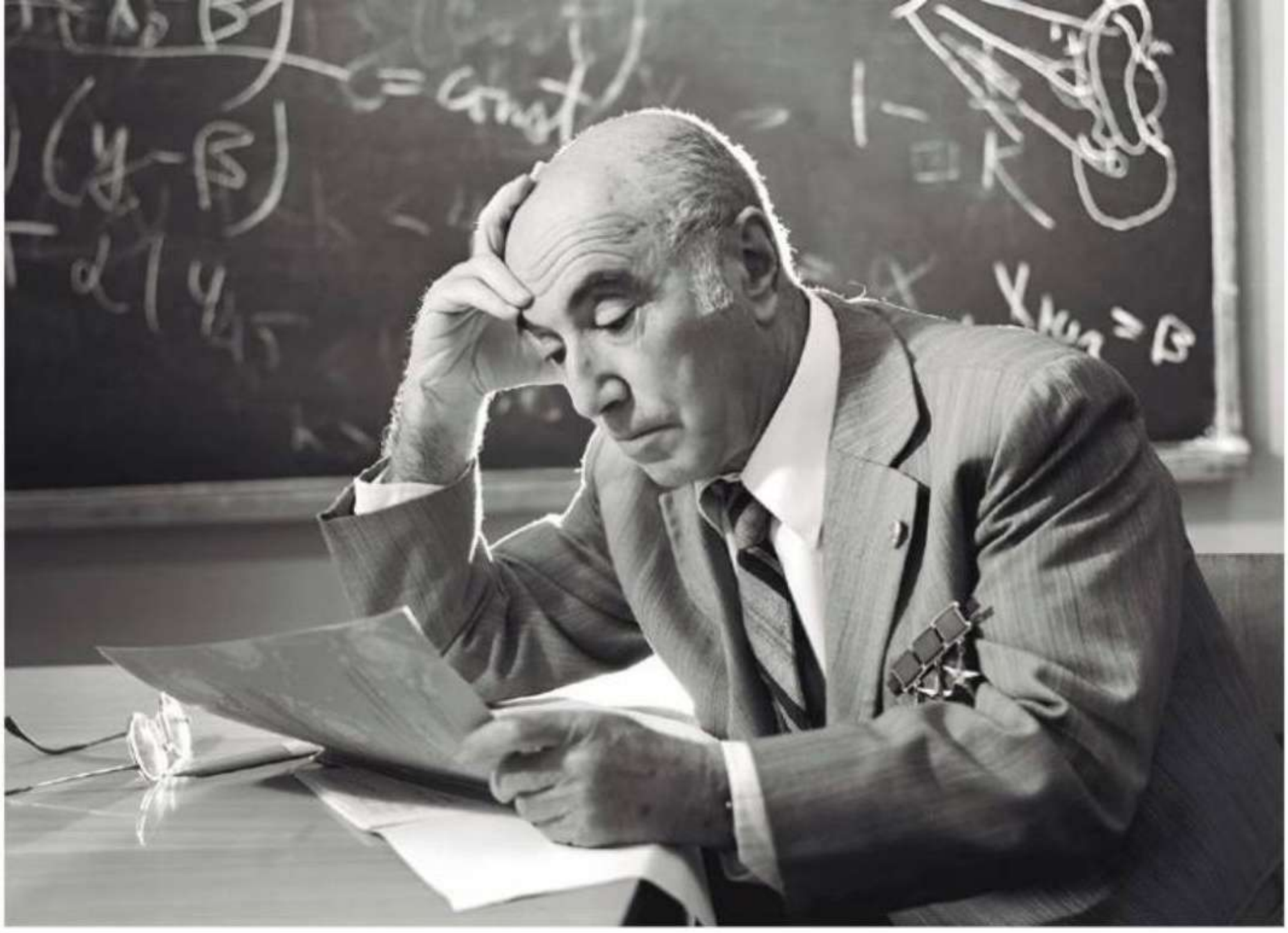
Como acabamos de apuntar, la guerra había suministrado además armas de incalculable valor para renovar el ataque a las ecuaciones de la relatividad: las primeras computadoras electrónicas digitales. Colgate aprovechó su bagaje en física nuclear y en el diseño de modelos computacionales complejos para abordar el colapso de las grandes masas. Le llevó varios años armar un modelo estelar mucho más completo que el de Snyder y Oppenheimer, que solo se alejaba de la realidad en dos aspectos fundamentales: la forma de la estrella, que seguía siendo una esfera perfecta, y su estado de movimiento, ya que tampoco rotaba. Sus resultados, que dio a conocer en la década de 1960, se ajustaban en esencia a las conclusiones del primitivo cálculo de 1939. El trabajo de Colgate vino así a celebrar el ojo clínico de Oppenheimer a la hora de escoger los factores decisivos en el análisis de un problema físico complejo. El colapso parecía inevitable.

¿O no? Dos físicos soviéticos, Isaak Khalatnikov y Evgeny Lifshitz, hicieron una valoración muy distinta de la simulación de Colgate. A su juicio, a pesar de haber ganado en realismo, su modelo seguía asumiendo una condición que echaba por tierra sus deducciones. En la Unión Soviética se había producido una reconversión muy semejante a la que habían experimentado los científicos estadounidenses que habían participado en los programas nucleares. Tras completar su trabajo en el desarrollo de las bombas de hidrógeno, muchos soviéticos cambiaron de tercio en torno a la década de 1960 para aplicar todo el conocimiento atesorado



MITHSONIAN INSTITUTION ARCHIVES

Las investigaciones teóricas de Geoffrey R. Burbidge y Stirling Colgate ayudaron a sentar las bases para comprender los fenómenos más energéticos del universo.

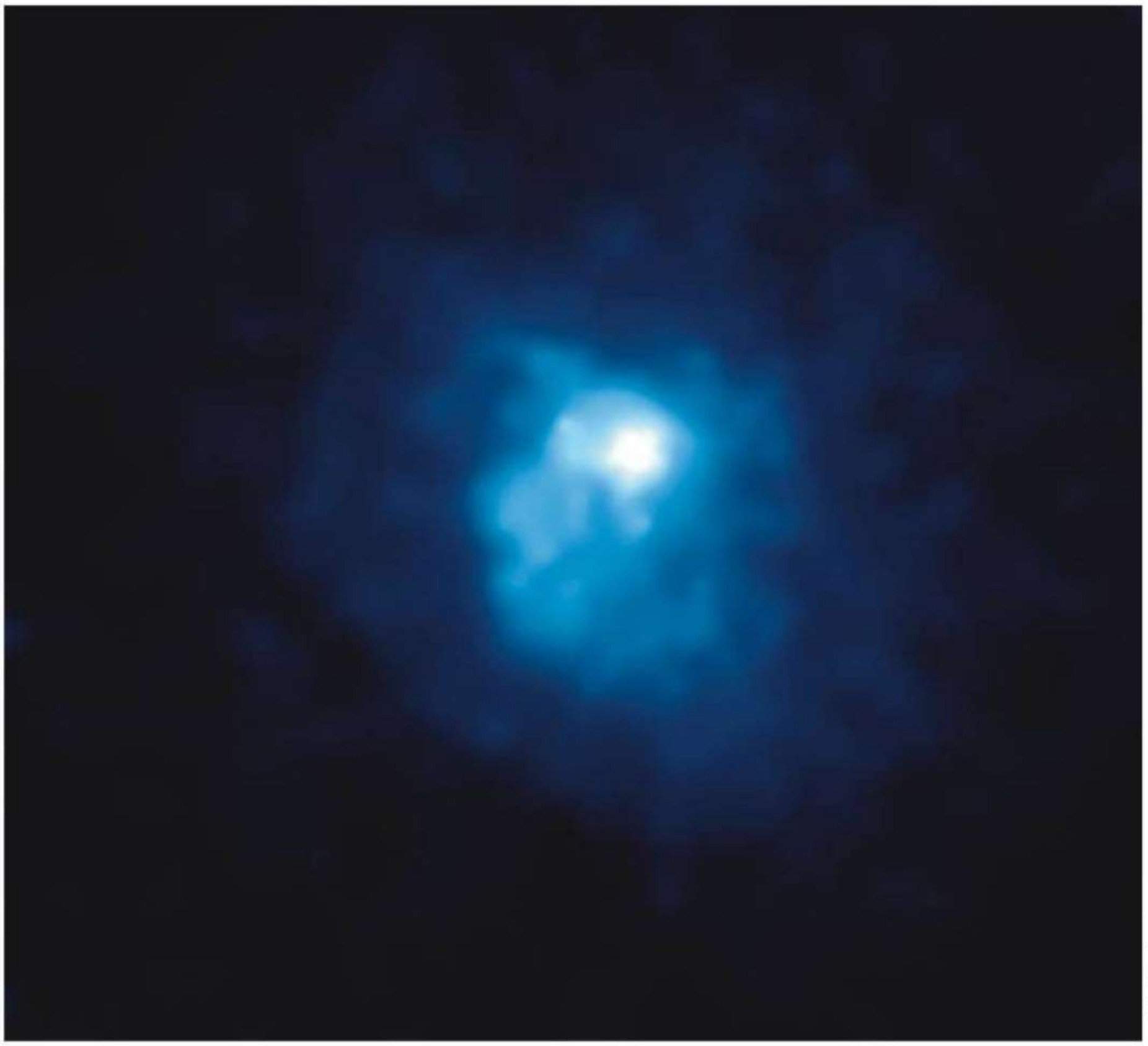


ANATOLY MORKOVKIN / PHOTOCHRONICA TASS

El físico y académico soviético Yákov Zeldóvich fue pionero de la cosmología, sus teorías revolucionaron el estudio de los agujeros negros y la estructura a gran escala del cosmos.

sobre física nuclear al estudio de la evolución de las estrellas. Realmente se podrían escribir unas *Vidas paralelas* a partir de las trayectorias de algunos de los principales artífices de la vindicación y rehabilitación de los agujeros negros como materia seria de estudio. A la cabeza del bando estadounidense figuraría John Wheeler; en el bando soviético, lo haría Yákov Zeldóvich. Zeldóvich, al igual que Wheeler, fundó además un grupo de investigación muy activo en relatividad general. A ese grupo pertenecían Isaak Khalatnikov y Evgeny Lifshitz. El maridaje de física nuclear, relatividad general y computación terminaría por sacar a los agujeros negros del ostracismo científico al que habían sido condenados desde el mismo día de su nacimiento.

Khalatnikov y Lifshitz estaban convencidos de que la perfecta esfericidad del modelo de Colgate condenaba a su masa estelar virtual a desfilar ordenadamente hacia un mismo centro. No era de extrañar que su destino fuera entonces una implosión completa que daría lugar a una singularidad, como en efecto habían deducido Oppenheimer y Snyder partiendo de la misma restricción. Durante mucho tiempo, los físicos que investigaban el colapso estelar miraron con suspicacia los modelos que exhibían una perfecta simetría esférica precisamente porque muchos de ellos habían trabajado en el diseño de armas nucleares. Las primeras bombas de fisión se detonaban comprimiendo una masa de plutonio hasta hacerla alcanzar una densidad crítica. Para que el proceso tuviera éxito, resultaba crucial que la presión se ejerciera con la misma fuerza en todas las direcciones. Esto se conseguía disponiendo una serie de explosivos químicos alrededor del plutonio de acuerdo con una perfecta simetría esférica. Eran las ondas de choque de estos explosivos las que ejercían una presión de compresión homogénea. Este modelo, llamado de implosión, fue el que se utilizó en la primera prueba de Trinity y en la bomba de Nagasaki. Así, la experiencia en ingeniería nuclear ligó íntimamente la implosión y la simetría esférica en la mente de muchos físicos.



NASA/ CXC/ CFA/ R. P. KRAFT

La galaxia central 3C438, capturada por el observatorio Chandra, revela una estructura en forma de colosal arco de gas caliente de dos millones de años luz de largo.

Cuando la muerte estelar parte de una distribución asimétrica de materia, sostenían Khalatnikov y Lifshitz, se rompe la artificiosa sincronización que conduce al colapso y a la formación de una singularidad. El tirón gravitatorio ya no induce el mismo movimiento en todos los puntos de la masa de la estrella. Puede hacer incluso que esta se disgregue y que no todas las trayectorias de los fragmentos se dirijan exactamente al mismo centro o que diversos pedazos lo alcancen en momentos diferentes. En definitiva, gran parte de las masas que se precipitan atraídas por la gravedad quizá se crucen sin llegar a tocarse y se alejen a continuación unas de otras, de modo que la contracción incluso se revierta y se transforme en una dispersión.

El único modo de averiguar qué veredicto dictaba realmente la relatividad general sobre la suerte de las estrellas muy masivas consistía en interrogar sus ecuaciones en un contexto plenamente realista. Khalatnikov y Lifshitz acometieron esa labor en 1961 tras sus críticas a Colgate. Pretendían demostrar que cualquier asimetría en la distribución de la materia de una estrella se acentuaría durante la implosión. Esta divergencia creciente respecto a un proceso de contracción uniforme y ordenado cortaría la vía hacia la formación de una singularidad. En su demos-

tración adoptaron el enfoque de la vieja escuela relativista, desplegando las ecuaciones de Einstein en todo su esplendor y tratando de no perderse a continuación en su abrumadora complejidad. De su análisis concluyeron que existían soluciones tanto con singularidad como sin ella. Sin embargo, las soluciones que presentaban singularidades correspondían siempre a distribuciones de materia extravagantes, que no se darían en la naturaleza. Para respaldar esta tesis, mostraban una sola solución explícita con singularidad. Según ellos, el resto de soluciones singulares respondían al mismo patrón, punto que no demostraron.

A pesar de poner encima de la mesa argumentos de peso, Khalatnikov y Lifshitz no llegaron a probar que todas las soluciones con singularidad obedecieran a un mero capricho matemático de imposible implementación en la naturaleza. Además, su análisis —extremadamente arduo e intrincado— dejaba amplio margen a la comisión de algún error que invalidara sus razonamientos. Mientras la pequeña comunidad de expertos en relatividad general se aplicaba a desenredar la madeja de sus cálculos, el debate se mantenía vivo.

Khalatnikov y Lifshitz no eran los únicos convencidos de que las estrellas no podían, o no debían, colapsar. Al otro lado del telón de acero, el estadounidense John Wheeler lideraba la oposición a las ideas de Chandrasekhar, Oppenheimer o Snyder, explorando una vía radicalmente distinta a la de los físicos soviéticos. Una vía que, para sorpresa de propios y extraños, lo forzaría a cambiar de bando. Stephen Hawking se refirió a Wheeler en cierta ocasión como el «héroe de la historia de los agujeros negros». Nada parecía augurar que estuviera destinado a interpretar ese papel, ya que comenzó invirtiendo todos sus esfuerzos en barrerlos de la faz del universo.

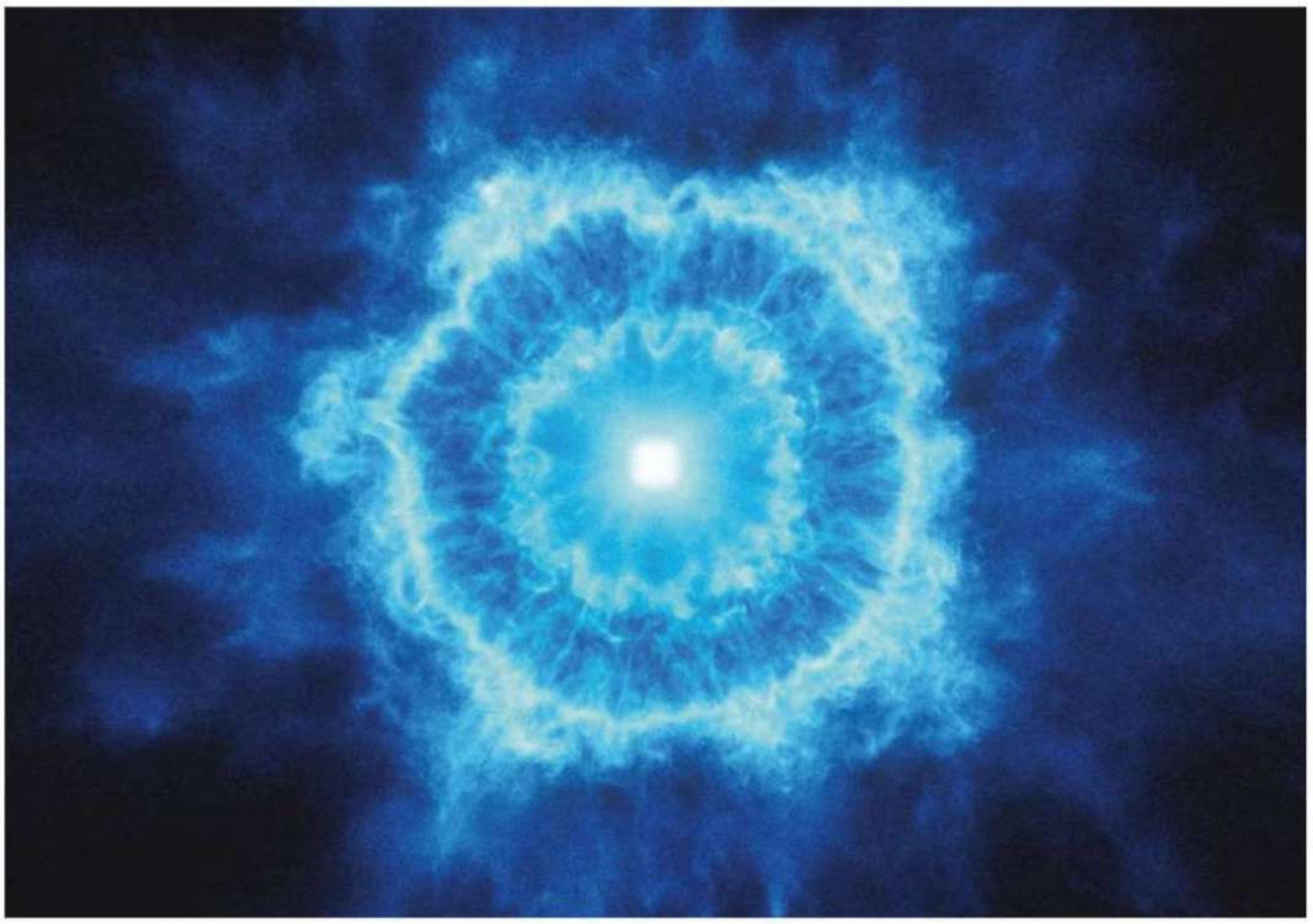
WHEELER CONTRA OPPENHEIMER

La trayectoria profesional de Wheeler había seguido los mismos pasos que otros físicos, tanto soviéticos como estadounidenses, que sacaron la investigación sobre agujeros negros de su punto muerto. Para empezar, era un experto en física nuclear. Había trabajado con Niels Bohr en Copenhague en la elaboración de un modelo capaz de explicar el mecanismo de la fisión, apenas un año después de que se descubriera el fenómeno. Uno de sus artículos apareció en la revista *Physical Review* el 1 de septiembre de 1939, con toda oportunidad, el mismo día que las tropas alemanas iniciaban la invasión de Polonia. Era el mismo día en el que se había publicado también, en la misma revista, el artículo de Oppenheimer y Snyder sobre el colapso estelar. Con este currículum nuclear a sus espaldas, Wheeler parecía un candidato ideal para que lo reclutaran para el Proyecto Manhattan. Y así fue. Una vez concluida la guerra, pasó de la fisión a la fusión. Wheeler no solo sobrepasaba a otros físicos en conocimientos, sino también en motivación para impulsar la investigación científica con fines militares.

EL TIRÓN GRAVITATORIO YA NO INDUCE EL MISMO MOVIMIENTO EN TODOS LOS PUNTOS DE LA MASA DE LA ESTRELLA

TRAS EL BOMBARDEO A JAPÓN, MUCHOS FÍSICOS CONSIDERARON QUE SU TRABAJO HABÍA SIDO SUFICIENTE

Cinco años después de que comenzara la Segunda Guerra Mundial, Wheeler recibió una postal que le enviaba su hermano pequeño, Joseph, desde el frente italiano. Contenía solo dos palabras: «¡Daos prisa!». Aunque el objeto de las investigaciones de Wheeler era secreto, su hermano sabía que colaboraba con los militares y solo necesitaba sumar dos y dos para establecer una conexión entre sus actividades presentes y el trabajo que había desarrollado antes con Bohr. Joseph confiaba en que la fisión nuclear acelerase el final de la guerra. Al poco de escribir la postal, murió en una escaramuza con soldados alemanes. Sus restos recibieron sepultura en un cementerio cerca de Florencia. Wheeler nunca olvidaría el mensaje —literal y simbólico— de la postal de su hermano: «Siempre que visito la tumba de Joe, recuerdo que la suya fue una de las muchas vidas — entre muchos millones, calculo, tanto de soldados como de civiles— que se podrían haber salvado si los Aliados hubieran desarrollado la bomba atómica un año antes». Esta convicción lo distanció de otros compañeros, como Oppenheimer, que experimentaron sentimientos encontrados hacia la responsabilidad que habían contraído por haber precipitado al mundo a una era nuclear. Numerosos físicos, sobre todo después del lanzamiento de las bombas contra Japón, juzgaron que ya habían hecho suficiente



SHUTTERSTOCK

Recreación de un campo de energía y reacciones de fusión extrema, similares a los violentos procesos físicos que anteceden al colapso y nacimiento de un agujero negro.

(o demasiado). Sin embargo, la mera existencia de un antagonista formidable, ya fuera Alemania o la Unión Soviética, anulaba para Wheeler todos los matices, todos los reparos. «A veces me preguntan cuál es la aplicación más importante de la energía nuclear en tiempos de paz —declaró—. Mi respuesta es simple: un dispositivo nuclear que mantenga esa paz».

Solo después de que se hubieran resuelto los principales problemas técnicos de las bombas termonucleares, a comienzos de la década de 1950, se permitió Wheeler regresar al estudio de la física fundamental. Los agujeros negros se cruzaron en su camino casi por casualidad, mientras andaba a la caza de nuevos temas de investigación que pudieran despertar su interés. Por aquel entonces, si uno pretendía estar a la última, lo que estaba arrasando en los departamentos de física teórica de medio mundo eran las teorías cuánticas de campos —un afortunado mestizaje entre mecánica cuántica y relatividad especial—. En materia científica, sin embargo, Wheeler se resistía a seguir las modas: «Cuando veo un rebaño que corre en una dirección, me gusta seguir otra distinta». Desde luego, no podía elegir nada más apartado de la moda del momento, más *retro* o *vintage*, que la relatividad general.



EMILIO SEGRÈ. VISUAL ARCHIVES, WHEELER COLLECTION.

El físico estadounidense John A. Wheeler durante sus años académicos en la década de 1930.

Como vimos anteriormente, la relatividad general había disfrutado de un período de esplendor clásico, con la forja de las ecuaciones de Einstein y la solución de Schwarzschild, pero luego se había sumido en su particular Edad Media, una época de oscuridad provocada por la endiablada dificultad de sus ecuaciones. Ciertamente se había producido un desplazamiento pendular. El paso de las décadas había acabado enfriando la excitación inicial ante las novedades y los físicos prácticamente habían terminado por guardar en un cajón la reinterpretación de la gravitación formulada por Einstein. Dos motivos explican este abandono. Por un lado, estaba la complejidad formal de la teoría, que alzaba a su alrededor un muro infranqueable y desalentador. Por otro lado, la relatividad general se desmarca con claridad de los vaticinios newtonianos allí donde la curvatura del espacio-tiempo se vuelve muy acusada o varía con rapidez, condiciones extremas que ningún científico era capaz de reproducir en un laboratorio. Se contaban, literalmente, con los dedos de una mano los experimentos que se podían realizar para poner a prueba la teoría.

Al parecer, solo quedaba una alternativa. Dejar el trabajo duro a la naturaleza y espiar a ver qué hacía, pero en las primeras décadas del siglo XX los astrónomos no disponían aún de la tecnología observacional necesaria para advertir las discrepancias entre las predicciones newtonianas y las relativistas, tanto las más

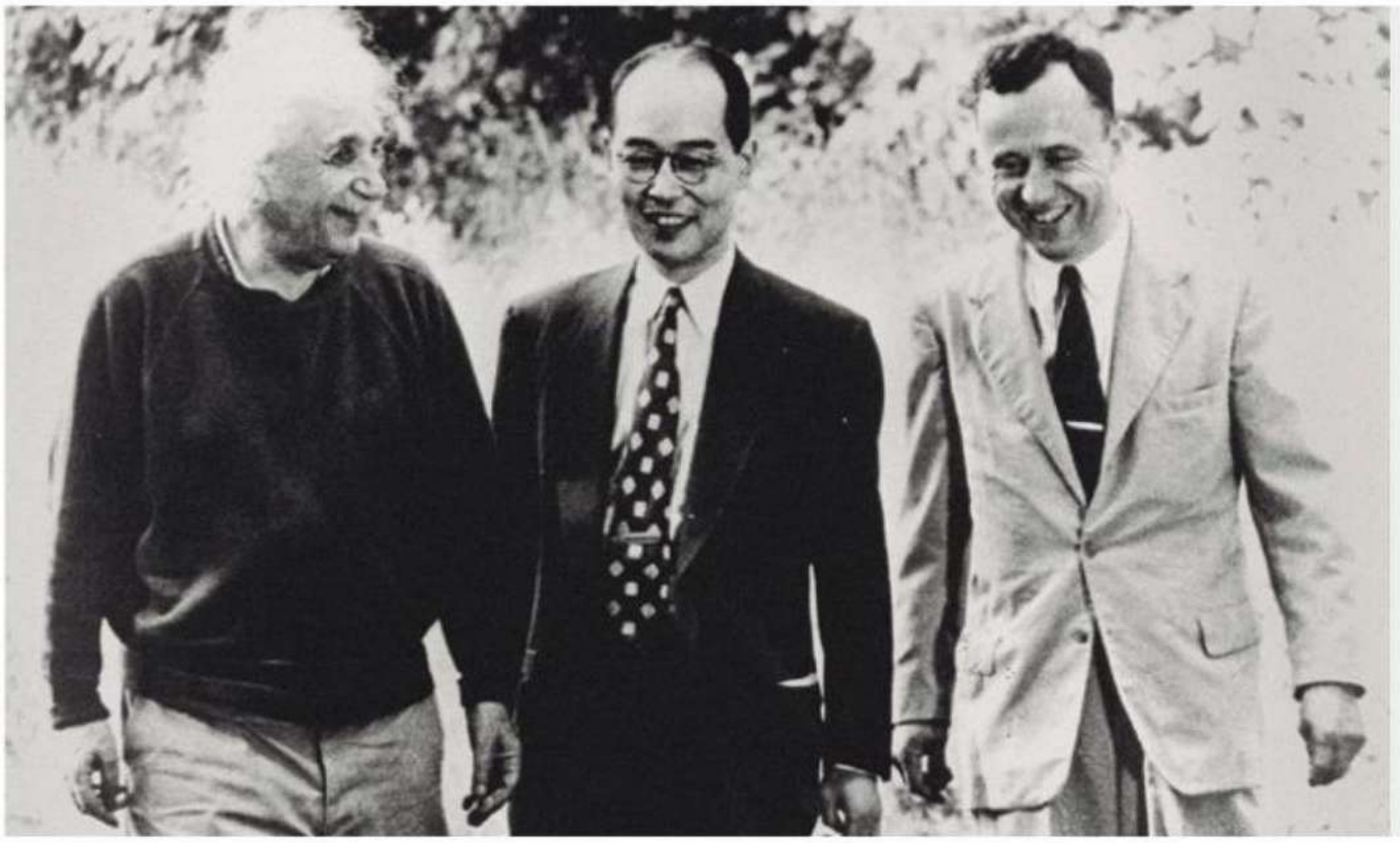
sutiles, que se manifiestan en el entorno inmediato de la Tierra, como las más llamativas, que se revelan muy lejos del sistema solar. La aceptación de la teoría se basaba en que podía reproducir todas las predicciones ya verificadas de la ley de gravitación universal y acertar además en dos casos muy concretos, donde aquella fallaba. Las dos pruebas experimentales clásicas que avalaban la relatividad general eran su predicción del grado de desviación que impone la masa del Sol a los rayos luminosos procedentes de estrellas lejanas y su descripción del comportamiento orbital anómalo del planeta más afectado por la gravedad solar, Mercurio. También se había intentado verificar el desplazamiento al rojo, pero con resultados que no eran del todo concluyentes. No había más evidencias empíricas que alegar y tampoco se esperaba que en un futuro próximo los científicos pudieran someter la teoría a un programa de pruebas más exhaustivo.

El bloqueo de las vías experimental y teórica lastró la relatividad general y acabó motivando una paulatina pérdida de interés hacia ella. El foco de la atención se desplazó entonces a la mecánica cuántica, una teoría conceptualmente más desafiante que, sobre todo, nunca perdió el contacto con los laboratorios. En su formulación, los hallazgos teóricos y experimentales se sucedían. Los descubrimientos planteaban incógnitas que la teoría debía resolver y la teoría hacía predicciones que los experimentos verificaban. Esta sinergia, estimulante y productiva, pronto derivó en toda suerte de aplicaciones tecnológicas, una dinámica que no se pudo llevar a la práctica en el caso de la relatividad general.

Entre las décadas de 1920 y 1950 se alcanzó lo que algunos historiadores han gustado llamar la «línea de la bajamar de la relatividad general»: un éxodo de físicos a otros campos de investigación que ofrecían mejores perspectivas profesionales, como la mecánica cuántica, la física de partículas o la física nuclear. Durante este periodo gris, la llama de la teoría se mantuvo viva gracias, sobre todo, al entusiasmo de un grupúsculo marginal y disperso de matemáticos, atraídos por la dificultad y la belleza formal de sus ecuaciones. Su particular idiosincrasia impedía que fueran más allá de los aspectos algebraicos o geométricos. Stephen Hawking describió así su labor: «Se alegraban tanto de encontrar cualquier solución a las ecuaciones de campo de Einstein [...] que no se preguntaban acerca de su significado físico, si es que tenía alguno».

Este fue el panorama que se encontró Wheeler cuando, en 1952, quiso crear un nuevo curso de relatividad general en la Universidad de Princeton. Era el primero que se programaba sobre la materia en dicha universidad desde 1941. En los tiempos en los que Einstein se había estado peleando con las ecuaciones fundamentales de la teoría, algunos matemáticos habían expresado su opinión de que debía dar un paso atrás y dejarles a ellos el trabajo. David Hilbert había manifestado en más de una ocasión esa convicción: «La física se está volviendo demasiado compleja para dejársela a los físicos». En la década de 1950, después de conocer cuál era el estado de la relatividad general, Wheeler expresó la preocupación contraria:

WHEELER SE INTERNÓ EN LA RELATIVIDAD GENERAL PARTIENDO DE UN TERRITORIO QUE CONOCÍA BIEN, LA FÍSICA NUCLEAR



JOHNS HOPKINS UNIVERSITY

De izquierda a derecha: Albert Einstein, Hideki Yukawa y John A. Wheeler en Princeton en 1954, un año clave para la transición de Wheeler hacia el estudio de la gravedad.

«Es demasiado importante para dejársela a los matemáticos». Einstein no hubiera podido estar más de acuerdo con él. Había llegado la hora de que los físicos reconquistaran el campo relativista.

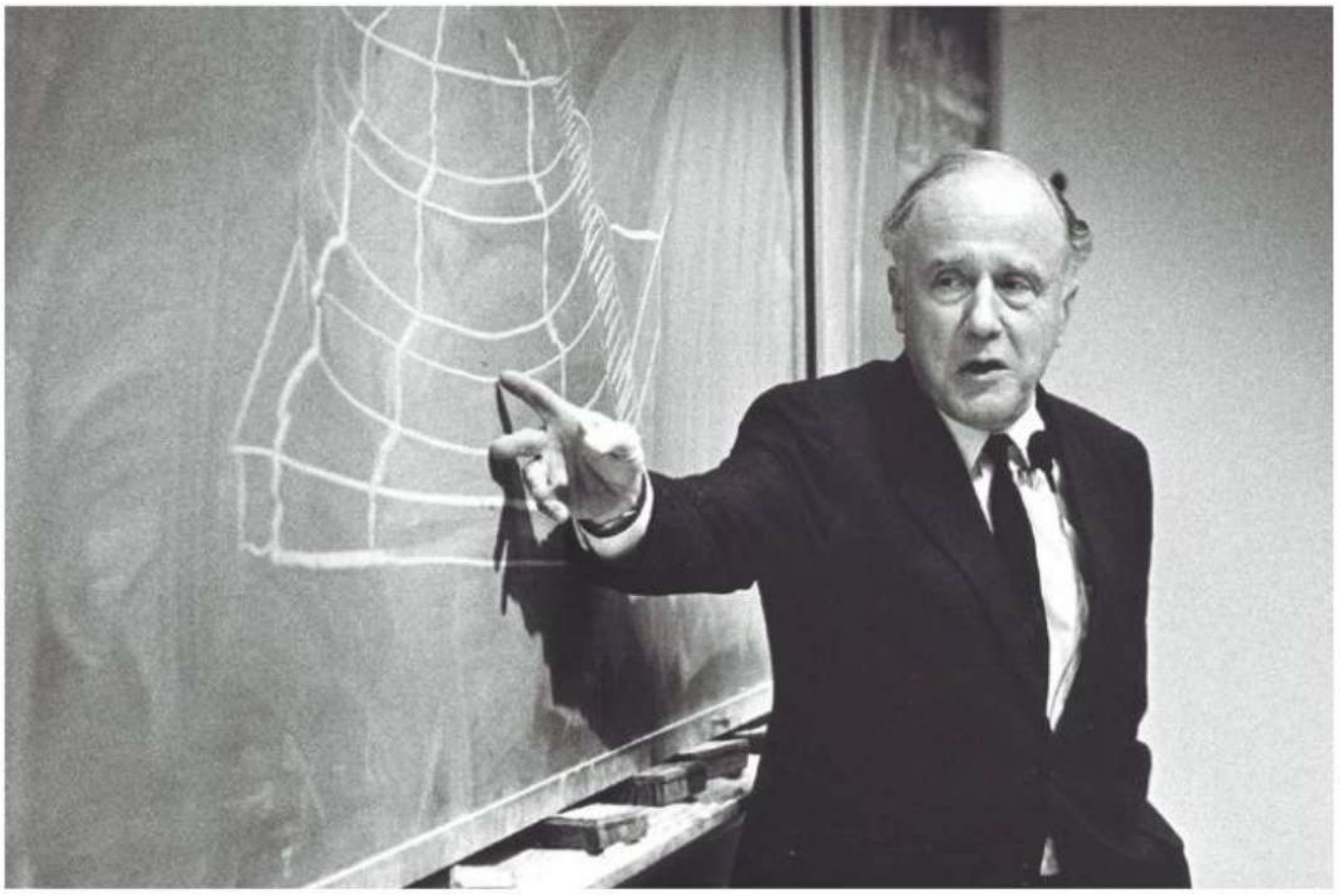
Wheeler se internó en la relatividad general partiendo de un territorio que conocía bien, la física nuclear. El puente que cruzó, que conectaba ambas disciplinas, fueron precisamente los dos artículos sobre dinámica estelar que Oppenheimer había escrito en colaboración con Volkoff y Snyder a finales de la década de 1930. Fue el segundo artículo en particular el que lo sedujo. Como si se tratara de un encantamiento, su lectura lo empeñó en la resolución del misterio del colapso de las estrellas muy masivas. Antes de abordar tan ardua tarea, debía ponerse al día. Esa fue la razón de que solicitara a las autoridades de la Universidad de Princeton, donde trabajaba, permiso para crear un nuevo curso de relatividad. El mejor modo de dominar una materia que no conocía a fondo era verse obligado a enseñarla. Wheeler pasó un año tomando notas para preparar sus clases y, una vez completado el curso, después de repasarlas, se convenció de que había encontrado un filón que hasta entonces nadie había sabido explotar. Así mediría, años más tarde, el impacto que le produjo aquel curso: «[fue] mi primer paso en un territorio que se adueñaría por completo de mi imaginación y que dominaría mi atención investigadora durante el resto de mi vida».

Resultaba significativo que las singularidades se presentaran en regiones en las que la curvatura del espacio-tiempo se volvía infinita y sometía a tensiones extremas a la materia que se internaba en ellas. No existía ninguna región de esas características en el sistema solar y los físicos no tenían modo de crearlas en un laboratorio. Por tanto, la descripción que hacía de ellas la relatividad general no había superado todavía ninguna verificación experimental. ¿Qué camino seguir entonces? John Wheeler lo tenía claro. Como tuvimos ocasión de ver en páginas

anteriores, un rasgo esencial de la gravitación einsteiniana es que sus ecuaciones no tienen en cuenta la estructura interna de la materia. Para ellas, la masa es un mero valor, un número, como la densidad o el volumen, que puede crecer o disminuir de manera continua, se puede reducir a cero o aumentar hasta volverse infinito. Las ecuaciones no se preocupan por lo que pueda ocurrirle a las partículas e interacciones que integran la materia en un proceso de contracción radical, por ejemplo. Pero ¿cómo se comportarían los neutrones y electrones durante el colapso estelar? ¿Las interacciones nucleares y electromagnéticas podrían interferir con la gravedad de algún modo, modificando el desenlace de la implosión? La relatividad, por sí sola, no tenía nada que decir al respecto. No tomaba en cuenta ninguna información sobre la composición de la materia, que caracterizaba muy superficialmente. En suma, no era cuántica. Una descripción cabal del fenómeno del colapso gravitatorio había de ser relativista, pero también cuántica.

Así que había que fundar un nuevo marco conceptual, que incorporase simultáneamente ambas teorías. Lo que el propio Wheeler denominaba el «matrimonio ardiente». La idea tenía sentido, pero nadie sabía muy bien cómo llevarla a la práctica, porque los formalismos de la relatividad general y la mecánica cuántica parecían absolutamente incompatibles. La gravedad cuántica era una salsa que, o bien no ligaba, o bien se cortaba.

Si el humo delata dónde se ha encendido una hoguera, Wheeler sospechaba que las paradojas, las singularidades o las inconsistencias señalan dónde hay que buscar pistas para ampliar una teoría. Al llevarla al límite, al sacarla de su zona de confort, es probable que surjan problemas. Esos problemas son los que ofrecen indicios sobre las reformas que se deben acometer. Los agujeros negros llevaban al



AIP EMILIO SEGRÈ VISUAL ARCHIVES/ WHEELER COLLECTION

John A. Wheeler impartiendo su célebre conferencia «Más allá del fin del tiempo» en la Universidad de Misuri en Rolla, explicando la geometría del espacio-tiempo.

LA POSTURA DE OPPENHEIMER SOBRE LAS ARMAS ATÓMICAS FUE SUMAMENTE COMPLEJA

límite a la relatividad general y el artículo de Oppenheimer y Snyder encerraba sin duda una paradoja prometedora, con sus dos puntos de vista contradictorios sobre el colapso estelar. Un observador estático asistía a una implosión que se ralentizaba hasta quedar detenida. Un observador en movimiento advertía, sin embargo, que el mismo fenómeno progresaba de manera uniforme y continua hasta el final. Wheeler veía en esa discrepancia una grieta por la que acceder a un estrato más profundo de conocimiento. Ahí podían radicar las claves para una nueva física, para una teoría cuántica de la gravedad.

Oppenheimer no podía estar más en desacuerdo con él. No era el único asunto sobre el que discrepaban. También lo hacían sobre cuestiones de seguridad nacional o sobre cómo enfocar la propia investigación científica. La actitud de Oppenheimer con respecto a la creación de armas atómicas fue tan compleja como la cuestión merecía. Cuando vio cómo el hongo nuclear florecía por primera vez, en plena desolación, en el desierto Jornada del Muerto de Nuevo México, en julio de 1945, resonaron en su mente las palabras de uno de sus libros favoritos, la *Bhagavad-gītā*: «Ahora me convierto en la Muerte, la destructora de mundos». Tras la experiencia de Hiroshima y Nagasaki, Oppenheimer manifestó muy poco entusiasmo por el desarrollo de una nueva generación de armas nucleares, mientras que Wheeler se convirtió en un firme promotor del programa de bombas de hidrógeno. Ambos se tenían una natural antipatía que, siendo vecinos en Princeton, sobrellevaban con distancia y educación.

Tras la Segunda Guerra Mundial, se inició una campaña para desacreditar a Oppenheimer, tratando de sembrar dudas sobre su lealtad, acusándolo de ser un agente soviético o de entorpecer el estudio y creación de las bombas de fusión. La investigación pseudoficial a la que fue sometido en 1954 se sostuvo en parte sobre los testimonios de diversas personas que habían colaborado con él. A uno de los principales artífices de la bomba de hidrógeno estadounidense, Edward Teller, le invadieron las dudas sobre cómo debía enfocar su comparecencia. No llegaba a cuestionar la lealtad de Oppenheimer, pero su relación con él había sido difícil durante el Proyecto Manhattan y no terminaba de verse en la situación de brindarle un apoyo incondicional. Años después, en una entrevista, expondría de manera franca sus recelos:

> Mire, la madre de Oppenheimer era comunista. Su esposa enviudó después de que su primer marido, un comunista, muriese combatiendo en España. Él no era miembro del Partido Comunista. Y no es asunto mío meterme en por qué hizo determinadas cosas. Pero sí es asunto mío repetir esencialmente lo que dije bajo juramento en su juicio: «No creo que quisiera perjudicar a Estados Unidos, pero no llego a entender el porqué de algunas de sus acciones y, como la seguridad de Estados Unidos depende de personas, prefiero que se trate de personas en las que pueda confiar más».

La noche antes de su declaración, Teller cenó con Wheeler y le expresó sus dudas. El consejo de Wheeler fue: «Edward, cuéntales la historia tal como tú la ves». Así lo hizo Teller, y su testimonio contribuyó a que le retirasen las credenciales de seguridad a Oppenheimer y lo condenaran al ostracismo gubernamental.

En lo que a agujeros negros se refiere, Oppenheimer y Wheeler escenificaron un primer y cortés desencuentro en el verano de 1958, en un Congreso Solvay celebrado en la Universidad de Bruselas. De entrada, Wheeler trató de enfatizar la importancia del problema que había acabado por convertirse en su particular obsesión: «De todas las implicaciones que tiene la relatividad general para la estructura y evolución del universo, esta cuestión del destino de las grandes masas es una de las más desafiantes». Acto seguido, pasó a expresar su opinión de que las simplificaciones extremas que Oppenheimer había impuesto a su modelo de estrella invalidaban su posterior descripción del colapso. En particular, Oppenheimer había eliminado un factor, la presión, que dejaba a la estrella sin armas para hacer frente a la apisonadora gravitatoria. Sin medios para defenderse, a esta no le quedaba más remedio que someterse al aplastamiento y rendirse a su destino de agujero negro. Wheeler se unía así al bando de Eddington, por razones idénticas a las que había esgrimido el físico británico en su controversia con Chandrasekhar: «debería existir una ley en la naturaleza que se ocupe de impedir que una estrella se comporte de un modo tan absurdo». Sin embargo, a diferencia de Eddington, Wheeler buscó esa ley de la naturaleza en el bando de Chandrasekhar: en una fusión de relatividad y mecánica cuántica. Lo que Eddington había censurado como un «matrimonio ilegítimo», Wheeler lo celebraba como un «matrimonio ardiente».



LOS ALAMOS NATIONAL LABORATORY

J. Robert Oppenheimer en la fotografía de su credencial de seguridad de Los Álamos.

Wheeler se convenció de que las estrellas no colapsarían en el marco de una teoría cuántica de la gravedad. Parte de ese convencimiento se debía más a su intuición o a una cuestión de gusto personal que a los dictados de la razón: «Durante años, esta idea del colapso hacia lo que ahora llamamos un agujero negro resultaba contraria a mi naturaleza. Simplemente no me gustaba. Hice cuanto pude por encontrar una salida, para evitar la implosión obligatoria de las grandes masas». Al margen de lo que le dictara su instinto, el propio desarrollo histórico del proble-

WHEELER SE CONVENCIÓ DE QUE LAS ESTRELLAS NO COLAPSARÍAN EN EL MARCO DE UNA TEORÍA CUÁNTICA DE LA GRAVEDAD

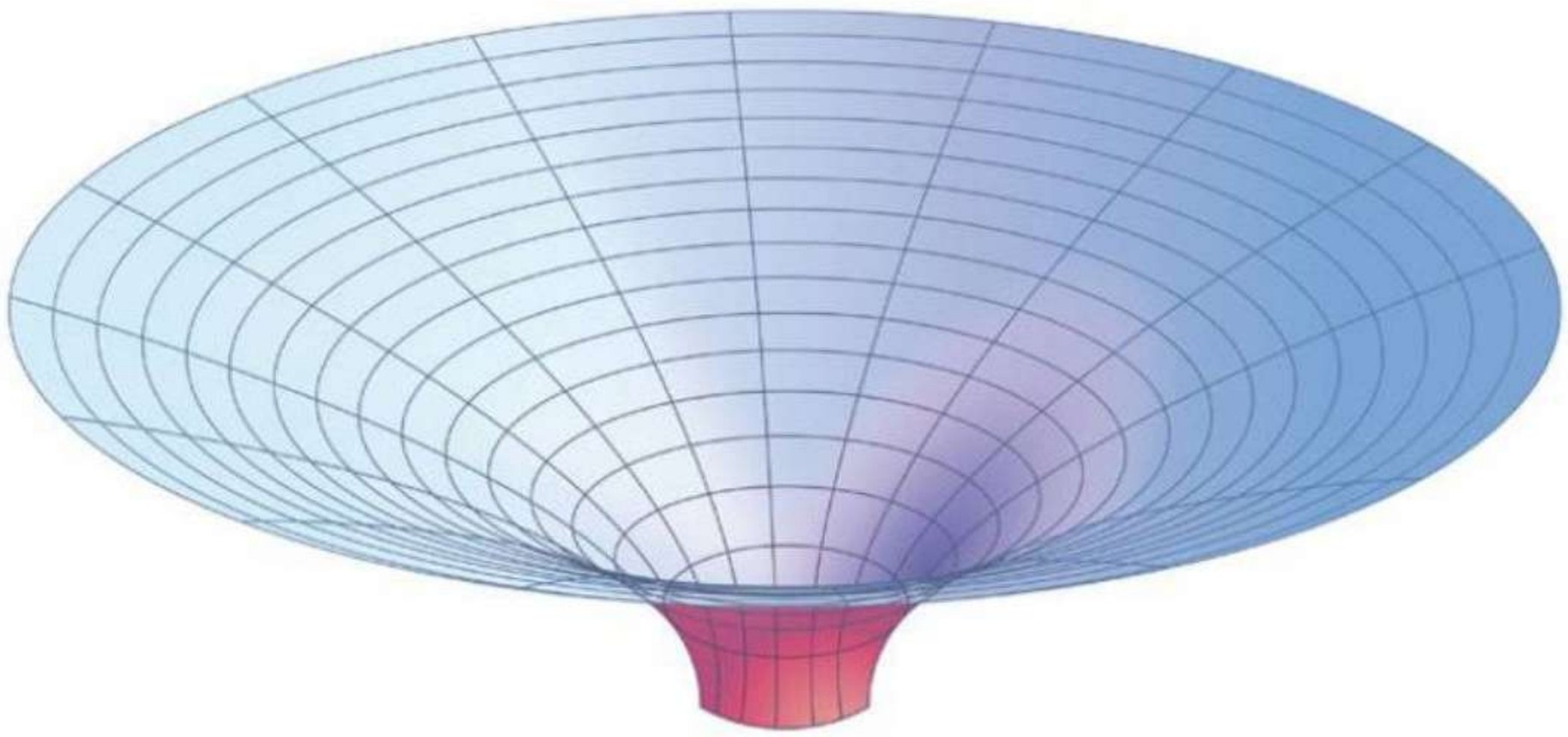


AMERICAN NUCLEAR SOCIETY

Los revolucionarios descubrimientos de Teller y Fermi en física de partículas y reacciones nucleares resultaron fundamentales para modelar el comportamiento de la materia extrema.

ma parecía dotar de un cierto sentido a su manera de enfocarlo. En la versión de Ralph Fowler, que había respaldado Eddington, la presión cuántica de los electrones aseguraba a todas las estrellas un final dulce como enanas blancas. Al imponer el límite de velocidad relativista a los electrones, Chandrasekhar había abierto la vía al colapso. Wheeler pensaba que la unión de la relatividad general y la mecánica cuántica volvería a modificar las reglas del juego y cerraría definitivamente la vía abierta por Chandrasekhar. Aquí se adentraba, sin embargo, en una senda de pura especulación. En el congreso de Bruselas expuso ante Oppenheimer la posibilidad de que la compresión gravitatoria, al confinar de forma drástica la materia, disparase fenómenos cuánticos desconocidos capaces de transformar buena parte de los neutrones y protones en radiación. Esa radiación escaparía al espacio y así liberaría suficiente masa para dejar un remanente dentro de los límites que permitían a una estrella plantar cara a la gravedad y morir dignamente como estrella de neutrones.

Oppenheimer no se mostró impresionado ante la idea, en la que apreciaba demasiados elementos arbitrarios y hasta fantasiosos. No veía la necesidad de recurrir a actos de prestidigitación, fundados en ciencia ignota, para transformar el exceso de materia que tanto molestaba a Wheeler en radiación, y así quitársela de encima e impedir el colapso. A él le bastaba con la versión de la relatividad general que Einstein había formulado en 1915. Solo había que acatar el dictamen de sus ecuaciones, aparcando a un lado cualquier prejuicio sobre lo que uno considerase que debía o no resultar aceptable para la naturaleza. «¿No sería más sencillo suponer —le preguntó a Wheeler— que las masas experimentan una contracción gravitacional continua que las va aislando cada vez más del resto del universo?». Wheeler no dio su brazo a torcer: «Me parece muy difícil aceptar que el "corte gravitacional" constituya una respuesta satisfactoria», fue su respuesta. Por el momento, la discusión quedó en tablas.



Estructura geométrica, conocida como el paraboloide de Flamm, que ilustra la solución de Schwarzschild.

ASC

Durante varios años, Wheeler siguió militando en las filas de Eddington, cegado por la posibilidad de que la gravedad cuántica propiciara algún fenómeno desconocido capaz de evitar el colapso continuado de las grandes masas estelares. Dos acontecimientos vendrían a precipitar su particular caída camino de Damasco y su conversión a la causa de Oppenheimer. El primero fue el trabajo de Colgate, que incluía en su modelo de implosión muchos de los detalles que Wheeler había echado en falta en el artículo de 1937, en particular, la presión de la estrella, la emisión de radiación y las interacciones nucleares. En su simulación, Colgate sí suministraba armas suficientes a las estrellas para que se defendieran del aplastamiento gravitatorio y, a pesar de todo, salían derrotadas.

El segundo acontecimiento que hizo desertar a Wheeler de las filas de Eddington fue el descubrimiento de nuevos sistemas de coordenadas —nuevos puntos de vista de observadores relativistas— que deshacían el espejismo de la superficie singular de Schwarzschild. Estos sistemas ofrecían una descripción completa y pormenorizada del colapso estelar, mostrando cómo, desde un cierto ángulo, se podía ver como un proceso que se ralentizaba gradualmente hasta detenerse y, desde otro, como un proceso que progresaba sin freno hasta concluir en la singularidad. Si en el fondo las dos versiones no se contradecían, si no había paradoja, se cerraba la grieta que, presuntamente, conducía hacia la nueva física.

Estos nuevos sistemas de coordenadas —desarrollados, entre otros, por Martin Kruskal y David Finkelstein— reconciliaban las perspectivas del observador que acompaña al colapso y del observador que permanece en reposo y lo contempla desde una distancia prudencial. El segundo punto de vista parece más problemático y, sin embargo, concuerda de manera muy natural con el primero si tomamos en cuenta dos aspectos. Por un lado, que el observador que no se mueve reconstruye la película del colapso a partir de la luz que le va llegando. Por otro lado, que esa misma luz sufre una fuerte distorsión por el camino antes de alcanzarlo. Desde que es emitida por la estrella, atraviesa un espacio-tiempo con una curvatura pronunciada que altera su naturaleza y la información que transporta.

A medida que progresa la implosión, se acentúa la curvatura del espacio-tiempo

en las proximidades de la estrella. Su masa se va concentrando, por acción del aplastamiento gravitatorio, en un volumen cada vez más reducido. Al mismo tiempo que aumenta su densidad, la masa va dejando una huella más profunda en la lámina del espacio-tiempo. Y precisamente esa deformación de la lámina afecta a la luz que la atraviesa, procedente de la superficie de la estrella. La somete a un estiramiento gradual, que alarga su longitud de onda, volviéndola más roja, al tiempo que va robándole energía. Cuando llega al observador en reposo, no es la misma luz que se emitió, se ha transformado. Si este observador en reposo no es muy ducho en relatividad general, interpretará lo que ve de manera literal, sin tener en cuenta la interferencia de la gravedad. Reconstruirá el fenómeno pensando que es la fuente la que se está volviendo más roja y más débil. Un efecto que, por supuesto, no advierte el observador que acompaña a la implosión, porque permanece pegado a la fuente.

Se puede hacer una lectura muy semejante si consideramos que la luz es corpuscular. En ese caso, las partículas luminosas que emite la superficie de la estrella deben atravesar un espacio-tiempo cada vez más distorsionado. Aunque la fuente las emita a intervalos iguales, el estiramiento progresivo de la lámina espacio-temporal las irá separando cada vez más unas de otras. Este espaciamiento hará que las partículas —que, en realidad, siguen emitiéndose al mismo ritmo— lleguen cada vez más tarde al observador distante, que interpretará la demora como una ralentización en la fuente. A sus ojos, la implosión parece entrar en una cámara lenta, un efecto que se debe exclusivamente a la interferencia de la gravedad en la luz emitida.

Llega un momento en el que la reducción del volumen de la estrella distorsiona hasta tal punto el espacio-tiempo, que induce en él la creación de una región que se aísla por completo del entorno (figura 1). A partir de entonces, cualquier luz emitida por la superficie de la masa estelar describirá una trayectoria que la propia geometría del espacio-tiempo se ocupará de desviar al centro del colapso. Esa luz nunca alcanzará al observador en reposo. Este nunca podrá actualizar su información sobre cómo evoluciona el proceso de implosión. Ignorante del drástico ejercicio de papiroflexia que ha sufrido la lámina espacio-temporal, su interpretación de lo sucedido será que la estrella menguó cada vez más despacio, emitiendo luz cada vez más débil, hasta desvanecerse en un estado de quietud absoluta. Cuando se consuma el colapso, la distorsión que ha generado en el espacio-tiempo se estabiliza. Los pliegues de la nueva geometría permanecen, conformando una región que queda aislada causalmente del entorno. Es decir, nada de lo que suceda en su interior podrá afectar al exterior, porque nada podrá salir de ella. La frontera que delimita dicha región se llama «horizonte de sucesos», expresión creada por el físico de origen vienés Wolfgang Rindler en torno a 1956, inspirándose en una analogía. Igual que un observador quieto deja de ver el Sol después de que este se ponga detrás del horizonte, un observador en reposo deja de ver la estrella que colapsa una vez que esta se hunde dentro de la esfera de Schwarzschild. En ambos casos, lo que deja de verse sigue existiendo más allá de una frontera. El Sol, tras el horizonte; la masa que implosiona, tras el horizonte de sucesos.

EL OBSERVADOR QUE NO SE MUEVE RECONSTRUYE LA PELÍCULA DEL COLAPSO A PARTIR DE LA LUZ QUE LE VA LLEGANDO

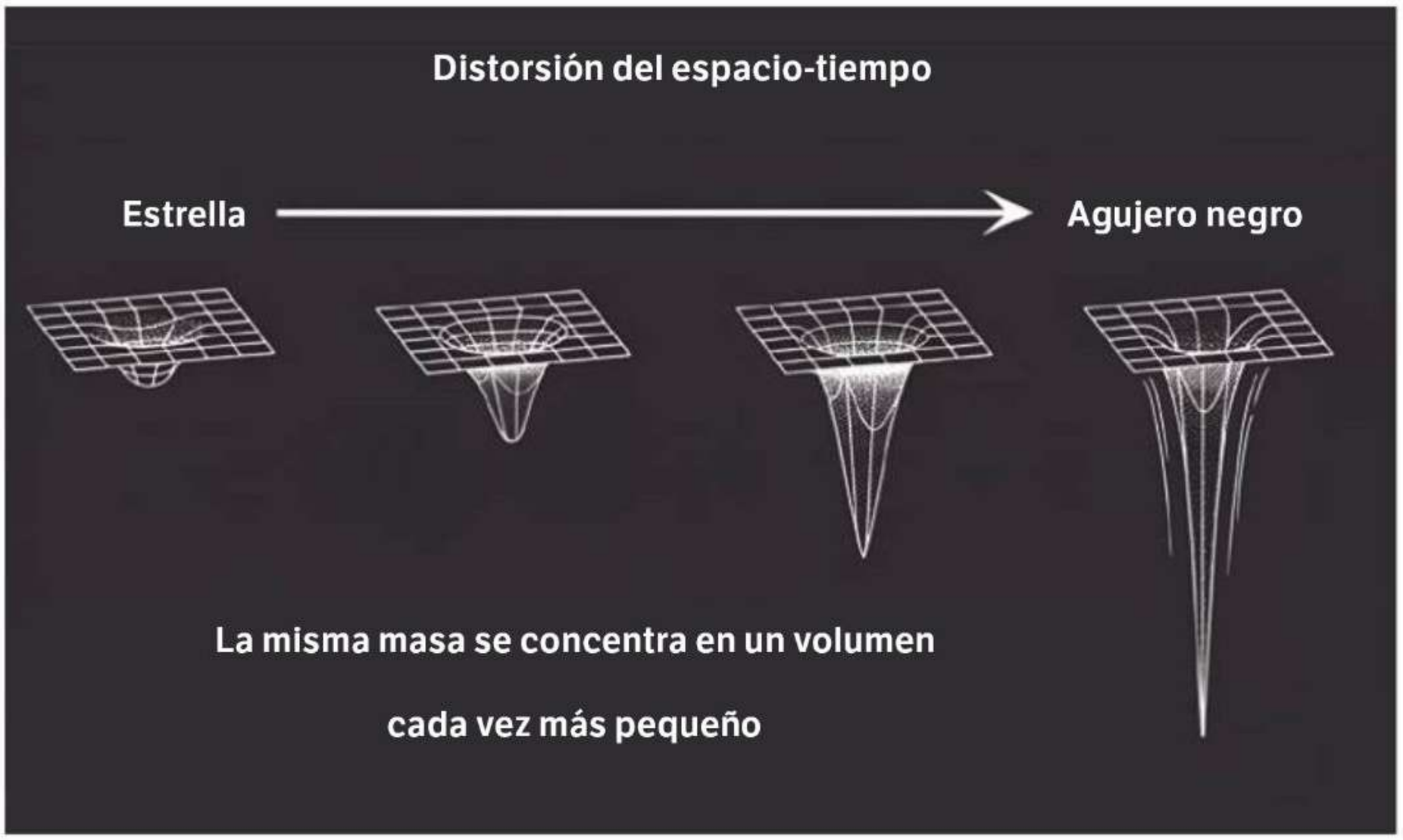


Figura 1. A medida que se concentra la misma masa en un volumen cada vez más reducido, se agrava la distorsión que induce en la geometría del espacio-tiempo.

Si fuéramos los abogados defensores del colapso estelar, con el modelo de Stirling Colgate y los nuevos sistemas de coordenadas de Kruskal y Finkelstein, ya habríamos reunido evidencias convincentes a favor de nuestro cliente. No obstante, el fiscal todavía podría sembrar dudas entre los miembros del jurado y llamar al estrado a Khalatnikov y Lifshitz. Estos testigos no dudarían en señalar las debilidades del modelo de Colgate —su artificiosa simetría esférica— y pasarían a exponer su propio trabajo con las ecuaciones de Einstein, alegando que las soluciones con singularidades son un mero capricho matemático de imposible implementación en la naturaleza. En este punto, el juicio entraría en una fase de incertidumbre. A los abogados defensores no les quedaría más remedio que salir a buscar nuevas pruebas, capaces de neutralizar los argumentos de Khalatnikov y Lifshitz. A mediados de la década de 1960 no era esta una tarea fácil, ya que los principales expertos en relatividad general aún no habían terminado de digerir el pesado artículo de los soviéticos. Fue entonces cuando un joven matemático británico, Roger Penrose, hizo su aparición para atacar el problema desde un ángulo completamente inesperado.

Antes de saber cómo se resolvió el juicio, sin embargo, vamos a abrir un breve paréntesis para examinar un último indicio en favor del colapso gravitatorio, que a la postre resultaría definitivo. No era el producto de otra abstrusa elucubración teórica. Era una pista que aportaban los astrónomos y supondría el ansiado regreso de la relatividad general al terreno experimental.

CADA AÑO QUE PASABA SE ENCONTRABAN NUEVOS CUÁSARES Y SE MULTIPLICABAN LAS HIPÓTESIS

QUIMERAS CÓSMICAS

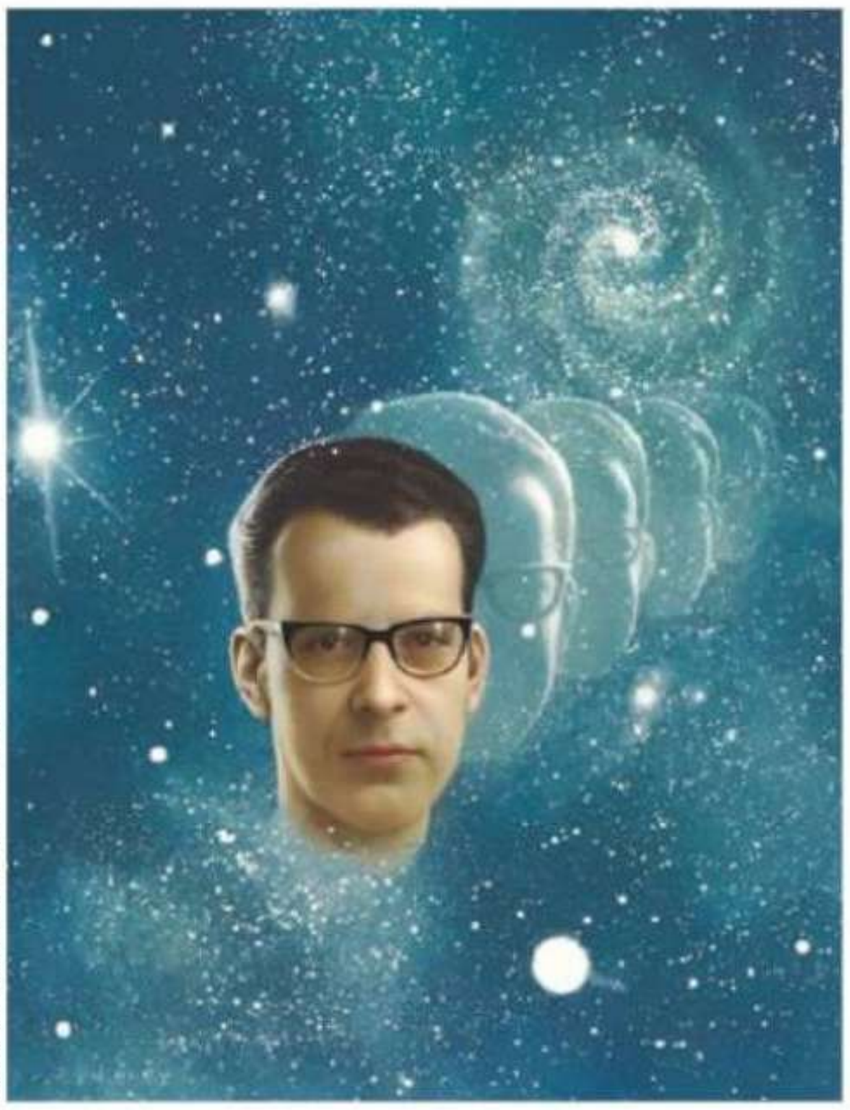
El gran salto adelante de la astronomía tras la Segunda Guerra Mundial no solo se produjo gracias a la inyección de savia nueva procedente de la física nuclear. También se nutrió de numerosos científicos e ingenieros que durante la contienda se habían entregado al perfeccionamiento del radar. Firmada la paz, dejaron de afanarse en detectar las ondas de radio que emitían o rebotaban en los vehículos del enemigo para analizar aquellas que llegaban a la Tierra procedentes del espacio. El diseño de radiotelescopios —telescopios que registran luz con una longitud de onda más larga que la luz visible— cada vez más precisos y sofisticados permitió profundizar en la senda que habían abierto en solitario Karl Jansky y Grote Reber. La imagen del universo ganó en resolución y reveló un escenario en el que se desarrollaban dramas que hasta entonces habían pasado desapercibidos. Se descubrieron así nuevas fuentes de radio, como la que Reber había localizado en el centro de nuestra galaxia, pero envueltas en un misterio aún mayor, sobre todo después de que se constatara la distancia, ciertamente extraordinaria, a la que se encontraban.

¿Qué clase de fenómeno podía liberar un volumen de energía tan descomunal como para que sus señales llegaran hasta la Tierra con nitidez desde fuera de la Vía Láctea? Se alimentaron toda clase de especulaciones al respecto. ¿Serían fruto de algún accidente a escala cósmica, como una colisión entre galaxias? ¿O tal vez había que buscar la causa en una reacción en cadena de supernovas? El aumento en la sensibilidad de los radiotelescopios terminó por demostrar que la luz provenía de espacios mucho más reducidos, que no daban de sí para espectáculos tan aparatosos. De hecho, el tamaño de las fuentes correspondía más o menos al de una estrella, aunque las reacciones termonucleares de ninguna estrella hubieran podido generar tanta luz. Por eso se etiquetó el nuevo fenómeno con el nombre de cuásar, un acrónimo de la expresión «cuasi estelar». Parecían estrellas, pero, al mismo tiempo, no podían serlo. Oppenheimer se refirió a ellas como «eventos espectaculares de una grandeza sin precedentes».

Cada año que pasaba se encontraban nuevos cuásares y se multiplicaban las hipótesis. Existía una notable ambigüedad en la determinación de las distancias, pero en 1963, el astrónomo holandés Maarten Schmidt logró precisar que una fuente extraterrestre de ondas de radio, identificada con el nombre de 3C 273, se hallaba a dos mil millones de años luz de la Tierra. Se trataba de una de las distancias más grandes medidas hasta la fecha y situaba a la fuente en la frontera misma del universo observable. Para que la presencia de 3C 273 se hiciera notar desde esa vastísima lejanía, debía desprender cien veces más energía que todas las estrellas juntas de una galaxia excepcionalmente brillante. Después de una minuciosa criba de candidatos, se llegó a la conclusión de que solo se conocía un mecanismo capaz de sostener una emisión de ese calibre: la aceleración de electrones hasta una velocidad muy próxima a la de la luz. ¿Y quién podía propiciar y sostener una aceleración semejante? Solo la gravedad, operando a una escala astronómica. La dinámica exacta del mecanismo se ignoraba, pero parecía inconcebible que el responsable fuera ninguno de los actores de reparto de la astronomía clásica, como las estrellas o los planetas.

El enigma de los cuásares ocupó el centro del primer Simposio sobre Astrofísica Relativista de Texas, que se celebró en la ciudad de Dallas en diciembre de 1963,

muy poco después del asesinato de Kennedy. La conmoción que sacudió a Estados Unidos tras el atentado proyectaría una aciaga sombra sobre el simposio y, de hecho, estuvo en un tris de provocar su cancelación. En el acto de inauguración, el gobernador de Texas, John Connally, dio la bienvenida a cientos de astrofísicos, matemáticos y físicos teóricos con el brazo enyesado y en cabestrillo. El 22 de noviembre, Connally había ocupado un asiento delante de Kennedy en la limusina que había desfilado entre la multitud congregada en el centro de Dallas y había recibido varios disparos dirigidos al presidente. Pero el evento resultó histórico por motivos menos luctuosos. Allí fueron convocados John Wheeler, Robert Oppenheimer, Roger Penrose y Maarten Schmidt. En alguna de las charlas del simposio, muchos físicos oyeron hablar por primera vez del mítico artículo de Oppenheimer y Snyder, «Sobre la contracción gravitatoria continua». Hong-Yee Chin acuñó el término cuásar. El neozelandés Roy Kerr presentó una nueva solución exacta a las ecuaciones de la relatividad general que extendía la solución de Schwarzschild a las estrellas en rotación. Se invitó también a varios físicos soviéticos. Aunque les denegaron el permiso para asistir, enviaron en su representación algunos artículos que mostraban que al otro lado del telón de acero los físicos nucleares también habían realizado con aprovechamiento la transición desde el diseño de bombas termonucleares a la astrofísica. Por último, y de particular interés para nuestra historia, Fred Hoyle y William Alfred Fowler formularon una aventurada hipótesis: ¿y si había que buscar el motor de los cuásares en la drástica distorsión del espacio-tiempo causada por la implosión de una estrella muy masiva?


NATIONAL PORTRAIT GALLERY/ SMITHSONIAN INSTITUTION

El astrónomo Maarten Schmidt (retratado por Robert Vickrey) descifró el misterio de los cuásares en los años 60.

Si Hoyle y Fowler tenían razón, los cuásares sacarían a la relatividad general de su ensimismamiento matemático y darían carta de naturaleza a un nuevo campo de investigación: la astrofísica relativista que había dado nombre al simposio. Esta nueva disciplina actuaría como una toma de tierra para la más abstracta de las teorías, forzándola a explicar una serie de observaciones, si bien enigmáticas, perfectamente tangibles, registradas en placas fotográficas. A partir del encuentro de Dallas, el colapso estelar no solo ganó verosimilitud para muchos teóricos. La

ROGER PENROSE SE DEBATÍA ENTRE DOS GRANDES PASIONES, LAS MATEMÁTICAS PURAS Y LA FÍSICA

radioastronomía había delatado la presencia en el cosmos de actores muy activos gravitatoriamente y los astrofísicos reconocieron que la clave para desentrañar su intrigante naturaleza podía radicar en la relatividad general. En el discurso de clausura, el astrofísico Thomas Gold quiso enfatizar, con humor, este punto:

Acabamos de vivir, sin duda, una reunión histórica. Será recordada como la reunión en la que se discutieron por primera vez todos estos increíbles descubrimientos astronómicos [...]. Creo que debemos atribuir sobre todo al genio de Hoyle esa idea tan atractiva de que hemos encontrado, al fin, un caso que nos permite sugerir que los relativistas, con toda la sofisticación de su trabajo, no solo son espléndidos ornamentos culturales, ¡sino que realmente podrían resultar de utilidad para la ciencia! Todos contentos. Los relativistas, que se sienten apreciados y que se han vuelto expertos, de la noche a la mañana, en un campo que apenas conocían; los astrofísicos, porque han ampliado sus dominios, su imperio, mediante la anexión de otro territorio: la relatividad general. Todo lo cual resulta de lo más agradable, así que ojalá que sea cierto. Sería una verdadera lástima que tuviéramos que despedir otra vez a todos los relativistas.

EL QUE RESISTE, GANA

Roger Penrose se debatía entre dos grandes pasiones, las matemáticas puras y la física. La relatividad general le ofreció la oportunidad de no renunciar a ninguna de las dos y entregarse a ambas al mismo tiempo. En el temperamento dual de Penrose se reconciliaban las posturas enfrentadas de Hilbert y Minkowski —la relatividad para los matemáticos—, y de Einstein y Wheeler —la relatividad para los físicos—. Fue precisamente Wheeler quien, en el otoño de 1964, llamó la atención de Penrose sobre el reciente descubrimiento de Maarten Schmidt: había cuásares que se encontraban, como quien dice, en la otra punta del universo. Penrose se planteó entonces la cuestión de si un proceso de implosión realista podría consolidar una singularidad en el espacio-tiempo. ¿Su influencia bastaría para acelerar los electrones de la materia del entorno hasta hacer que casi alcanzaran la velocidad de la luz, provocando la extraordinaria emisión de ondas de radio de 3C 273?

Las razones que habían esgrimido Khalatnikov y Lifshitz para borrar del mapa las singularidades no habían convencido en absoluto a Penrose: «En realidad no podías demostrar nada con el procedimiento que ellos habían seguido. Manejaban demasiadas suposiciones. No podían descartar la existencia de singularidades de esa manera». Penrose decidió ensayar una línea de ataque por completo diferente. Para ello recurrió al vasto fondo de armario de los matemáticos, del que extrajo herramientas, como la topología, que prácticamente no se habían aplicado en el campo de la relatividad general. El experimento se zanjó con un éxito rotundo.

Uno de los objetos de la topología es el estudio de aquellas propiedades de los volúmenes y superficies que no se ven alteradas por cambios progresivos de tamaño o de forma. Es decir, por estiramientos, torsiones y aplastamientos. Dentro de estas operaciones no se admiten, sin embargo, las perforaciones o los desgarros. En broma, los matemáticos dicen que un topólogo es una persona que no sabe distinguir una rosquilla de una taza de café. Ambos objetos son topológicamente equivalentes, ya que una rosquilla de arcilla se puede moldear y deformar hasta que adquiera el

aspecto de una taza, sin necesidad de abrir nuevos orificios en la masa (figura 2). Los topólogos, en cambio, sí saben distinguir una naranja de una rosquilla, ya que no hay modo de convertir la primera figura en la segunda sin desgarrar el material que la compone abriendo un agujero. Una de las ventajas de la topología es que, una vez que se demuestra un resultado para una figura, se demuestra también para sus equivalentes topológicos. Lo que se prueba para una rosquilla vale para todas las rosquillas, al margen de cuál sea su tamaño y de los bultos, depresiones o irregularidades que exhiba su contorno. También vale para todas las tazas.

Al considerar el proceso de implosión desde una perspectiva topológica, Penrose se ahorró el penoso trabajo de tener que resolver las ecuaciones de la relatividad general para infinidad de casos particulares. Se limitó a investigar qué aspectos globales de la propia geometría del espacio-tiempo condicionaban el desarrollo de cualquier colapso gravitatorio y encontró que siempre que la contracción continua de la masa de una estrella provocaba la creación de un horizonte de sucesos, en el tejido del espacio-tiempo se abría una singularidad. Esta conclusión no dependía en absoluto de qué forma tuviera la estrella al inicio del proceso o de si estaba rotando o no.

ENLACE AL CANAL
x.com/byneontelegram
Ó escanea el código QR:

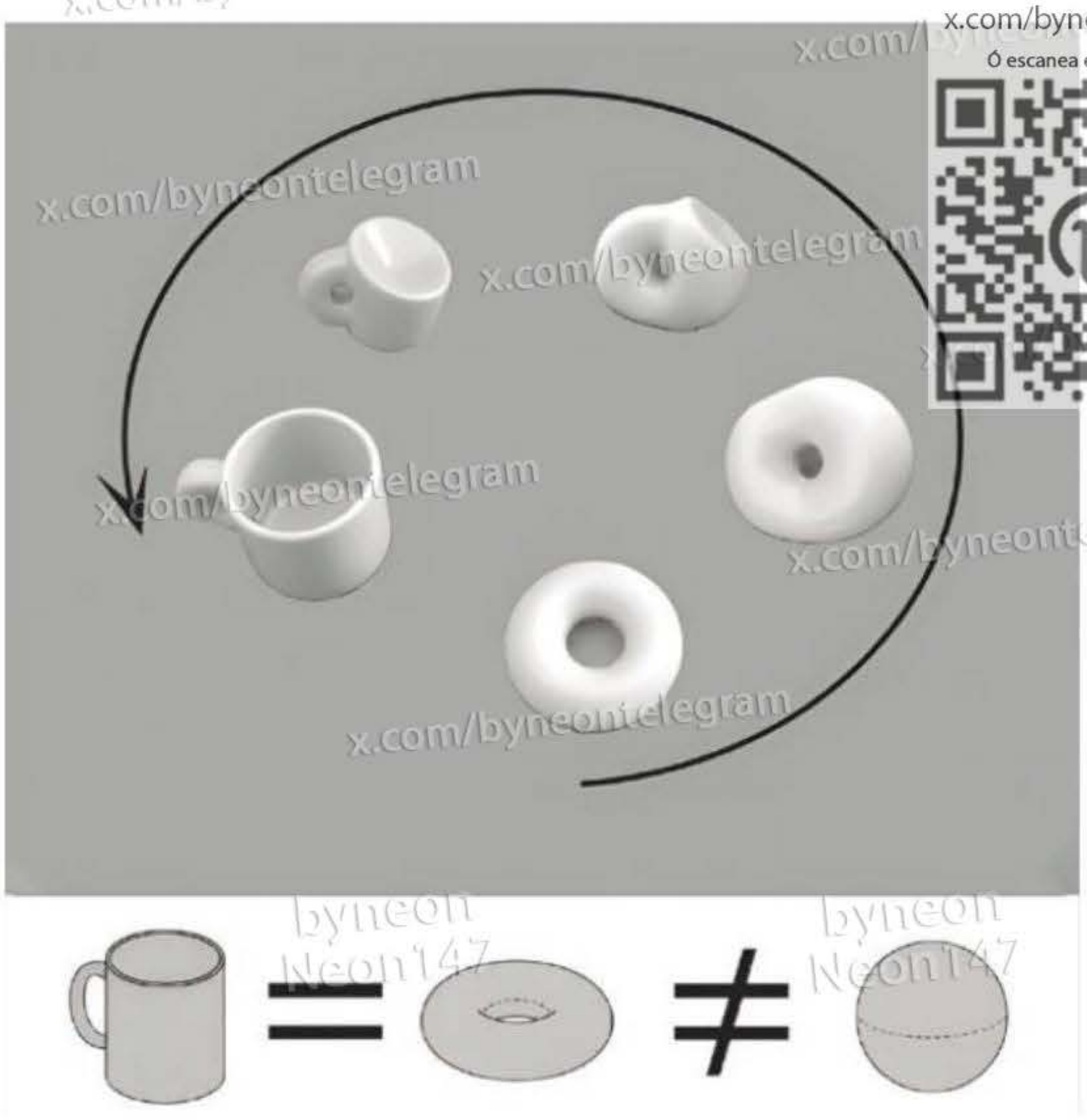


Figura 2. La secuencia ilustra la equivalencia topológica entre una taza y una rosquilla. Respetando las mismas reglas topológicas, no hay modo de transformar ninguno de los dos objetos en una esfera.

La topología no se pronuncia acerca de cómo de redonda o achatada es una masa, de si presenta una perfecta simetría esférica o es completamente irregular, de si es grande o pequeña. La falta de atención a esos detalles tiene un precio. La topología es incapaz de especificar, por ejemplo, cuál es la curvatura del espacio-tiempo en un punto determinado o de dibujar con precisión cómo va

evolucionando su geometría en función de cómo sea la estrella que colapsa. Pero sí es capaz de emitir un dictamen irrevocable: si la masa que se contrae induce en algún momento la formación de un horizonte de sucesos en la lámina del espacio-tiempo, ese incidente traerá consigo la aparición de una singularidad.

Los relativistas de la vieja escuela no estaban familiarizados con los principios de la topología y no supieron valorar en primera instancia la prueba de Penrose. Su instinto les hacía confiar más en el enfoque tradicional y, por tanto, en las conclusiones de Khalatnikov y Lifshitz. Sin embargo, en 1969 los soviéticos revisaron minuciosamente sus ecuaciones con ayuda de un estudiante de doctorado, Vladímir Belinski, e identificaron una familia de soluciones con singularidad que habían pasado por alto y que no correspondían a las distribuciones de materia extravagantes que habían denunciado en su artículo de 1961. De hecho, esta nueva clase de soluciones singulares parecía la más general, resultado que venía a ratificar el análisis topológico. Penrose llevaba razón.

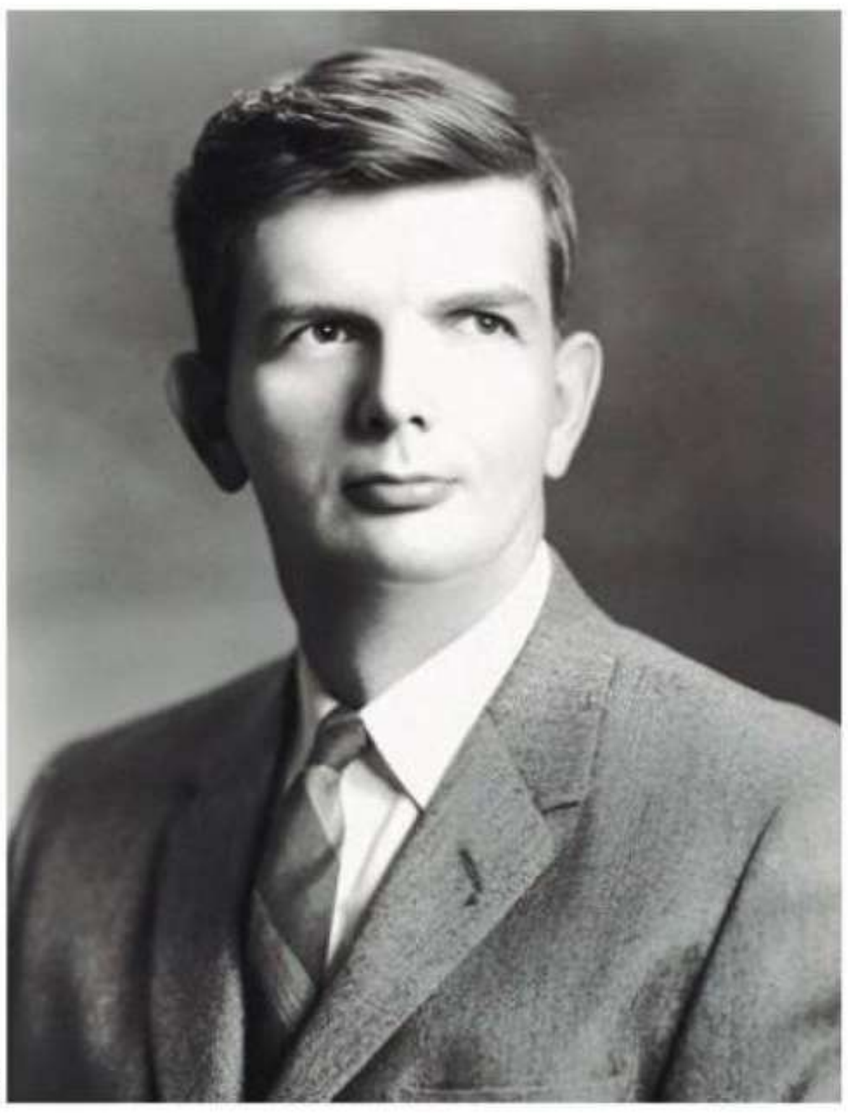
La acumulación de hallazgos teóricos y experimentales terminó de convencer a Wheeler de que las estrellas podían morir como agujeros negros. En el Simposio sobre Astrofísica Relativista de Texas, dio una charla sobre el colapso estelar. Oppenheimer estaba presente en el auditorio y Wheeler quiso, de algún modo, convertir su intervención en una muestra de reconocimiento a su antiguo rival. Mientras Wheeler se dedicaba a ensalzar el carácter visionario de «Sobre la contracción gravitatoria continua», Oppenheimer se levantó, abandonó su asiento y salió al pasillo para ponerse a charlar con otros compañeros. Wheeler recordaría siempre con tristeza el desplante.

Llegados a este punto, uno se podría preguntar por qué Stephen Hawking celebró a Wheeler como el héroe de los agujeros negros. Después de todo, hizo cuanto estuvo en su mano por erradicarlos, solo para terminar claudicando ante una suma abrumadora de pruebas. La respuesta es que, en sus esfuerzos por borrar del mapa la implosión de las grandes masas, Wheeler contribuyó a aclarar muchos aspectos imprecisos o dudosos, tanto del fenómeno en sí como de la teoría que trataba de describirlo. Además, por el camino, creó un núcleo muy activo de investigación sobre relatividad en la Universidad de Princeton, que atrajo a un grupo de estudiantes e investigadores de primer nivel a los que supo contagiar su entusiasmo. Muchos interpretarían un papel decisivo en el establecimiento de la astrofísica gravitatoria. En 1960, el físico matemático Alfred Schild hacía la siguiente constatación: «La teoría de la gravitación de Einstein [...] se está desplazando del ámbito de las matemáticas al de la física». Wheeler fue uno de los principales artífices del retorno de los físicos al estudio de la relatividad general. Representó como nadie el cambio de actitud hacia los agujeros negros y convenció a toda una nueva generación de que merecía la pena seguir su ejemplo. Werner Israel recurrió a una metáfora sencilla para resumir todas estas aportaciones (y alguna más, como ahora veremos):

LAS PRUEBAS CONVENCIERON A WHEELER DE QUE LAS ESTRELLAS MUEREN COMO AGUJEROS NEGROS

Ni Michell ni Laplace fundaron la teoría de los agujeros negros. Sus verdaderos padres fueron Chandrasekhar y Oppenheimer que, en la década de 1930, descubrieron que las grandes masas frías son gravitacionalmente inestables. Sin embargo, ellos dejaron solo una semilla, tierna y desatendida. Fue John Wheeler quien la replantó, creyó en ella, la cuidó y se encargó de hacerla florecer.

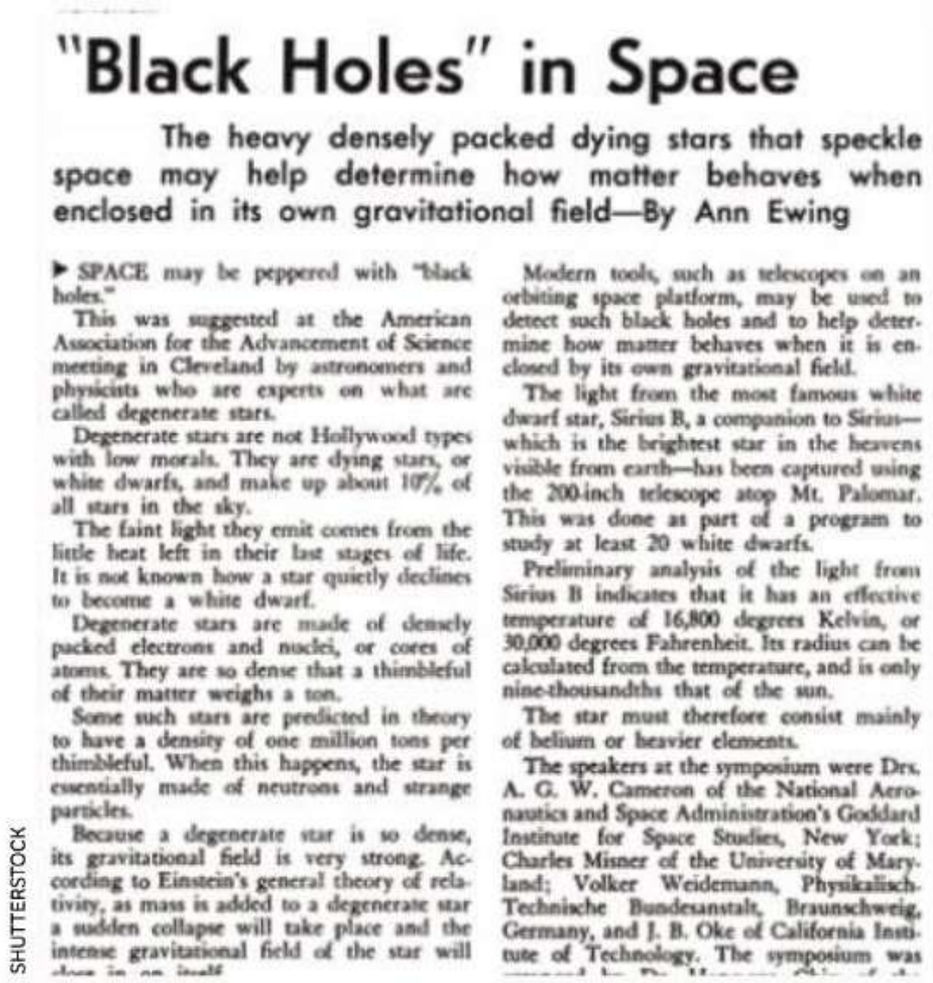
El desembarco de Wheeler en la relatividad general tuvo un impacto simbólico en el estudio del colapso gravitatorio no menor que el que produjo su actividad investigadora. Se convirtió en un embajador inestimable de los agujeros negros que, después de décadas de ser ninguneados y cuestionados, estaban pidiendo a gritos una buena campaña de *marketing*. Y toda campaña de *marketing* se arma alrededor de una marca que ostente un nombre sencillo, sugerente y pegadizo. Ninguna agencia de publicidad admitiría locuciones como «singularidad de Schwarzschild», «estrella congelada» o «estrella colapsada» como candidatos para un *branding* decente. Y es aquí donde llega el momento de cerrar el círculo y volver a llamar a escena a Robert Dicke. Al principio de este EDC descubrimos su costumbre de atribuir al agujero negro de Calcuta la desaparición de cualquier objeto cotidiano que se perdiera en su casa. Robert Dicke había sido uno de los primeros alumnos de Wheeler y, más tarde, los dos serían compañeros de departamento en la Universidad de Princeton. Si en 1952 Wheeler inició su transición desde la física nuclear a la relatividad general, Dicke llevaría a cabo una mudanza semejante muy poco tiempo después. Durante un año sabático en la Universidad de Harvard, en 1954, se despertó su interés por diseñar nuevos experimentos que pusieran a prueba la relatividad general. Wheeler y Dicke consideraban la teoría de Einstein desde ángulos contrapuestos. Wheeler creía que había que transformarla en una teoría cuántica, Dicke pensaba que había que modificar su formulación clásica. Ambos tuvieron ocasión de intercambiar puntos de vista en infinidad de conversaciones informales en la facultad y en decenas de congresos y seminarios sobre relatividad que entonces se estaban volviendo cada vez más frecuentes.



ASC

Robert Henry Dicke, físico pionero en cosmología y radiofísica que inventó el radiómetro de microondas en 1944.

WHEELER Y DICKE CONSIDERABAN LA TEORÍA DE EINSTEIN DESDE ÁNGULOS CONTRAPUESTOS



"Black Holes" in Space

The heavy densely packed dying stars that speckle space may help determine how matter behaves when enclosed in its own gravitational field—By Ann Ewing

▶ SPACE may be peppered with "black holes."

This was suggested at the American Association for the Advancement of Science meeting in Cleveland by astronomers and physicists who are experts on what are called degenerate stars.

Degenerate stars are not Hollywood types with low morals. They are dying stars, or white dwarfs, and make up about 10% of all stars in the sky.

The faint light they emit comes from the little heat left in their last stages of life. It is not known how a star quietly declines to become a white dwarf.

Degenerate stars are made of densely packed electrons and nuclei, or cores of atoms. They are so dense that a thimbleful of their matter weighs a ton.

Some such stars are predicted in theory to have a density of one million tons per thimbleful. When this happens, the star is essentially made of neutrons and strange particles.

Because a degenerate star is so dense, its gravitational field is very strong. According to Einstein's general theory of relativity, as mass is added to a degenerate star a sudden collapse will take place and the intense gravitational field of the star will

Modern tools, such as telescopes on an orbiting space platform, may be used to detect such black holes and to help determine how matter behaves when it is enclosed by its own gravitational field.

The light from the most famous white dwarf star, Sirius B, a companion to Sirius—which is the brightest star in the heavens visible from earth—has been captured using the 200-inch telescope atop Mt. Palomar. This was done as part of a program to study at least 20 white dwarfs.

Preliminary analysis of the light from Sirius B indicates that it has an effective temperature of 16,800 degrees Kelvin, or 30,000 degrees Fahrenheit. Its radius can be calculated from the temperature, and is only nine-thousandths that of the sun.

The star must therefore consist mainly of helium or heavier elements.

The speakers at the symposium were Drs. A. G. W. Cameron of the National Aeronautics and Space Administration's Goddard Institute for Space Studies, New York; Charles Misner of the University of Maryland; Volker Weidemann, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig, Germany, and J. B. Oke of California Institute of Technology. The symposium was

SHUTTERSTOCK



SHUTTERSTOCK

La imagen de la izquierda corresponde a la página 39 de la revista *Science News Letter*, del 18 de enero de 1964. La de la derecha está extraída de un álbum familiar y acompañó el obituario de Ann Ewing publicado por *The Washington Post* el 1 de agosto de 2010.

Fue en el curso de estas charlas y ponencias, a comienzos de la década de 1960, cuando Dicke comenzó a utilizar la expresión «agujero negro» para referirse a la peculiar geometría que adopta el espacio-tiempo después de un colapso gravitatorio. Poco a poco, otras personas fueron adoptando el nombre, uso que no tardaría en reflejarse en textos escritos. La primicia corresponde a una periodista científica, Ann Ewing, que el 18 de enero de 1964 publicó en la revista *Science News Letter* un artículo titulado «Agujeros negros en el espacio». Era una breve nota informativa que se hacía eco de una conferencia organizada en Cleveland por la Asociación Estadounidense para el Avance de la Ciencia. La primera línea, memorable, del artículo rezaba así: «Puede que el espacio esté salpicado de agujeros negros». Seis días después, el neologismo de Dicke aparecía en letra impresa por segunda vez, en este caso con mucha mayor difusión, en la revista *Life*. Lo hacía en un reportaje titulado «El nuevo enigma del cielo: ¿qué son las cuasiestrellas?». El texto, escrito por Albert Rosenfeld, editor científico de *Life*, ofrecía una crónica del Simposio sobre Astrofísica Relativista de Texas. Rosenfeld escribió el reportaje antes que Ewing, pero la revista *Life* retrasó seis meses su publicación.

A pesar de que el nuevo término fuera ganando adeptos, todavía se hallaba muy lejos de ser de uso común. Para que se volviera viral dentro de la comunidad científica, necesitaba el respaldo de alguna de sus figuras de referencia. Algo que ocurrió cuando John Wheeler, auténtico *influencer* de la física, supo ver su potencial y se empeñó en popularizarlo. Se puede decir que los agujeros negros celebraron su puesta de largo en 1967, en otra conferencia auspiciada por la Asociación Estadounidense para el Avance de la Ciencia, en este caso a cargo de Wheeler. El texto de la conferencia apareció publicado al año siguiente en la revista *American Scientist*, bajo un título tan vago como sugerente: «Nuestro universo, lo conocido y lo desconocido». Wheeler ofrecía en él una maravillosa descripción de la que había sido su obsesión recurrente a lo largo de los últimos años, el colapso gravitatorio:

A causa de un desplome cada vez más vertiginoso, [la estrella] se aleja del observador cada vez más deprisa. Su luz se desplaza hacia el rojo. Se vuelve más débil a cada milisegundo y, en menos de un segundo, se vuelve demasiado oscura para ser vista. Lo que una vez fue el núcleo de una estrella ya no resulta visible. El núcleo, como el gato de Cheshire, se desvanece. Uno deja tras de sí solo su sonrisa; el otro, solo su atracción gravitatoria.

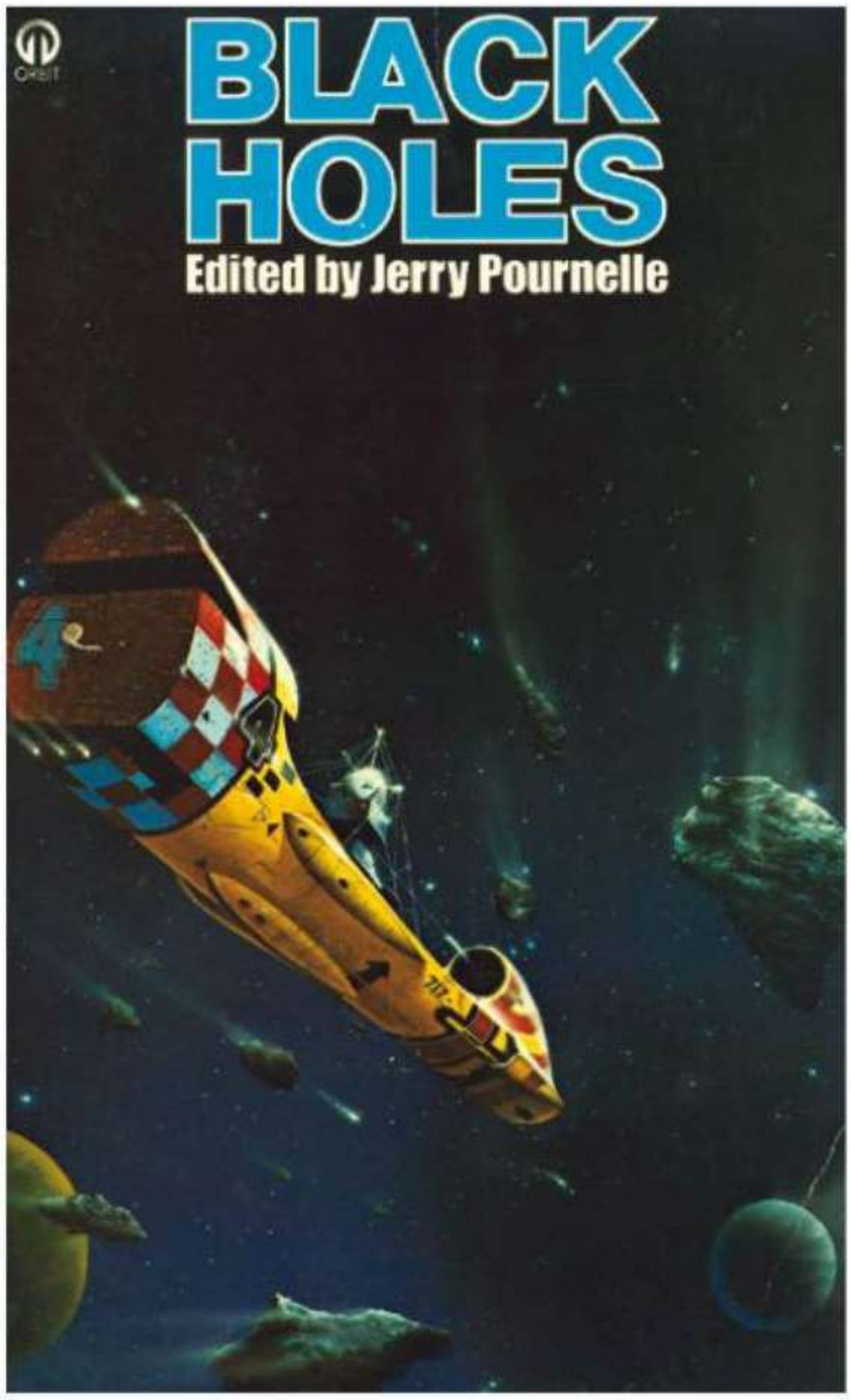
Dicke había acuñado la expresión «agujero negro», pero fue Wheeler, con su ascendiente, quien la convirtió en moneda de uso común. La adopción del nuevo nombre contribuyó a la difusión y aceptación de la noción que representaba. Uno de los estudiantes de doctorado de Wheeler, Kip Thorne —que más adelante le sucedería como uno de los grandes popes de la relatividad general—, defendía que los nombres que damos a los conceptos científicos contribuyen tanto a su promoción como a su descrédito. Establecen un marco mental desde el que consideramos la idea que encarnan simbólicamente. Un buen nombre centra la atención en sus características más relevantes. Un mal nombre puede desviar la atención a otros aspectos de menor importancia o incluso espurios, y acabar induciendo un bloqueo mental. En particular, Thorne manifestó su convencimiento de que una de las primeras denominaciones que habían recibido los agujeros negros —«singularidades de Schwarzschild»— alzó una barrera psicológica que entorpeció su estudio.

Quizás nada contribuyó más a impedir que los físicos llegaran a comprender el fenómeno de la implosión de una estrella, entre 1939 y 1958, que el nombre que usaron para la circunferencia crítica: «singularidad de Schwarzschild». La palabra «singularidad» evocaba la imagen de una región donde la gravedad adquiría una intensidad infinita, haciendo que las leyes de la física —tal como las conocemos— se rompieran, una imagen que ahora entendemos que es correcta para el centro de un agujero negro, pero no para la circunferencia crítica. Esta imagen hizo que a los físicos les costara aceptar la conclusión de Oppenheimer y Snyder de que una persona que atraviese la singularidad de Schwarzschild (la circunferencia crítica) de una estrella en implosión no experimentará una gravedad infinita ni asistirá a ninguna ruptura de las leyes físicas.

Por tanto, estaba más que justificado que los agujeros negros pasaran por el registro civil para solicitar un cambio de nombre. Wheeler compartía el punto de vista de Thorne acerca de la importancia de las palabras:

El advenimiento de la expresión «agujero negro» en 1967 fue terminológicamente trivial, pero psicológicamente poderoso. Después de que se introdujera este nombre, más y más astrónomos y astrofísicos empezaron a considerar que los agujeros negros pudieran ser algo más que un producto de la imaginación. Podían ser objetos astronómicos en cuya búsqueda merecería la pena invertir tiempo y dinero.

AUNQUE DICKE CREÓ LA EXPRESIÓN «AGUJERO NEGRO», FUE WHEELER QUIEN POPULARIZÓ SU USO



ASC



ASC

A la izquierda, portada de la antología *Black Holes*, editada por Jerry Pournelle. Arriba, Jerry Pournelle en su mesa de trabajo rodeado de sus obras de divulgación y ciencia ficción.

Después de que los físicos alcanzaran una comprensión razonable del fenómeno, se convencieran de que, en efecto, tenía lugar en el universo y lo etiquetaran con el nombre apropiado, los agujeros negros ya estaban en condiciones de conquistar su espacio dentro de la cultura popular. Rotas las barreras, el proceso de asimilación se desarrolló con rapidez a lo largo de la década de 1970. Cuando Chandrasekhar tuvo que hacer frente a una operación de corazón, disfrutó del placer y la distracción de que todo el personal médico que lo atendía se mostrara interesado en hablar con él sobre singularidades y horizontes de sucesos. En la introducción a la antología de relatos de ciencia ficción *Agujeros negros y otras maravillas*, escrita en 1978, su editor, Jerry Pournelle, señalaba:

Los agujeros negros se han vuelto populares. Hace unos años, apenas podías encontrar referencias suyas en la literatura científica. En el índice de los libros de gravitación no figuraba ninguna entrada sobre agujeros y, si querías aprender algo acerca de estos objetos peculiares, tenías que remitirte a trabajos ciertamente oscuros. Y, de pronto, de la noche a la mañana, vas y te tropiezas con agujeros negros allá donde mires. Te los encuentras en historias de ciencia ficción y en artículos de divulgación científica. Ahí los tienes, en los periódicos y en la televisión. El concepto se ha vuelto tan popular que incluso puedes oír hablar de ellos cuando sales a tomar algo. ■

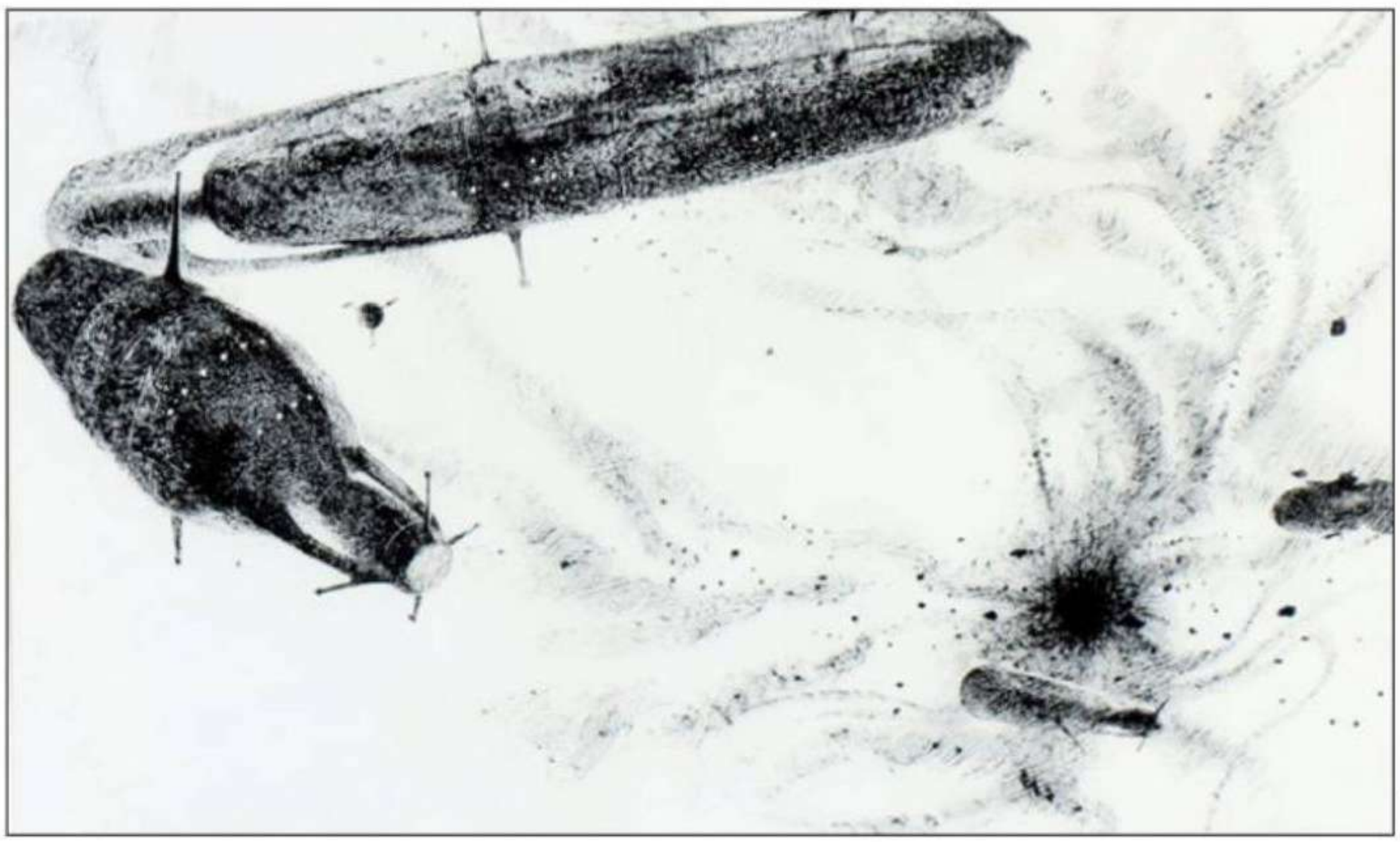
SHUTTERSTOCK

Realización artística de un agujero negro devorando la materia a su alrededor en el espacio profundo.

EL ARTE DE VOLVER VISIBLE LO INVISIBLE

Los primeros escritores que se lanzaron a explorar el atractivo de los agujeros negros relativistas a través de la ficción tuvieron que resolver un problema ciertamente inusual: ¿cómo iban a describirlos? Se enfrentaban a la singular tarea de visualizar un fenómeno que ningún ser humano había tenido ocasión de contemplar. En el mejor de los casos, los astrónomos habían registrado señales procedentes del entorno de un agujero negro. Señales que llegaban desde distancias inconmensurables, sin aportar información alguna sobre el aspecto de la fuente. Tampoco facilitaba la tarea que, en principio, los agujeros negros, por su propia naturaleza, fueran invisibles. De acuerdo con la relatividad general, ninguna luz escaparía de ellos. Sin embargo, su poderosa presencia gravitatoria sí podía (y debía) afectar a la materia y la luz que se internara en sus inmediaciones, provocando efectos visibles. Una vez más, las ecuaciones de Einstein almacenaban las respuestas a todas las preguntas y, una vez más, no resultaba nada fácil extraer dichas respuestas. Hasta finales de la década de 1970, los escritores, dibujantes y directores de cine no tuvieron a su disposición ninguna referencia visual autorizada. Por mucho que rebuscaran en las páginas de las revistas de astrofísica o de los libros de relatividad general, no iban a encontrar ninguna ilustración de un agujero negro.

¿Cómo resolvieron entonces la papeleta? De algún modo, debían evocar una imagen en la mente de los lectores. Una imagen de la que ellos mismos nada sabían y que, aun así, debía transmitir toda la fuerza y el misterio de los agujeros negros. Los autores de ciencia ficción tienen particularmente desarrollado el músculo de la imaginación y poseen una proverbial habilidad para hacer pasar por nuevo lo que en realidad no es más que una insólita combinación de elementos familiares. La amplia galería de alienígenas que han recorrido las historias del género —desde los correosos pseudopulpos de *La guerra de los mundos* hasta los xenomorfos de



ANTIQUE HELPER

Cayó en un agujero oscuro (*He Fell into a Dark Hole*). Ilustración original en tinta y pincel seco sobre yeso realizada por el célebre artista estadounidense John Schoenherr.

Alien— ofrece muestras más que convincentes de esta destreza. En el caso de los agujeros negros, los escritores debían acometer un nuevo ejercicio de originalidad impostada ajustándose a una breve lista de requerimientos:

- Debían concebir alguna suerte de entidad astronómica.
- Tenían que dotarla de un poderoso influjo gravitatorio que, llevado al extremo, provocara efectos devastadores.
- Debían encarnar además la más absoluta oscuridad.
- Debían disponer de unos dominios y de una frontera que delimitara una región secreta, de la que nada pudiera escapar.

Casi todos estos atributos hacen gala de una molesta abstracción, así que había que forjar una imagen capaz de sugerirlos o representarlos, que fuera atractiva, aunque no albergara la menor pretensión de realismo. Sobre todo, porque nadie sabía en qué demonios consistía ese realismo. Había que construir un artificio que encajara bien en un escenario espacial y que al mismo tiempo resultara amenazador. Como en el caso de las profecías, cuanto más vagas fueran las descripciones, más oportunidades había de acertar; cuanto más concretas, más posibilidades de errar el tiro. En *Pórtico*, leemos:

En ese momento, giró la pantalla de la nave y en ella surgió algo que no era ni una estrella ni una galaxia. Era una masa mortecina de luz azul pálido, moteada, inmensa, que causaba pavor nada más verla. Supe que no era un sol. No puede haber ningún sol tan grande y mortecino. Te dolían los ojos con solo mirarla, pero no a causa de su brillo. Te dolían los ojos por dentro, hasta lo más profundo del nervio óptico. El dolor se instalaba en el propio cerebro.

Más adelante, Frederik Pohl ofrece una descripción más completa. «Y todo el tiempo, en una pantalla de observación u otra, titilaba esa vasta, inmensa y funesta esfera azul. Las sombras fugaces que recorrían su superficie, debido a los efectos de fase, generaban imágenes aterradoras. Sentíamos cómo tiraba de nuestras entrañas la tenaza inflexible de sus ondas gravitatorias». Esta imagen de una esfera de luz mortecina, azulada, cuya superficie recorren sombras funestas, era demasiado concreta y, por tanto, errada. Ocurría lo mismo con la hipermasa que Fred Saberhagen se había molestado en pintar con todo lujo de detalles en *La máscara del desplazamiento al rojo* o en *El rostro de lo profundo*.

En *Cayó en un agujero oscuro*, Jerry Pournelle practicaba, sin embargo, el noble arte de la ambigüedad. De entrada, los propios científicos de finales del siglo XXI de su historia reconocían lo poco que sabían sobre qué aspecto debía presentar un agujero negro: «en realidad, todo lo que hemos llegado a observar son algunas desviaciones de la luz y una difusa ocultación de estrellas». Cerca del final de su relato, Pournelle delegaba la responsabilidad de las descripciones en un personaje que se lanza de cabeza a un agujero negro y transmite de manera casi telegráfica

LAS ECUACIONES DE EINSTEIN ALMACENABAN LAS RESPUESTAS, PERO NO RESULTABA NADA FÁCIL EXTRAER LAS RESPUESTAS

lo que va observando hasta que, muy oportunamente, la comunicación se corta cuando cruza el horizonte de sucesos. Su primer mensaje es más bien parco en detalles: «El agujero ha ocultado la estrella. Produjo un anillo brillante en el espacio. Muy brillante. Ahí sigue. Nunca había visto nada parecido». Su segundo mensaje no añade gran cosa: «Otro anillo brillante. Me debo de estar acercando». El tercer y último mensaje nos deja un poco como al principio: «Otro anillo brillante. ¡Menudo espectáculo! Maldita sea, es la mejor vista del universo». Aquí, el efecto Nostradamus funciona a la perfección (como siempre, en un solo sentido). Uno podría encajar las palabras de Pournelle en una moderna animación de lo que observaría un astronauta al caer en un agujero negro. En cambio, nadie que lea solo las palabras de Pournelle podría reconstruir los aspectos más relevantes de la animación.

En estos relatos y novelas inaugurales, con los que los agujeros negros relativistas se estaban abriendo camino en la ficción y buscaban su espacio dentro del imaginario colectivo, encontramos abundantes muestras de los dos enfoques: demasiada concreción y descripciones manifiestamente erróneas y ambigüedad calculada y descripciones que siguen resultando aceptables aun hoy en día para un lector familiarizado con la representación icónica de *Interstellar* o con otras visualizaciones rigurosas que circulan por redes sociales o canales de vídeo de internet.

En las décadas de 1960 y 1970, los dibujantes de cómics o los ilustradores de cubiertas de libros o de revistas de ciencia ficción no pudieron beneficiarse del ardid de Nostradamus de la indefinición calculada. Más agudo era el problema en el caso de las películas o las series de televisión. Aquí no se podía sortear la dificultad de evocar lo que nadie había visto (ni siquiera imaginado con claridad) a base de vaguedades, metáforas o insinuaciones. No quedaba más remedio que ser concreto. La amenaza del agujero negro debía adoptar una forma visualmente bien definida. Los responsables de la dirección y el arte de estas producciones audiovisuales abordaron tan espinoso asunto con diferentes grados de motivación, curiosidad y presupuesto.

En el guion de *El mañana es ayer*, Dorothy Fontana eludía meterse en jardines astrofísicos y optaba por no mostrar nada. La voz en *off* del capitán Kirk narraba sin el soporte de ninguna imagen el encontronazo de la *Enterprise* con un agujero negro: «Cuaderno de bitácora del capitán, fecha estelar 3113.2. Íbamos de camino a la Base Estelar 9 para reabastecernos, cuando una estrella negra con una enorme capacidad de atracción gravitatoria comenzó a arrastrarnos hacia ella. Aplicamos toda nuestra energía de curvatura marcha atrás, tratando de alejarnos de la estrella. Conseguimos liberarnos, pero, igual que cuando una goma elástica se rompe, salimos disparados a través del espacio, sin control, hasta detenernos aquí... donde quiera que estemos». La interferencia gravitatoria del agujero negro afectaba muy oportunamente a los circuitos de la nave, apagando las pantallas de observación. Para cuando el ingeniero jefe Scotty conseguía restituir el suministro eléctrico, la *Enterprise* se encontraba ya muy lejos de la singularidad.

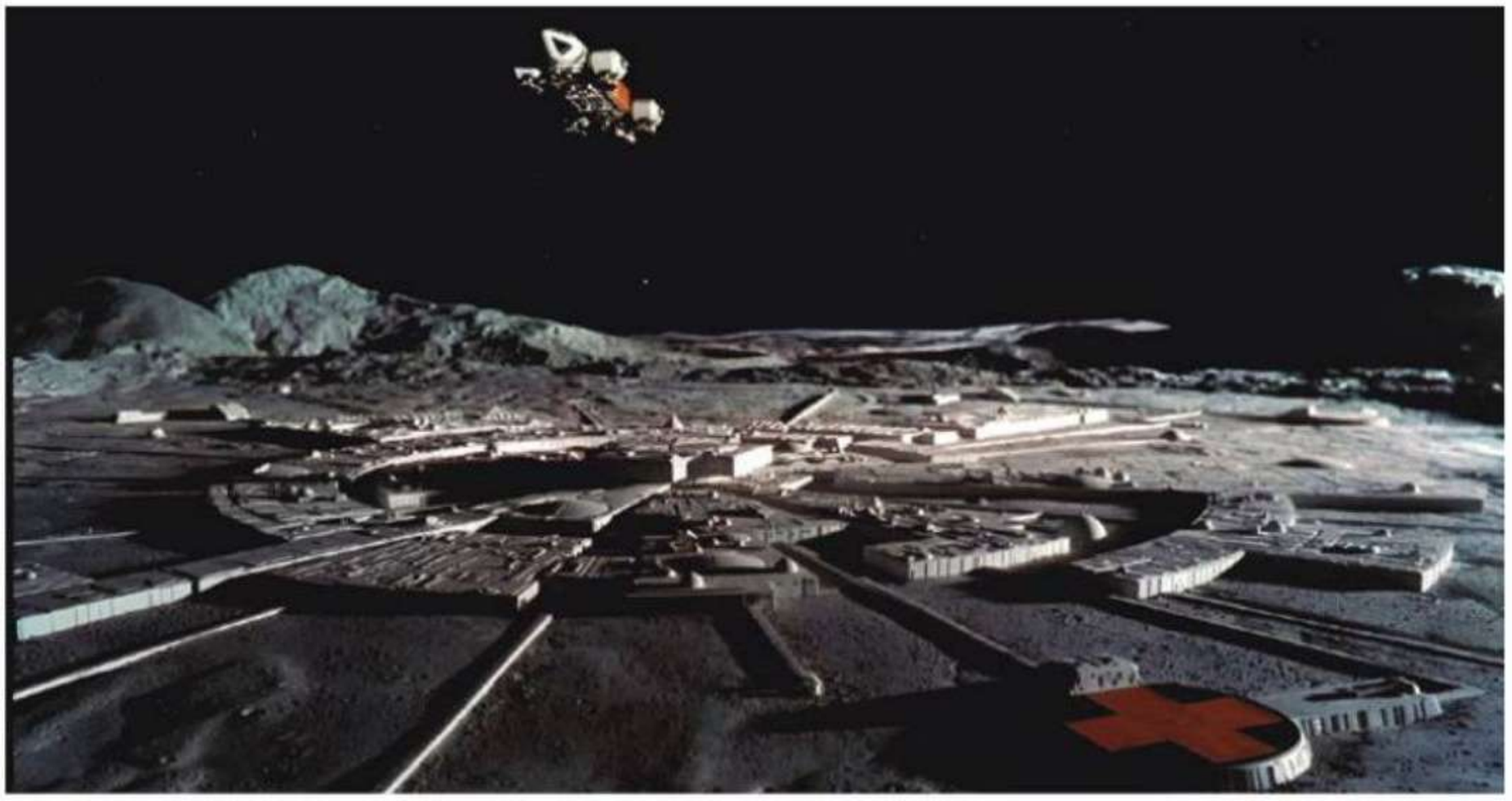
EN EL CINE Y LA TELEVISIÓN NO SE PODÍA SORTEAR LA DIFICULTAD DE EVOCAR LO QUE NADIE HABÍA VISTO



Cartel de la película *Godzilla vs. Mechagodzilla*, dirigida por Jun Fukuda en 1974.

Tampoco se mostraba a los espectadores el agujero negro de la irresistible *Godzilla contra Mechagodzilla*, que Jun Fukuda rodó en 1974. A pesar de que esta enésima entrega de la franquicia japonesa del dinosaurio mutante contaba con un generoso presupuesto para efectos especiales, todo el dinero se fue en dar vida a sus tres monstruos protagonistas y en confeccionar los decorados que iban arrasando a su paso. La película introducía uno de los enemigos más entrañables de Godzilla, Mechagodzilla, en realidad, un robot fabricado por los simiones, extraterrestres que viajaban a la Tierra animados por el interés turístico de siempre: la invasión. En *Godzilla contra Mechagodzilla* encontramos un concepto interesante que reaparecerá en *Interstellar*, el de blanetas (del inglés *blanet*, acrónimo de *black hole planet*). Es decir, hipotéticos exoplanetas que orbitarían alrededor de un agujero negro en lugar de una estrella. El agujero de los simiones se ha puesto bravo y amenaza con aniquilar su civilización. Esto conduce, inevitablemente, a la construcción de un lagarto mecánico de varios pisos de altura y a la conquista de la Tierra. Ningún espectador en su sano juicio querría perderse su combate a muerte contra Godzilla.

En «Los tres doctores», la serie de episodios que conmemoraban los diez primeros años en antena del *Doctor Who*, no se escamoteaba el agujero negro a los espectadores, pero su representación era cualquier cosa menos memorable. Se reducía a un borrón negro irregular, que parecía exactamente lo que era: una salpicadura de pintura negra sobre la foto de un fondo de estrellas. El departamento de arte de otra serie británica, *Space: 1999*, aplicó algo más de entusiasmo a la tarea. *Space: 1999* seguía una línea argumental muy semejante a la de *Star Trek*, aunque en su caso los viajes de exploración no obedecían a la curiosidad sino a un accidente. La historia arrancaba en un futuro no muy lejano en el que los seres humanos llevan décadas utilizando la cara oculta de la Luna como un almacén de residuos radiactivos. En el primer episodio, «La escisión», se revela que esta idea de utilizar nuestro satélite como un inmenso vertedero nuclear es tan nefasta como parece. Fugas en el silo disparan una



ITV

Vista de la mítica base lunar Alfa de la serie de ciencia ficción de los años 70, *Space: 1999,* donde se narra el viaje incontrolable de la humanidad a través del cosmos.

reacción en cadena que culmina en una formidable explosión termonuclear capaz de arrancar a la Luna de su órbita y lanzarla fuera del sistema solar. Los protagonistas de la serie son los científicos que trabajaban en la base lunar *Alpha*, que se convierten de la noche a la mañana en los involuntarios tripulantes de un gigantesco cohete cuya trayectoria no gobiernan. *Space: 1999* va narrando los sucesivos encuentros de esta Luna errante con un desfile de planetas desconocidos, naves espaciales inteligentes, flotas alienígenas, asteroides prisión, mundos de antimateria, estrellas binarias y... agujeros negros. Como bien señaló Isaac Asimov, una explosión nuclear capaz de sacar a la Luna fuera de su órbita muy probablemente también la haría pedazos. En todo caso, convertida en un colosal cohete con los motores instalados en la cara oculta, debería apuntar hacia la Tierra y provocar una desafortunada carambola cósmica, cosa que en «La escisión» no sucede. Incluso pasando por alto estas consideraciones, los científicos de la base lunar *Alpha* tampoco se embarcarían en la grandiosa odisea a través del universo que relata la serie, puesto que, con las velocidades que podría desarrollar su nave satelital, morirían antes de alcanzar otros sistemas planetarios.

El tráiler del décimo episodio de la primera temporada de *Space: 1999*, que se emitió en noviembre de 1975, intentaba captar la atención de los espectadores con una advertencia formidable: «¡Prepárense para viajar a través del fenómeno más peligroso y extraño del universo! Para viajar hasta donde nadie ha llegado antes... ¡Un viaje a través del sol negro!». ¿Cómo era este sol negro, que interceptaba la trayectoria de nuestra Luna peregrina y amenazaba con engullirla? Cuando los científicos de la base *Alpha* escudriñaban las pantallas de observación con una preocupación más que comprensible, descubrían un círculo negro envuelto en una bruma sideral. Allí había, literalmente, un agujero negro, que se recortaba contra el tenebroso telón de fondo del espacio gracias a unas habilidosas pinceladas blancas, que evocaban estrellas y nebulosas. Fue una solución recurrente. En la cubierta de la antología de Pournelle, la presencia del agujero negro se sugería mediante un simple borrón oscuro, rodeado de estrellas.

El disco negro —delimitado con mayor o menor precisión por estrellas o halos gaseosos oportunamente dispuestos— reaparece en *El día después de mañana*, de Gerry Anderson, el mismo productor de *Space: 1999*. La película se rodó en 1975, aprovechando la pausa entre la grabación de las dos únicas temporadas de la serie. El proyecto arrancó como un documental de divulgación sobre relatividad general dirigido a un público infantil y a punto estuvo de convertirse en una nueva serie de ficción. El lector suspicaz podría detectar coincidencias sospechosas con el argumento de *Interstellar*: el deterioro medioambiental de la Tierra motiva una ambiciosa misión espacial que tratará de buscar un nuevo hogar para la humanidad. Los protagonistas sufren los efectos de la dilatación temporal, que los proyectan hacia un futuro en el que ya no podrán reencontrarse con los familiares que dejaron atrás y, al final, la nave en la que viajan, la *Altares*, se precipita en un agujero negro. Anderson y John Christopher Byrne —el guionista de *El día después de mañana*— reconocieron que no habían llegado a entender gran cosa de la relatividad general que pretendían divulgar, pero aquí y allá se percibe la mano del asesor científico, el físico británico John Taylor.

Mientras la *Altares* enfila hacia el horizonte de sucesos y la tripulación se prepara para lo peor, la doctora Anna Bowen deja caer un enigmático comentario: da la impresión de que el agujero negro está rotando. El resto de la tripulación parece considerar el comentario completamente fuera de lugar justo cuando están a punto de sufrir una muerte espantosa, pero la doctora Bowen se apresura a aclarar que ese movimiento de giro ofrece un atisbo de esperanza: «Significa que quizás tengamos una oportunidad. Hay quien dice que, si atraviesas un agujero negro que está rotando, vas a parar a un nuevo universo, puede que incluso a una nueva dimensión. Nadie lo sabe». ¿Y si el agujero no está rotando?, le preguntan, ahora sí, interesados. Si no está rotando, la película no tendrá el final que esperábamos para una producción infantil. La esperanza de la doctora Bowen se cifra en que, en un agujero de Kerr, la singularidad no se concentra en un solo punto, imposible de esquivar, sino que se extiende a lo largo de un anillo. ¿Qué sucede si uno, en un ejercicio cósmico circense, consigue atravesar el aro sin rozarlo? Ahondaremos un poco más en las implicaciones de esta distinción —entre agujeros de Schwarzschild, estáticos, y agujeros de Kerr, en rotación— cuando hablemos de *Interstellar*.

Los afortunados espectadores de 1975 pudieron disfrutar de más agujeros negros con el estreno de otra película de ciencia ficción, cuyo título no llamaba a nadie a engaño: *La invasión de la tarántula gigante*. En efecto, la historia iba de una tarántula gigante que desataba el terror en las afueras de Merrill, una apacible localidad de Wisconsin. Afortunadamente, esta clase de incidentes ocurren siempre en alguna zona rural de Estados Unidos. En favor de los guionistas, hay que decir que no recurrieron al viejo ardid argumental de los militares, el experimento nuclear y las consabidas mutaciones para justificar la presencia de una tarántula del tamaño de un elefante africano. La criatura aparece después de la caída a la Tierra de un

HAY QUIEN DICE QUE, SI ATRAVIESAS UN AGUJERO NEGRO QUE ESTÁ ROTANDO, VAS A PARAR A UN NUEVO UNIVERSO

extraño meteorito. ¿Venía la tarántula montada a lomos de esta artera pedrada del espacio exterior? La cuestión no está nada clara. De entrada, la araña no proporciona ninguna información al respecto, se limita a devorar a la población de Merrill, así que hay que conformarse con aventuradas conjeturas. Es lo que hacen los dos científicos protagonistas de *La invasión de la tarántula gigante*, la astrónoma Jenny Langer y el doctor Vance, de la NASA, que terminan por concluir que lo que ha caído en Wisconsin no es un meteorito cualquiera sino un microagujero negro. La doctor Vance es quien describe mejor la situación: «Parece que nuestro agujero negro se ha convertido en una puerta abierta al infierno».

El presupuesto de *La invasión de la tarántula gigante* no daba para muchas alegrías. Apenas llegaba para la araña y las personas que se comía, así que hubo que reducir el agujero negro a un tamaño lo más económico posible, es decir, volverlo microscópico y, por lo tanto, invisible. Esta decisión deriva en una encantadora antinomia: de un agujero negro microscópico emerge una araña descomunal. Tan contradictorio como la vida misma. La película se hizo muy popular y la ciudad de Merrill disfrutó de una campaña de promoción turística tan original como inesperada.

Hemos visto cómo los agujeros negros se fueron asentando en la ficción escrita a lo largo de los años sesenta del siglo pasado y cómo en la década siguiente su presencia se fue haciendo cada vez más acusada en el cine y la televisión. Los amantes de la ciencia ficción y la astronomía que se hubieran hartado ya de ver discos oscuros, borrones, salpicaduras de pintura o, peor todavía, de no ver absolutamente nada, y que ardieran en deseos de contemplar un agujero negro como Dios manda en la gran pantalla tuvieron que esperar hasta 1979. Fue entonces cuando la fábrica de sueños quiso alumbrar una pesadilla espacial. Con el fin de cautivar y sobrecoger a su público, esta vez Hollywood no escatimó en gastos a la hora de dar vida al fenómeno más temible y enigmático del universo.

RETRATOS DE LO INVISIBLE

Cuando nos preguntamos qué aspecto debe presentar un agujero negro, la cuestión no tiene el mismo sentido que cuando formulamos la misma pregunta para los objetos de nuestro entorno cotidiano, de los que nos formamos una imagen a partir de la luz que emiten (por ejemplo, en el caso de la llama de una vela) o reflejan (el rostro de una persona, iluminado por la misma vela). Los agujeros negros no emiten ni reflejan luz. Se podría corregir esta última afirmación argumentando que, después de todo, los agujeros negros sí que desprenden algo de luz: la radiación de Hawking, un fenómeno cuántico y relativista que tendría lugar justo en la frontera del horizonte de sucesos. Con todo, nos podemos olvidar de ella para lo que vamos a discutir aquí, puesto que se trata de una luz más débil que el ruido de fondo del universo: esa radiación de microondas generada por los átomos primordiales poco después del Big Bang de la que hablamos anteriormente. En suma, la radiación de Hawking resulta por completo indetectable a distancias astronómicas y, a efectos prácticos, podemos recuperar nuestra presunción de que los agujeros negros no emiten ni reflejan luz. ¿Cómo podemos verlos entonces? A diferencia de la materia ordinaria, la presencia gravitatoria de un agujero negro puede afectar profundamente la trayectoria de los rayos luminosos que se aventuran en su proximidad, provocando distorsiones ópticas notables y perceptibles. De ahí que se hable de sus efectos de lente gravitatoria.

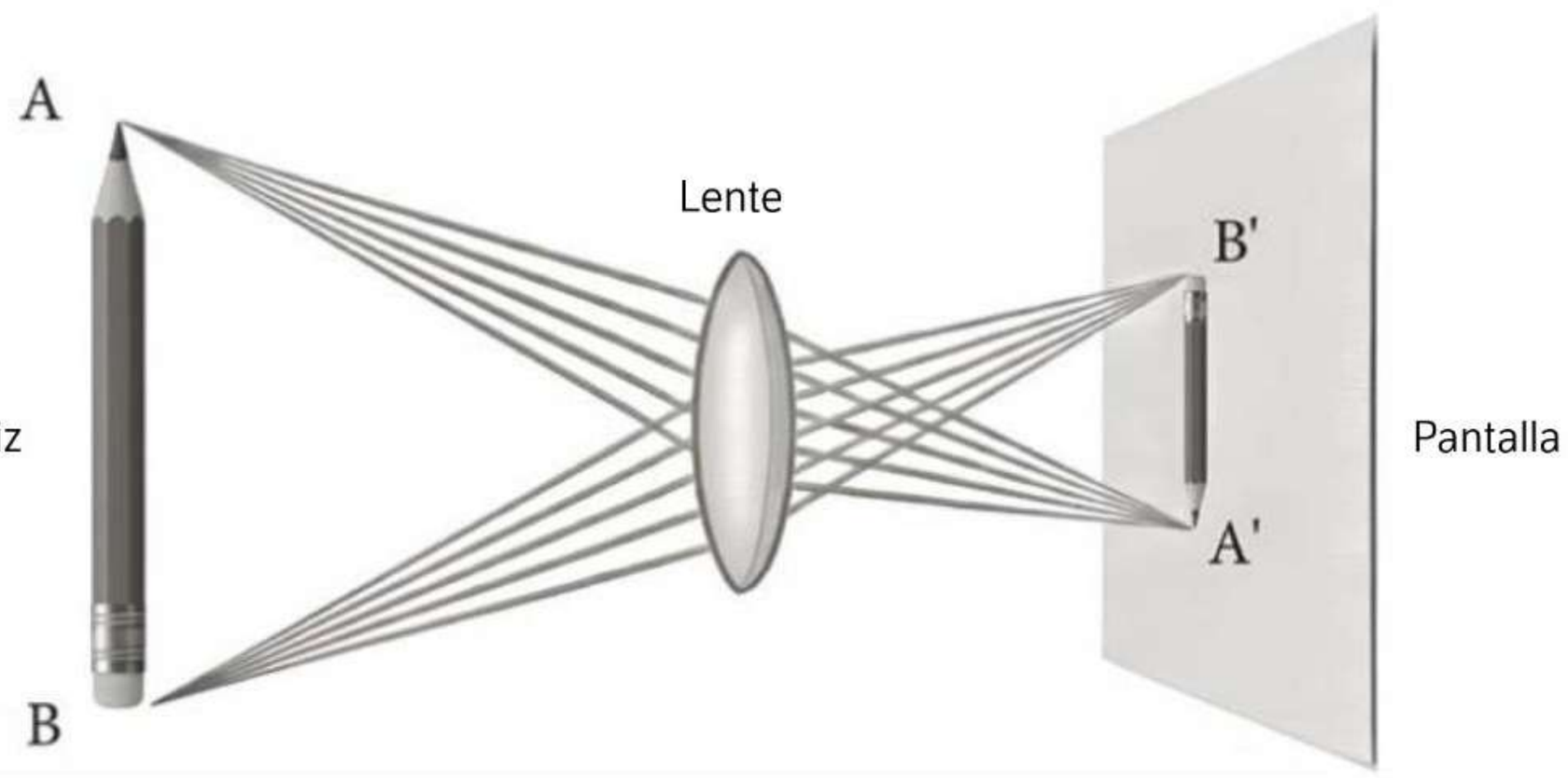


Figura 1. Los rayos de luz se desvían al atravesar el material que compone la lente (fenómeno que recibe el nombre de «refracción»). La curvatura convexa con la que se talla el vidrio de la lente también afecta a sus trayectorias. La suma de ambos efectos hace que todos los rayos de luz que partan de un determinado punto del lápiz, y atraviesen la lente, lleguen a un mismo punto de la pantalla.

Las lentes crean una imagen desviando la luz que emiten o reflejan los objetos. Tomemos, por ejemplo, el lápiz que se muestra en la figura 1. De cada punto de su superficie parten rayos luminosos en múltiples direcciones. Todos los rayos que partan del punto A, en su extremo superior, y que atraviesen la lente, se desviarán hasta otro punto, A', en la pantalla. Algo semejante sucede con los rayos que partan de B y toquen la lente: acabarán todos en B'. La misma acción se repite para cualquier punto de la superficie frontal del lápiz. La lente lleva a cabo, por tanto, una separación selectiva de rayos, debido a la propia geometría convexa de su contorno y al modo en que la luz se desvía al atravesar el vidrio que la compone. Esta suma de efectos hace que la lente asigne a cada punto del lápiz un punto distinto de la pantalla. Como resultado, en ella se proyectará una imagen invertida del objeto, que conserva toda la información que la luz había recogido sobre la forma del lápiz al reflejarse en su superficie. Esta transmisión de datos por mediación de la luz es lo que llamamos «ver», puesto que nuestros ojos contienen una lente —el cristalino— que proyecta una imagen invertida en las células fotosensibles de la retina.

Las lentes gravitatorias producen un efecto semejante sin necesidad de recurrir a un trozo de vidrio. No es el paso a través de un material transparente lo que desvía los rayos luminosos y los dirige a un mismo foco, sino la propia gravedad que los atrae. Estos rayos luminosos pueden proceder, bien de estrellas o galaxias situadas muy lejos de la perturbación gravitatoria, bien de su vecindad. En el primer caso, el agujero negro genera una imagen distorsionada del fondo estelar, creando halos o multiplicando las imágenes, por ejemplo. Su presencia puede volverse más

LA RADIACIÓN DE HAWKING RESULTA POR COMPLETO INDETECTABLE A DISTANCIAS ASTRONÓMICAS

conspicua cuando materia procedente de estrellas, polvo o gas interestelar comete la imprudencia de aproximarse demasiado al horizonte de sucesos. Entonces el espacio-tiempo, que se encuentra rotando en torno a la singularidad, arrastra en su desplazamiento a toda esa materia, precipitándola en una caída en espiral dentro del sumidero gravitatorio. En el proceso, eleva su temperatura, que puede llegar a alcanzar miles de veces la temperatura de la superficie del Sol. Ese flujo de materia caliente adopta la forma de un disco que gira en el mismo sentido que el agujero negro y que recibe precisamente el nombre de «disco de acreción». Se trata de un disco de gas incandescente, cuyo brillo delata la presencia del escurridizo, invisible, agujero negro agazapado en su centro.



Disco de acreción y chorros de partículas generados en torno a un agujero negro en rotación.

La materia del disco de acreción se encuentra cargada eléctricamente y su movimiento de caída en espiral alimenta poderosos campos eléctricos y magnéticos que, a su vez, aceleran las partículas cargadas del disco. Debido a esta retroalimentación, el pozo gravitatorio instaura en el espacio-tiempo una colosal bomba de extracción de partículas que opera a escala cósmica. Este mecanismo desvía parte de la materia que se dirigía al horizonte de sucesos y la expulsa a lo largo del eje de rotación. Se establecen así dos potentes chorros de partículas en sentidos opuestos, con un alcance extraordinario, que puede superar el millón de años luz. Esta descomunal emisión constituye la enigmática señal de los cuásares.

En los primeros años de la década de 1970, los físicos empezaron a estudiar cómo la distorsión del espacio-tiempo en la vecindad de un agujero negro podía afectar a la luz procedente tanto de fuentes luminosas lejanas como del disco de acreción. Cuando un agujero negro se interpone entre nosotros y un fondo de estrellas o nebulosas, lo primero que hace es recortar en él una silueta oscura. En esa silueta echamos de menos todos los rayos de luz que nos hubieran alcanzado de no ser por la interferencia del agujero negro. Se trata de rayos que se pierden en la singularidad y que, por tanto, nunca llegan hasta nosotros. Su ausencia crea un vacío, un manchón negro que, en principio, podríamos asociar con el contorno circular del horizonte de sucesos (figura 2).

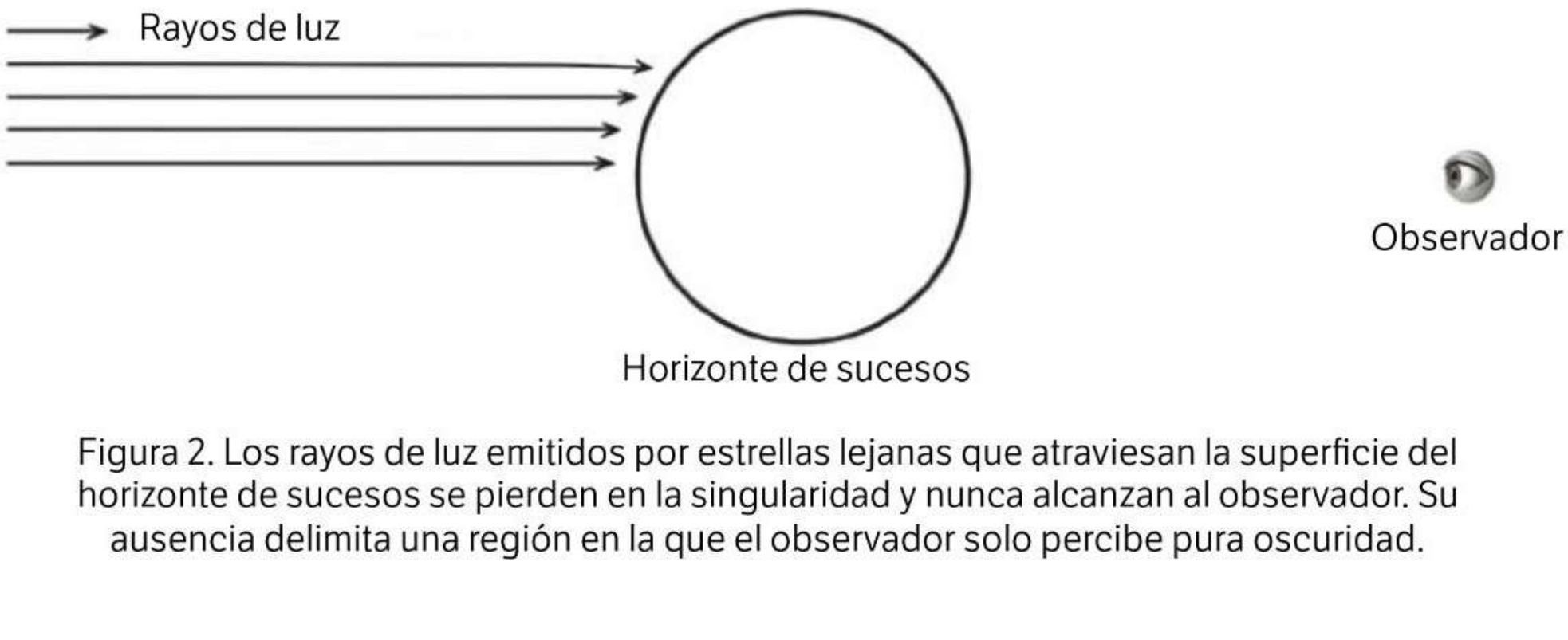


Figura 2. Los rayos de luz emitidos por estrellas lejanas que atraviesan la superficie del horizonte de sucesos se pierden en la singularidad y nunca alcanzan al observador. Su ausencia delimita una región en la que el observador solo percibe pura oscuridad.

Podríamos asociar ese contorno al de una esfera opaca que se interpusiera entre nosotros y una fuente luminosa, como un balón de fútbol situado frente a una lámpara encendida. En el caso del balón, habría rayos de luz que nos alcanzarían después de casi rozar su superficie esférica, rayos que, sin embargo, no pasan de largo la superficie del horizonte de sucesos. No lo hacen porque el agujero negro distorsiona hasta tal punto el espacio de su entorno, que consigue desviar rayos más alejados. A pesar de que sus trayectorias no apuntaban al horizonte, la gravedad las tuerce hasta conducirlas hasta su fatal destino en la singularidad (figura 3). Un observador lejano también echa en falta su luz en la imagen que se hace del fondo estrellado, lo que agranda la región de perfecta oscuridad. Es decir, la negrura que percibe se extiende más allá del contorno del horizonte de sucesos.

Solo a partir de una cierta distancia, los rayos de luz que se internan en los vericuetos del espacio-tiempo profundamente distorsionado por el agujero negro logran esquivar la singularidad y pueden alcanzar así a un observador remoto (figura 4). El boquete de negrura abierto en el fondo de estrellas por todos los rayos de luz perdidos —más amplio que el perímetro que encierra el horizonte de sucesos— recibe el nombre de «sombra» del agujero negro.

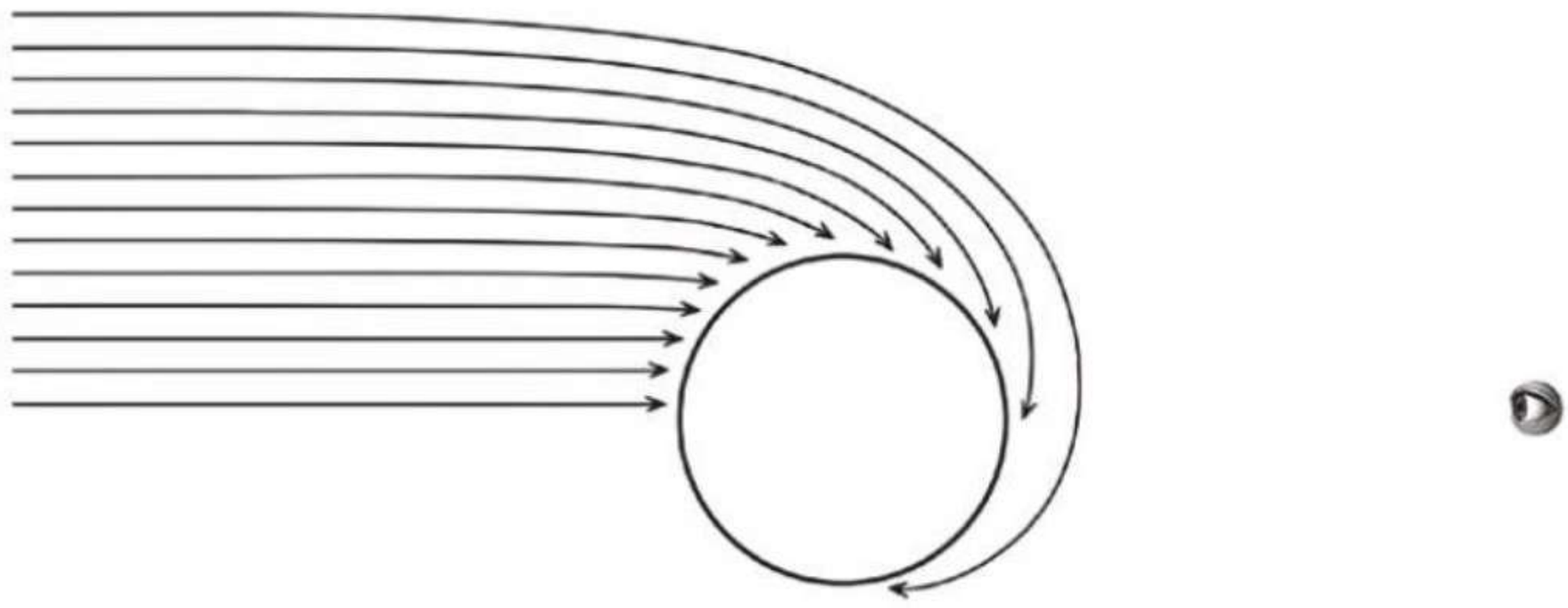


Figura 3. La atracción gravitatoria del agujero negro sustrae más rayos del fondo luminoso que aquellos que bloquearía el horizonte de sucesos si su superficie perteneciera a una esfera de materia ordinaria.

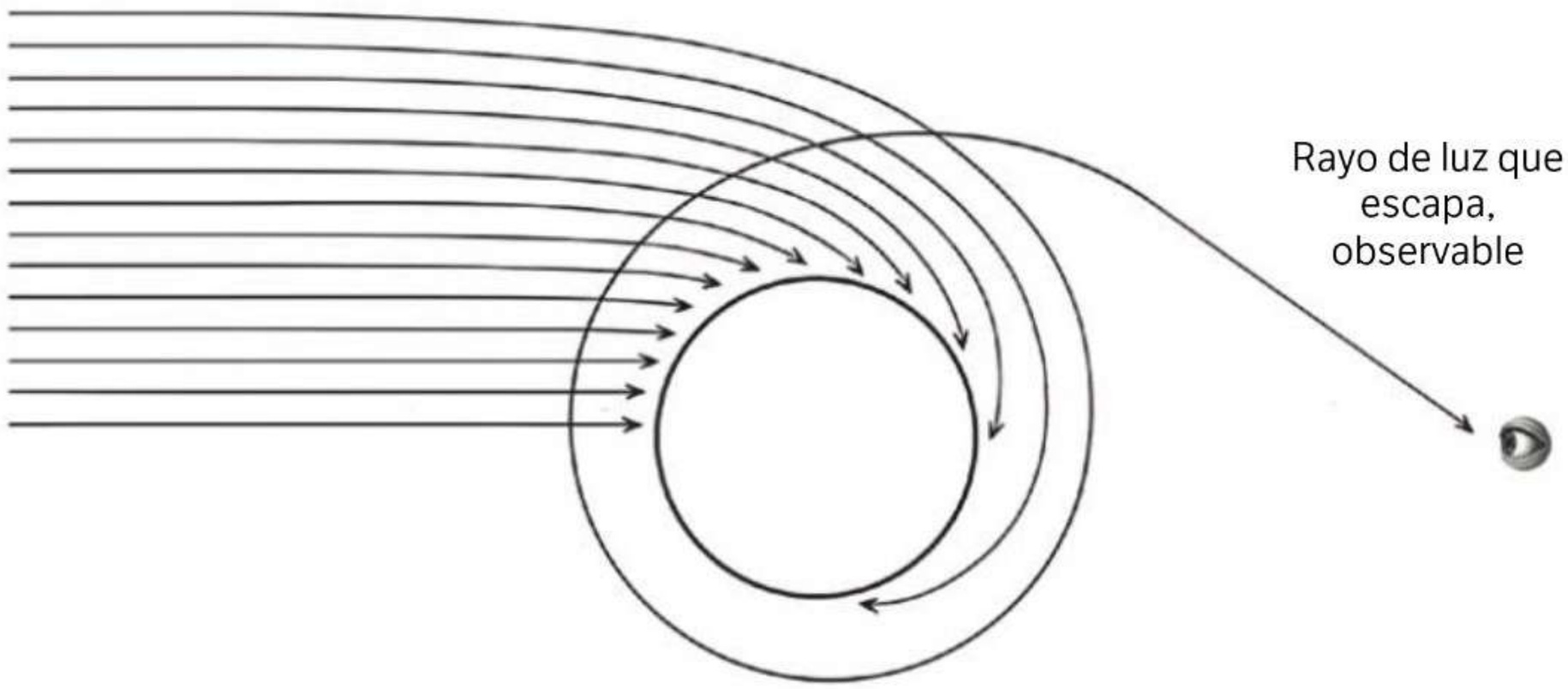


Figura 4. A partir de una cierta distancia, los rayos de luz procedentes del fondo estelar por fin se ven desviados hacia direcciones que no acaban en el horizonte de sucesos.

El primer científico que se aplicó a estudiar este laberinto de trayectorias con el propósito de comprender qué clase de imágenes podría producir la interferencia de un agujero negro fue el físico estadounidense James Bardeen. Lo hizo en el verano de 1972, durante una estancia en Francia, en la École de Physique des Houches. Cabría concluir que la sombra de un agujero negro se debería ajustar al contorno de un círculo perfecto, dado que la superficie del horizonte de sucesos es una esfera, y así sería en el caso de un agujero negro de Schwarzschild, es decir, de un agujero negro inmóvil. Bardeen se basó, empero, en la nueva solución de Kerr, que describía un agujero negro en rotación. Este movimiento de giro arrastra consigo el espacio-tiempo e introduce una asimetría que afecta a las trayectorias de los rayos luminosos, deformando la sombra circular: la achata por un extremo y la abomba por el otro (figura 5).

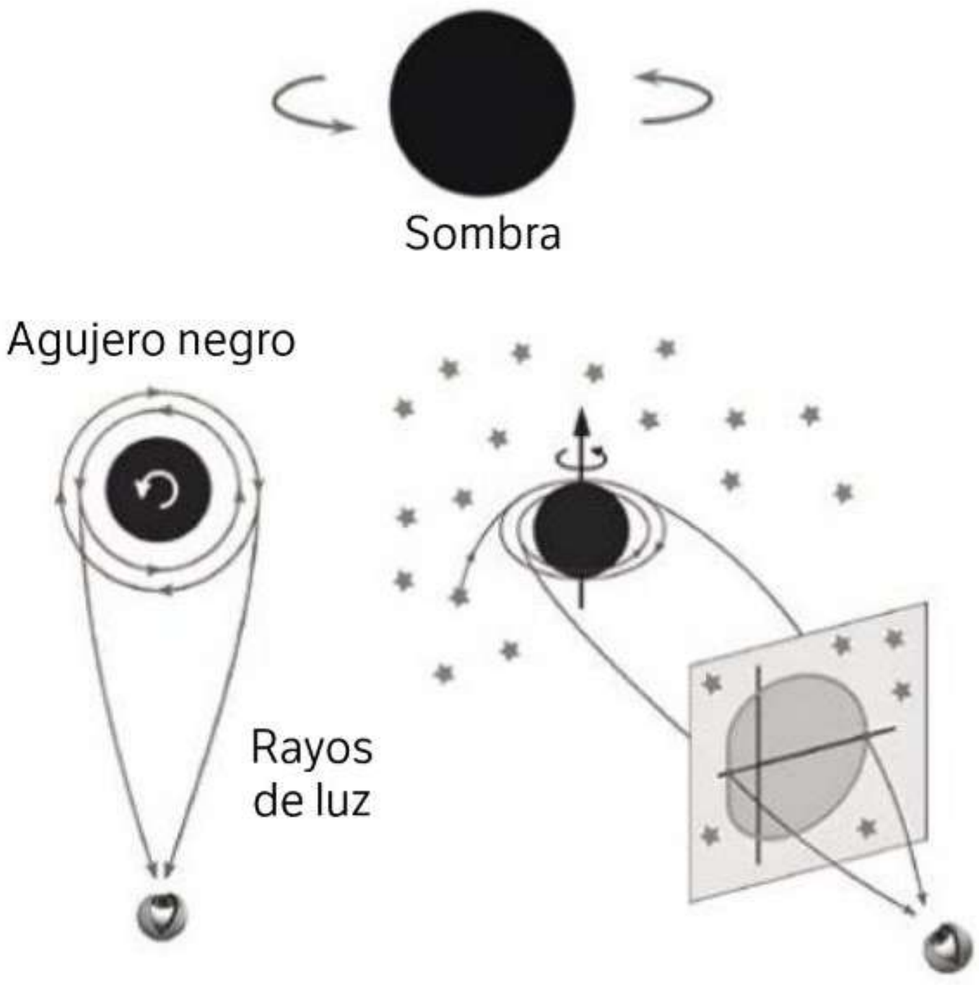


Figura 5. Sombra de un agujero negro que rota como una peonza frente al observador, en torno a un eje vertical. Se achata en el extremo que el movimiento de giro aproxima al observador (izquierda) y se abomba en el extremo que se aleja del observador (derecha). Fuente: una adaptación de la figura 6 de Calculating black hole shadows: *Review of Analytical Studies*, de Volker Perlick y Oleg Yu. Tsupko.

Bardeen siguió profundizando en la cuestión con la ayuda de uno de sus estudiantes de doctorado, Chris Cunningham. En 1973 publicaron un artículo en el que consiguieron determinar qué aspecto presentaría un sistema doble, compuesto por una

estrella y un agujero negro de Kerr. La estrella giraba en torno al agujero en una órbita circular estable. Obviamente, la órbita que consideraron se extendía más allá del horizonte de sucesos. La estrella se hallaba, por tanto, a una distancia segura.

El artículo de Bardeen y Cunningham —«Apariencia óptica de una estrella que gira en torno a un agujero negro de Kerr extremo»— contenía un dibujo que mostraba cómo iría registrando un observador alejado el desplazamiento de la estrella alrededor del agujero negro. Su movimiento se representaba a través de una secuencia numerada de posiciones (figura 6). Lo primero que llama la atención del dibujo es que no presenta una sola órbita, sino dos. Es decir, el agujero negro produciría dos imágenes de la misma fuente luminosa: una imagen primaria y una imagen secundaria. Esta duplicación provoca el espejismo de dos órbitas, de dos estrellas. Además, el modo en el que la distorsión gravitatoria del espacio-tiempo afecta a los rayos de luz emitidos por la estrella deforma el aspecto de las órbitas. No se ven como elipses, que sería lo esperado para un observador que contempla un cuerpo que describe una órbita circular frente a él. La estrella parece seguir en cambio una trayectoria peculiar, que dibuja el contorno de un sombrero. Esta forma hace que el agujero negro nunca llegue a eclipsar la estrella a pesar de que a veces, en su recorrido, se interponga entre ella y el observador.

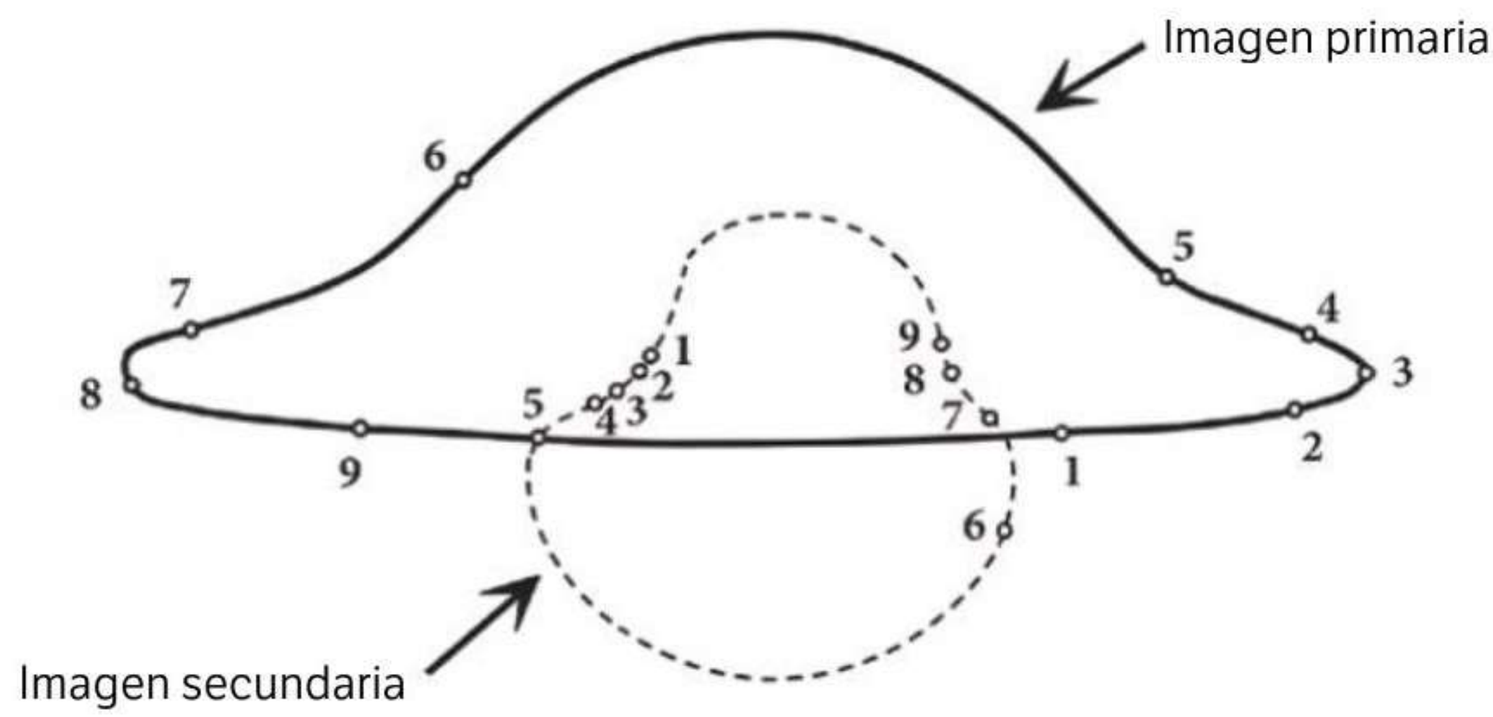


Figura 6. Imágenes primaria (línea continua) y secundaria (línea discontinua) de una secuencia de posiciones (numeradas) de una estrella que orbita un agujero negro. Se advierte cómo la secuencia se trastoca en la imagen secundaria respecto de la primaria. Es decir, las posiciones que se sitúan en el lado derecho de la figura en la imagen primaria aparecen en el lado izquierdo en la imagen secundaria. Y viceversa. Se aprecia también una inversión vertical.

La capacidad que tiene el agujero negro para torcer los rayos luminosos que cruzan sus inmediaciones explica la producción de imágenes dobles y la circunstancia de que la estrella nunca llegue a ocultarse detrás de él (figura 7). De hecho, la gravedad puede forzar a algunos rayos a dar infinidad de vueltas a su alrededor antes de dejarlos escapar, generando así imágenes terciarias, cuaternarias, quinarias... cada vez más débiles y ceñidas a la sombra.

LA SOMBRA DE UN AGUJERO NEGRO SE DEBERÍA AJUSTAR AL CONTORNO DE UN CÍRCULO PERFECTO

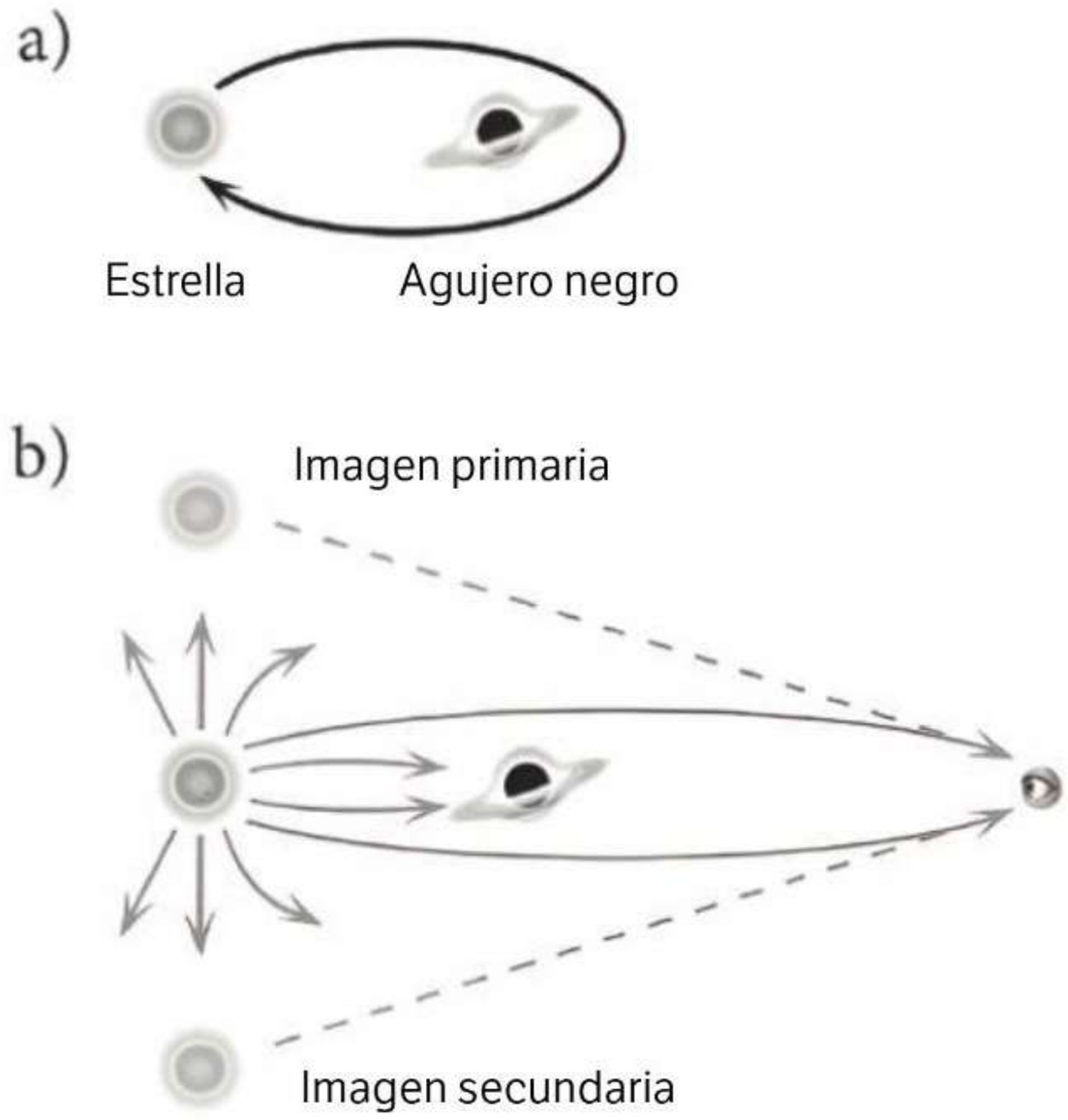


Figura 7. a) Esquema del sistema formado por una estrella que orbita alrededor de un agujero negro. b) La estrella emite rayos de luz en todas las direcciones y el agujero negro tuerce muchas de sus trayectorias desviándolas hacia un observador remoto, generando múltiples imágenes de la estrella. En la figura se muestra solo la producción de dos imágenes, la primaria y la secundaria.

En el contorno del sombrero y en la órbita duplicada —que se dan a conocer por primera vez en *Apariencia óptica de una estrella que gira en torno a un agujero negro de Kerr extremo*— reconocemos ya el perfil icónico de Gargantúa, el agujero negro supermasivo de *Interstellar*. Bardeen y Cunningham estudiaron qué clase de imágenes produciría la gravedad a partir de un fondo de estrellas o de una fuente luminosa puntual, mucho más próxima, que girase alrededor de un agujero negro. El siguiente paso era sustituir la fuente puntual —una estrella— por algo mucho más aparatoso: un disco de acreción. Es lo que hizo Cunningham en 1975, en un artículo plagado de fórmulas que esta vez no venía acompañado de ninguna ilustración.

La primera imagen realista de un disco de acreción se debe al astrofísico francés Jean-Pierre Luminet. El sistema que consideró estaba compuesto por un agujero negro de Schwarzschild, estático, sin rotación, y un disco de acreción muy fino. El observador se situaba lejos, frente al disco, y lo contemplaba prácticamente de canto. Desde esta perspectiva recibía la impresión de un Saturno tenebroso, ceñido por un anillo resplandeciente, visto a través de una lente deformante (figura 8). En el caso de Saturno, si se observase de frente desde una posición ligeramente elevada, la sección del anillo más alejada quedaría oculta por el cuerpo del planeta. No sucede lo mismo con el disco de acreción, que el espectador ve completo, incluida la porción que queda detrás del agujero, porque esta se levanta como si se doblara hacia arriba el ala de un sombrero (figura 9). Quedan así a la vista tanto la cara superior del disco (imagen primaria) como la cara inferior (imagen secundaria). Es el mismo efecto que ya se apreciaba en la órbita duplicada de Bardeen y Cunningham. Si se comparan las figuras 6 —que corresponde a un agujero de Kerr— y 8 —de un agujero de Schwarzs-

«AL BUSCAR EL OJO DE DIOS, NO VI MÁS QUE UNA ÓRBITA VASTA, NEGRA Y SIN FONDO», DESCRIBE *EL CRISTO DE LOS OLIVOS*

child—, se advierte cómo la ausencia de rotación no modifica la estructura general de las imágenes primaria y secundaria. Luminet elaboró su imagen calculando qué trayectorias seguirían —de acuerdo con las ecuaciones de Einstein— los rayos luminosos emitidos por las distintas regiones del disco de acreción. Lo hizo con la ayuda de una computadora IBM 7040, del tamaño de un armario, en la que había que introducir los datos mediante tarjetas perforadas. Como Luminet no disponía de un software gráfico capaz de traducir a una imagen los números que iba escupiendo la máquina, tuvo que ocuparse él mismo de crearla a mano alzada, con tinta china y recurriendo a una técnica impresionista. Compuso su dibujo a base de puntos, concentrando más puntos en aquellas zonas donde los cálculos indicaban que la intensidad luminosa era mayor. Luego obtuvo el negativo de la ilustración resultante. El fondo blanco se convirtió así en la negrura del espacio. Las gotitas de tinta china se transformaron en puntos brillantes (figura 8).

ENLACE AL CANAL
x.com/byneontelegram
Ó escanea el código QR:



Figura 8. Dibujo de Jean-Pierre Luminet que muestra qué aspecto presentaría el disco de acreción en torno a un agujero negro.

Al margen de las matemáticas o de la física que encierre, se trata de un dibujo de una ejecución notable, que pone de manifiesto los múltiples talentos de Luminet, que exceden con mucho los límites de la ciencia. El francés ha publicado varios libros de poesía y novelas históricas, ha trabajado como grabador y escultor, y hasta ha sacado tiempo para desarrollar una carrera musical. Su personalidad encarna como pocas la simbiosis entre cultura y agujeros negros, así que tendremos que hacerle caso cuando afirma que el poema «El Cristo de los olivos», de Gérard de Nerval, describe de manera metafórica, pero ajustada, la experiencia de contemplar un agujero negro:

Al buscar el ojo de Dios, no vi más que una órbita vasta, negra y sin fondo, donde la oscuridad que la habita siempre se acrecienta e irradia su horror sobre el mundo. Un extraño arcoíris bordea ese pozo sombrío, umbral del caos antiguo, cuya sombra es la nada, espiral que devora los Mundos y los Días.

Luminet no solo determinó el efecto de la distorsión gravitatoria sobre las trayectorias de los rayos. También investigó cómo afectaría a otras propiedades de la luz, como su intensidad y su longitud de onda. Así, comprobó que la gravedad estiraría las ondas luminosas y las debilitaría. Antes de completar su estudio, tuvo en cuenta una última cuestión: la influencia de la rotación del disco de acreción en el aspecto de la luz que emite. En el extremo en el que la materia gaseosa se aproxima al observador, esta se mostraría más brillante y desplazada al azul. En el extremo que se aleja de él, aparecería más apagada y desplazada al rojo. Por eso, en la figura 8 se advierte una clara asimetría en el resplandor del disco, más brillante a la izquierda, más mortecino a la derecha.

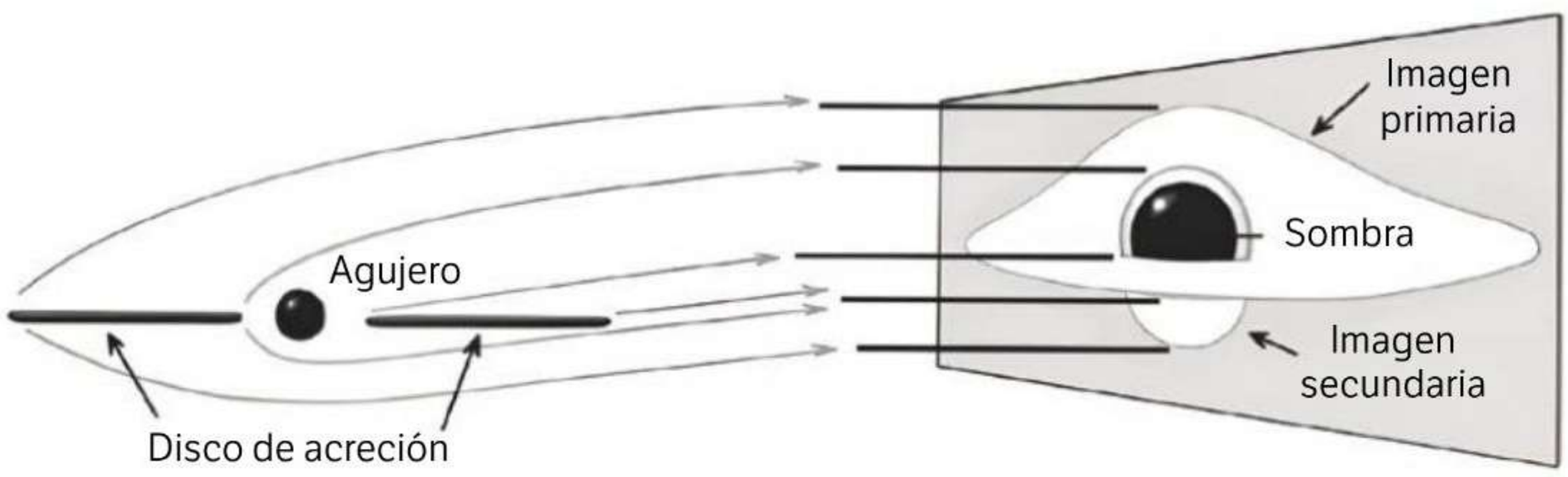


Figura 9. La estructura general que se aprecia en la figura 6, para la órbita de una fuente luminosa puntual en torno a un agujero negro, aflora de nuevo en el caso de todo un disco luminoso. La imagen primaria muestra la cara superior del disco de acreción; la secundaria, la cara inferior. Luminet trabajó con las ecuaciones de un agujero negro de Schwarzschild, sin rotación. Por eso, la sombra es circular.

La revista de divulgación científica más popular de Francia, *La Recherche*, fue la primera en publicar el dibujo de Luminet, en 1978, en un artículo de título poco original, que remitía una vez más a Edgar Allan Poe: «Los agujeros negros: Maelstroms cósmicos». Mientras recorrían un texto en el que tropezaban una y otra vez con las palabras *lumière* («luz») y *lumineux* («luminoso»), algunos lectores pensaron que el apellido del autor, Luminet, era una pequeña broma privada y que se trataba de un pseudónimo. El mismo dibujo volvió a aparecer un año después, en esta ocasión en un artículo científico en inglés, acompañado del correspondiente aparato de ecuaciones y datos técnicos. Luminet cerraba el artículo con la siguiente observación: «Así, nuestra imagen podría representar muchas fuentes relativamente débiles como, por ejemplo, el agujero negro supermasivo cuya existencia en el núcleo de M87 ha sido sugerida recientemente por Young et al. (1978)». Un comentario presciente, ya que la primera imagen de las inmediaciones de un agujero negro —obtenida, no a partir de las ecuaciones de Einstein, sino de los registros de varios radiotelescopios— correspondería precisamente al disco de acreción del agujero negro que se aloja en el centro de la galaxia elíptica Messier 87. Un bonito paralelismo entre el trabajo artesanal de Luminet con una plumilla y el *software* sofisticado que utilizó la colaboración del Telescopio del Horizonte de Sucesos (más conocido como EHT, por sus siglas en inglés: *Event Horizon Telescope*). Entre la primera imagen extraída de la teoría y la primera imagen extraída de la realidad. Cuarenta años las separan.

Se puede decir, por tanto, que en el intervalo de tiempo que media entre la publicación del artículo de James Bardeen, en 1972, y la publicación del artículo de Jean-Pierre Luminet, en 1979, los físicos lograron precisar qué clase de efectos ópticos produce un agujero negro razonablemente realista en tres escenarios: sobre un fondo de estrellas, sobre una estrella que orbite a su alrededor y sobre el flujo de materia de un disco de acreción. A lo largo de las décadas siguientes, los investigadores disfrutaron de una mejora exponencial en la capacidad de computación de sus ordenadores y en las prestaciones de sus programas gráficos. Con ellos generaron imágenes cada vez más complejas y detalladas, en color y en movimiento, que exhibían agujeros negros observados desde toda clase de ángulos y distancias. La difusión de estas obras tuvo un alcance desigual. Algunas se mostraron en congresos científicos y se discutieron en artículos de investigación. Otras se llegaron a proyectar en planetarios o se subieron a internet. En cualquier caso, el grueso de la población no se apercibió, como es lógico, de la creación de todo este nuevo imaginario. A lo sumo, lo hizo la comunidad de aficionados a la divulgación científica.

Mientras tanto, los remolinos cósmicos siguieron campando a sus anchas en las pantallas de cine y televisión. Los podemos encontrar en el episodio «Cuestión de tiempo», de la serie *Stargate SG-1* (1998), en el piloto de la serie *Andrómeda* (2000) o en la nueva versión de *Star Trek* de Jeffrey Jacob Abrams (2009). La alternativa más popular al Maelstrom fue el disco negro, estilo *Space: 1999*. Rara vez el departamento de arte se apartaba de esta incipiente tradición iconográfica y, cuando lo hacía, generaba imágenes desconcertantes, como el colosal ojo de iris dorado y pupila nebulosa que todo lo devora en «El planeta imposible», una entretenida aventura protagonizada por la décima encarnación del *Doctor Who* en 2006. El planeta imposible era, por cierto, un blaneta. Todas estas películas y series aplicaron el corta y pega a partir de producciones anteriores e ignoraron alegremente todo lo que habían aprendido los astrofísicos sobre el aspecto de los agujeros negros. Algo muy distinto sucedía por la misma época con la ciencia ficción escrita, en la que ya podemos encontrar descripciones rigurosas, debidas a autores con una sólida formación científica. Es el caso de *Aproximación al perimelasma*, por ejemplo, o de *El buceo de Planck*, dos relatos de 1998. El primero lo escribió Geoffrey Alan Landis (físico e ingeniero) y el segundo, Greg Egan (matemático). «Perimelasma» es el término que inventó Landis para designar la posición más próxima a un agujero negro de un cuerpo que lo esté orbitando (se inspiró en la unión de dos palabras griegas: peri, «cerca», y melas, «negro»).

En el terreno audiovisual, la transferencia de conocimiento no se produjo realmente hasta el estreno de *Interstellar*, en cuyos títulos de crédito descubrimos el nombre de un discípulo aventajado de John Wheeler: Kip Thorne.

CINE Y RELATIVIDAD GENERAL: UNA CITA A CIEGAS

A pesar de las apariencias, la ciencia ficción suele hablar más del presente que del futuro. Con todo, aunque no tenga verdadera vocación de profeta, a veces sus vaticinios se cumplen. Muchos inventos increíbles que hicieron volar la imaginación de los lectores de *Amazing Stories*, *Astounding Stories* o *Science Wonder Stories* —compartiendo espacio con alienígenas, dimensiones alternativas o plantas mutantes— se terminaron haciendo realidad mucho antes de lo esperado. A medida que el

siglo XX maduraba, las relaciones entre ciencia e imaginación se fueron volviendo más estrechas. Las aplicaciones tecnológicas introdujeron los avances científicos en la vida cotidiana de las personas y, por tanto, también en sus sueños. En las décadas de 1960 y 1970, la ciencia ficción se había consolidado ya como uno de los pilares del entretenimiento, gracias sobre todo al concurso del cine y la televisión. Su popularidad sirvió para despertar numerosas vocaciones científicas en niños que siguieron cultivando su afición al llegar a la edad adulta. La figura del profesional que simultaneaba su trabajo de ingeniero, físico o biólogo con una carrera más o menos intensa como autor de ciencia ficción se fue volviendo cada vez menos anómala. La imagen que estos científicos se habían formado de la ciencia procedía, en buena medida, de las historias que habían leído o visto en una pantalla siendo muy jóvenes. En justa correspondencia, cuando crecieron contribuyeron a modificar la imagen del género, al volcar en él como autores la experiencia que habían ganado en los laboratorios o la universidad.



PRINCETON UNIVERSITY

El astrofísico estadounidense Kip S. Thorne en 1972, durante sus primeros años como profesor en Caltech.

Estas idas y venidas, estos trasvases entre fantasía y experiencia, volvieron más borrosas las fronteras que separaban la ciencia de la ficción, dando lugar a amplios espacios en los que ambas podían integrarse y coexistir. En este contexto, a nadie extraña que James Cameron, uno de los directores que más ha hecho por renovar el cine de ciencia ficción (*Terminator*, *Alien*, *Abyss*, *Avatar*...), comenzara a estudiar la carrera de física. O que uno de los mayores expertos en relatividad general, Kip Thorne, discípulo de John Wheeler y ganador del premio Nobel de Física de 2017, interpretara un papel significativo en la génesis de dos hitos de la ciencia ficción popular: *Contact* e *Interstellar*.

No resulta exagerado afirmar que Kip Thorne ha consagrado su vida a la relatividad general. La teoría de la gravedad de Einstein captó su interés desde muy pequeño, después de que cayera en sus manos un libro de divulgación escrito por George Gamow, *Un, dos, tres... infinito*. Nada más obtener el grado de física en el Instituto Tecnológico de California, Thorne se propuso completar un doctorado en relatividad general, desoyendo el coro de voces piadosas que le advertían de que pocas áreas de investigación podía escoger que le ofrecieran peores perspectivas laborales. Si se empeñaba en seguir esa senda, se convertiría en un paria, en un excéntrico marginal del mundo académico. Huyendo del desánimo, sus pasos lo condujeron inevitablemente a la escuela que John Wheeler había fundado en Princeton. El gran gurú de la relatividad y sus discípulos lo recibieron con los brazos abiertos y calmaron su sed de paisajes espacio-temporales extremos, agujeros negros y singularidades. El propio Wheeler ofició como director de su tesis, que defendió en 1965, centrada en la exploración de espacio-tiempos con simetría cilíndrica.

En Princeton, Thorne también frecuentó la compañía de Robert Dicke y se dejó contagiar por su ambición de ampliar el soporte experimental de la teoría de Einstein. Otro investigador, que se encontraba entonces de visita en Princeton, Joseph Weber, le reveló la existencia de una nueva vía para poner a prueba las ecuaciones de la relatividad general: la detección de ondas gravitatorias. Thorne se llevó de vuelta al Instituto Tecnológico de California el entusiasmo de Wheeler y Dicke, y la visión de Weber, y fundó en la Costa Oeste su propio grupo de investigación. Muy pronto se estableció como una figura de referencia en el campo de la astrofísica relativista, tanto en el frente teórico, explorando ideas con una fuerte carga especulativa, como en el experimental, colaborando de manera decisiva en el desarrollo de una incipiente tecnología para la detección de ondas gravitatorias, basada en el fenómeno de la interferencia. El coste de este último proyecto se fue incrementando hasta desbordar la capacidad presupuestaria del Instituto Tecnológico de California. A Thorne no le quedó más remedio que asociarse con la competencia, con otro proyecto muy semejante que estaba promocionando el MIT. Fusión que condujo, a través de un sinfín de conflictos y vicisitudes, a la construcción de LIGO (sigla en inglés de *laser interferometer gravitational-wave observatory*, es decir, «observatorio de ondas gravitatorias mediante interferometría láser»).

LIGO acabaría por convertirse en una obra digna de un faraón, la más cara financiada hasta la fecha por la Fundación Nacional para la Ciencia de Estados Unidos. Por suerte para sus instigadores, también se cobró uno de los mayores éxitos científicos del siglo XXI. El 14 de septiembre de 2015, LIGO participó en la celebración del centenario de la teoría de la relatividad general de Einstein con la primera detección de una onda gravitatoria, producida durante la colisión de dos agujeros negros. Si había una noticia capaz de sacar a John Wheeler, Joseph Weber y Robert Dicke de sus tumbas, era esa. El acontecimiento le valdría a Thorne el premio Nobel de Física de 2017. Echando la vista atrás, no hizo tan mal al desoír a los agoreros que en sus tiempos de estudiante habían presagiado su muerte profesional en el campo de la relatividad general.

¿Qué llevó entonces a este brillante investigador a sacar las ecuaciones relativistas del puro y elevado santuario de las revistas científicas para arrastrarlas por el lodo del puro entretenimiento? ¿Cómo un físico de su prestigio fue captado para la causa más abyecta, la de alimentar la ilusión de que los viajes a otras galaxias resultan viables o de que es posible visitar el corazón de un agujero negro y regresar para contarlo? Toda la culpa recae sobre un sospechoso habitual de iconoclasia científica. Toca llamar al estrado a Carl Sagan.

A lo largo de su vida, Sagan se implicó en una asombrosa variedad de proyectos, que le permitieron dar rienda suelta a una curiosidad polifacética e infatigable. Dos puntos de anclaje le ayudaron a no perderse en el laberinto de su hiperactividad: su obsesión por la astronomía y su puesto de profesor en la Universidad de Cornell. Su interés por la ciencia despertó a través de la ficción. Primero, con la

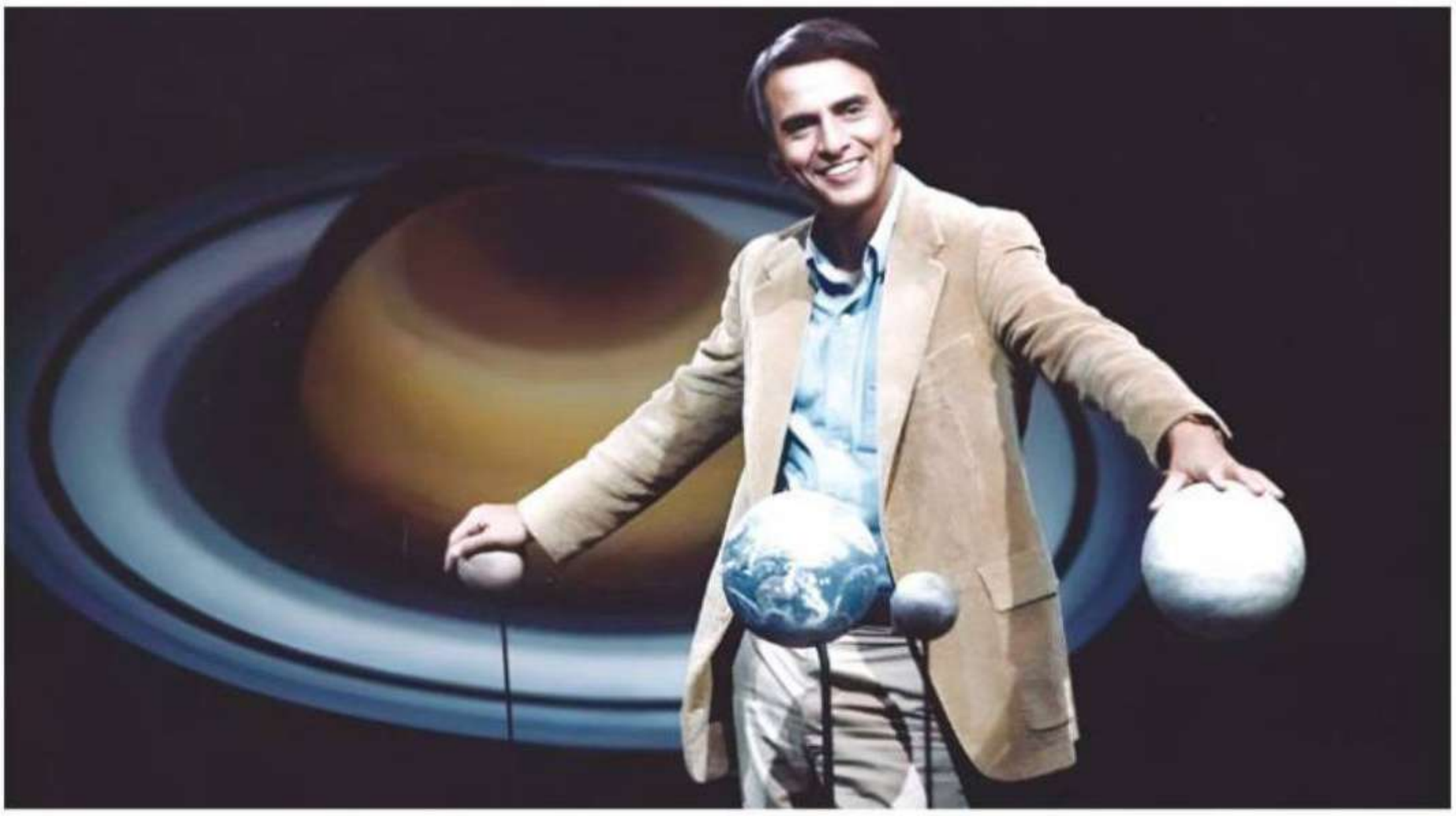
SAGAN SE IMPLICÓ EN UNA GRAN VARIEDAD DE PROYECTOS QUE LE PERMITIERON DAR RIENDA SUELTA A SU CURIOSIDAD

lectura temprana de las obras de Herbert George Wells y Edgar Rice Burroughs; poco después quedaría deslumbrado por la corte de escritores que nutrían las páginas de la revista *Astounding Science Fiction*. Burroughs fue uno de los grandes artífices de la cultura popular del siglo XX, sobre todo gracias a la creación del personaje de Tarzán, que supo sobreexplotar a través de toda clase de medios extraliterarios, con particular éxito en el cine y los cómics. Sus novelas del ciclo de Barsoom, ambientadas en Marte y protagonizadas por John Carter, supusieron la vía de entrada a la ciencia ficción para varias generaciones de autores, como Ray Bradbury, que llegó a saludarlo como «el escritor más influyente en toda la historia del mundo». Sin necesidad de compartir el entusiasmo hiperbólico de Bradbury, se puede detectar la huella de Burroughs en un vasto linaje de personajes y mundos de fantasía, que podría arrancar en Buck Rogers, Superman o Flash Gordon y extenderse hasta *Avatar*. Nada tiene de extraño, pues, que Carl Sagan sucumbiera al encanto de Barsoom:

> Para trasladarse al planeta Marte, a [Carter] le bastaba con plantarse en un campo abierto, extender los brazos y expresar su deseo. Al menos, eso es todo lo que conseguí desentrañar acerca de cuál era su método. Y a una edad temprana, a los ocho o nueve años, traté con verdadero ahínco de someter el método de Carter a una prueba experimental. Dio igual cuánto lo intentara, siempre fracasé... puede que no del todo para mi sorpresa, aunque todas las veces pensé que tenía una posibilidad de éxito.

Aunque se vio forzado a descartar la estrategia de John Carter, el anhelo de viajar a otros planetas nunca abandonó a Sagan. Durante muchos años, un póster del Marte de Burroughs colgaría en el pasillo que conducía a su despacho en la Universidad de Cornell. Esta exposición inicial a las aventuras ambientadas en otros mundos se vio reforzada por las primeras oleadas de la histeria OVNI que azotó Estados Unidos durante la Guerra Fría. Con el tiempo, el espíritu crítico también desmontaría la fe de Sagan en los platillos volantes, pero no en la vida extraterrestre. En la ciencia encontraría vías más confiables para viajar a otros planetas con la imaginación. Dio un primer paso, medido y cauteloso, en esa dirección con su tesis doctoral: Estudios físicos de los planetas. Pronto se dejaría llevar por el deseo de explorar vías más heterodoxas. Sagan prestaba atención a la razón, pero también a su intuición, lo que le condujo a especular libremente, obteniendo como resultado aciertos notables e ideas un tanto peregrinas. Su obsesión por hallar vida fuera de la Tierra le impulsó a buscarla en cualquier rincón del sistema solar, aun en los más inhóspitos, ya fuera la superficie de la Luna, Júpiter, las nubes de Venus o Mercurio. Sus mayores logros se produjeron en el estudio de las atmósferas planetarias. Contribuyó a explicar los cambios estacionales de Marte, las elevadas temperaturas en la superficie de Venus y la niebla anaranjada de una de las lunas de Saturno, Titán.

AUNQUE SE VIO FORZADO A DESCARTAR LA ESTRATEGIA DE CARTER, EL DESEO DE VIAJAR A OTROS PLANETAS NUNCA ABANDONÓ A SAGAN



EDUARDO CASTANEDA

Carl Sagan en el set de su revolucionaria serie documental *Cosmos: Un viaje personal* (1980).

El encanto irresistible de Sagan y su facilidad de palabra fueron un imán que atrajo multitudes. También le granjeó las inevitables envidias de un cierto sector del mundo académico, sobre todo después de que la serie *Cosmos* —el programa más visto de la televisión pública estadounidense— lo catapultara a la categoría de icono de la cultura popular, no a la altura de Tarzán, pero casi. Sagan encarnó la más efectiva campaña de publicidad a favor de la NASA, de la exploración espacial y de la búsqueda de vida fuera de nuestro planeta. En un momento delicado, en el que se miraba con suma desconfianza a los físicos —que habían sumido al mundo, sin pedirle permiso, en el pánico nuclear—, Sagan renovó la fascinación por la ciencia desviando la atención hacia las estrellas.

X, Instagram, LinkedIn... no hubieran introducido grandes cambios en la vida de Carl Sagan. Él mismo era una red social ambulante, que lo mismo podía presentarte a Paul Newman que al dalái lama. No tiene, por tanto, nada de particular que a lo largo de los años fuera forjando una amistad con Kip Thorne. Un continente los separaba. Sagan vivía en Nueva York y Thorne en California, pero ambos iban y venían de una costa a otra de Estados Unidos. Sagan se desplazaba a menudo al Laboratorio de Propulsión a Reacción para trabajar en las misiones Mariner, Viking, Voyager y Galileo, que enviaron sondas espaciales a casi todos los planetas del sistema solar. El Laboratorio de Propulsión a Reacción se encontraba en Pasadena, sede también del Instituto Tecnológico de California. Por su parte, Thorne fue profesor visitante en Cornell. Ambos cultivaban el mismo campo, la astrofísica, pero lo hacían desde márgenes opuestos.

Prueba de que la relación entre los dos científicos se había vuelto estrecha es que, en septiembre de 1980, Sagan le propuso a Thorne una cita a ciegas con una de sus mejores amigas, Lynda Obst. Thorne llevaba entonces tres años divorciado y arrastraba todavía la resaca emocional de un matrimonio que había durado diecisiete y en el curso del cual habían nacido sus dos hijos, Bret y Kares Anne. Por su parte, Obst se encontraba en un punto de inflexión profesional que, entre otras

cosas, también había precipitado su divorcio. Había dejado atrás su puesto como editora en *The New York Times* para trasladarse a Los Ángeles y trabajar en una productora de cine. Allí se encargaba de valorar la pila de guiones que descargaban a diario en el correo y andaba a la caza de toda clase de ideas que pudieran inspirar una buena película. Como parte de estas labores de prospección, le propuso a Sagan que desarrollara una historia en la que se plasmara su visión de la búsqueda científica de vida extraterrestre. Sagan no pudo decir que no a una oferta que, de algún modo, cerraba un círculo muy personal. Un círculo que arrancaba en las aventuras de ciencia ficción que lo habían engatusado de niño con la posibilidad de vida en otros mundos. El testigo había pasado de la ficción a la investigación científica y ahora regresaba a la ficción, que le permitiría cumplir anhelos inconfesables que la prosaica realidad de la investigación no había logrado satisfacer. En la historia que desarrollaría con Obst, *Contact*, una radioastrónoma, Ellie Arroway, ve realizado el sueño de Sagan y detecta una señal de origen extraterrestre, que procede del entorno de una de las estrellas más brillantes del firmamento, Vega, situada a unos veinticinco años luz del Sol.

La historia describe, desde una perspectiva plausible para un científico, cómo sería un primer contacto con una civilización extraterrestre y el subsiguiente viaje de Ellie Arroway hasta Vega. Es decir, se trata, en esencia, de la vieja fantasía *pulp* que había cautivado a Sagan en su niñez, pero depurada de toda la escoria de científicos locos, violaciones flagrantes de las leyes físicas, alienígenas con delirios imperialistas y tecnologías abracadabrantes que harían rechinar los dientes a cualquier astrónomo profesional. Mantener este equilibrio entre rigor y fantasía no fue nada fácil de conseguir. «En mi vida he hecho nada más difícil», recordaría Obst. «Fue un ejercicio socrático agotador. Intenté infundir en Carl las reglas del drama que debe seguir cualquier guion de cine, pero él era tan crítico que no me dejaba». Después de un largo tira y afloja —en el que también tuvo una participación crucial Ann Druyan, coguionista de *Cosmos*, que más tarde se casaría con Sagan—, consiguieron completar un tratamiento de sesenta páginas y mantener su amistad intacta. El argumento encantó al jefe de Obst, que quiso comprarlo de inmediato. A continuación, *Contact* siguió el camino de tantos otros proyectos cinematográficos que tratan de abrirse camino en Los Ángeles y pasó por las manos de incontables guionistas que dieron lo mejor de sí mismos para volver completamente irreconocible el concepto original.

Mientras el tratamiento se perdía en el acostumbrado limbo hollywoodiense, Sagan decidió explorar la idea por su cuenta y se sentó a escribir una novela. Llama la atención que en la médula de *Contact* encontramos una historia muy semejante a la de *El siseo cósmico* de Edmond Hamilton, aunque su forma de abordarla no pueda resultar más diferente. En el mensaje que recibe Ellie Arroway se cifran las instrucciones detalladas para que los científicos terrestres construyan una máquina. Hamilton incorporó un solo ingrediente de ciencia genuina en su relato, el descu-

EN *CONTACT* ENCONTRAMOS UNA HISTORIA MUY SEMEJANTE A LA DE *EL SISEO CÓSMICO* DE EDMOND HAMILTON

brimiento de Jansky de ondas de radio de origen extraterrestre. Ondas que llegaban, por cierto, desde Sagitario A*, el agujero negro supermasivo situado en el centro de nuestra galaxia. Curiosamente, Ellie Arroway detecta su señal procedente de Vega gracias a una red de radiotelescopios instalada en NuevoMéxico que lleva el nombre de Jansky. Donde difieren las dos historias es en el propósito de las máquinas alienígenas. Sagan resiste la tentación de invadir la Tierra con un ejército de pulpos mecánicos autorreplicantes y, en su lugar, presenta un medio de transporte interestelar.

A todo esto, ¿qué fue de la cita a ciegas entre Thorne y Obst? El encuentro tuvo lugar en el estreno mundial de *Cosmos*, que se celebró por todo lo alto en el Observatorio Griffith de los Ángeles, una de las principales atracciones turísticas de la ciudad, gracias en gran medida a su aparición en infinidad de películas, aunque su encanto como localización tenga más que ver con la arquitectura del edificio y con las soberbias vistas que ofrece de la ciudad que con sus prestaciones astronómicas. Es en una terraza del Observatorio Griffith donde, por ejemplo, James Dean se pelea a navajazos en *Rebelde sin causa*. De un humor más romántico, también es allí donde se besan por primera vez Emma Stone y Ryan Gosling en *La La Land*. Thorne y Obst no arrancaron a volar en el planetario ni se pusieron a bailar sobre un reguero de estrellas al son de la banda sonora de Justin Hurwitz, pero tampoco acabaron a navajazos. Se cayeron bien y quedaron más veces, iniciando una relación intermitente que fue perdiendo interés romántico hasta dejar paso a una amistad.



WARNER BROS

Fotograma de la película *Contact* (1997), dirigida por Robert Zemeckis.

En ese punto podría terminar la primera temporada de una serie dedicada al triángulo Sagan-Thorne-Obst. La segunda temporada retomaría a los mismos personajes cinco años después de la cita a ciegas en el Observatorio Griffith. Encontraríamos a Sagan a punto de publicar *Contact*. El libro atraviesa su fase final de edición, la corrección de pruebas de imprenta, en la que el autor hace una última lectura del texto a la caza de erratas, introduciendo aquí y allá alguna pequeña

corrección de estilo. Pero a medida que Sagan va leyendo, crece un runrún de fondo en su cabeza que no le deja tranquilo, que no tiene nada que ver con cambiar tiempos verbales o pescar faltas de ortografía. El mecanismo que ha ideado para trasladar a sus protagonistas hasta Vega no le satisface del todo. La estrella se halla a veinticinco años luz de la Tierra y la lógica de la narración exigía un viaje más corto, que no convirtiera a Ellie Arroway en una jubilada o, peor todavía, en una momia, antes de alcanzar su destino. Puestos a pedir, vendría bien que no tardara más de una hora, para no cortar el ritmo de la historia en un momento en el que esta se precipita ya hacia su desenlace.

Con el fin de recortar drásticamente la duración del trayecto, Sagan había recurrido a un agujero negro, que debía ejercer las funciones de un portal dimensional, pero ahora le entraban dudas de que pudiera desempeñar con dignidad científica el papel que le había encomendado. A fin de cuentas, él era un experto en atmósferas planetarias, no en relatividad general. ¿Por qué no consultar a alguien más ducho en las prestaciones del espacio-tiempo? ¿Por qué no levantar el teléfono y preguntarle a su viejo amigo Kip Thorne? Dicho y hecho. Sagan sorprendió a Thorne justo en el momento en el que este se dejaba caer plácidamente en la butaca de su despacho en la universidad, después de impartir la última clase del semestre. «Perdona que te moleste, Kip», le saludó Sagan, «pero estoy dando los últimos retoques a una novela que trata sobre el primer contacto entre los seres humanos y una civilización extraterrestre, y hay algo que me preocupa. Quiero que la ciencia resulte lo más correcta posible y temo haber metido la pata con la física gravitacional. ¿Podrías echarle un vistazo y decirme qué te parece?».

Dos semanas después, Thorne recibía por correo un voluminoso paquete con el manuscrito de *Contact*. Como a Sagan le corría prisa el favor, Thorne embutió como pudo el tocho en el equipaje y lo fue leyendo durante un viaje en coche desde Pasadena a Santa Cruz, tirado en el asiento de atrás, mientras su exmujer y su hijo se turnaban al volante. Los tres iban a asistir a la graduación de la otra hija del matrimonio, Kares. ¿El veredicto de Thorne? «La novela era entretenida, pero Carl, en efecto, estaba en apuros». Cuando al final de la novela Ellie Arroway cruzaba el horizonte de sucesos de un agujero negro, en realidad no estaba comprando un billete a Vega, como pretendía Sagan, sino al más allá. Nada podía evitar que el sofisticado vehículo alienígena que la transportaba acabara siendo aniquilado en la singularidad. Esas fueron las malas noticias del viaje de ida a Santa Cruz. En el viaje de vuelta, después de la graduación de Kares, en algún punto al «oeste de Fresno, en la autopista interestatal 5», Thorne tuvo una súbita inspiración: «Tal vez Carl podría sustituir su agujero negro por un agujero de gusano a través del hiperespacio».

Los pliegues del espacio-tiempo pueden dar forma tanto a un agujero negro como a un agujero de gusano, aunque se trata de estructuras muy diferentes. Esta última expresión, «agujero de gusano», había sido acuñada precisamente por el director de tesis de Thorne, John Wheeler, enfatizando el papel que pueden interpretar estas estructuras como atajos espacio-temporales. ¿Cuál es el camino más corto entre dos puntos situados en extremos opuestos de una manzana? Para un gusano que se desenvuelva solo en el ámbito bidimensional de su superficie, será una curva que siga el contorno de la fruta. Pero el gusano también puede explotar el hecho de que existe una dimensión adicional y no limitarse a la superficie. Así, puede adentrarse en el volumen de la manzana y abrir un camino más corto, un atajo en línea recta (figura 10).

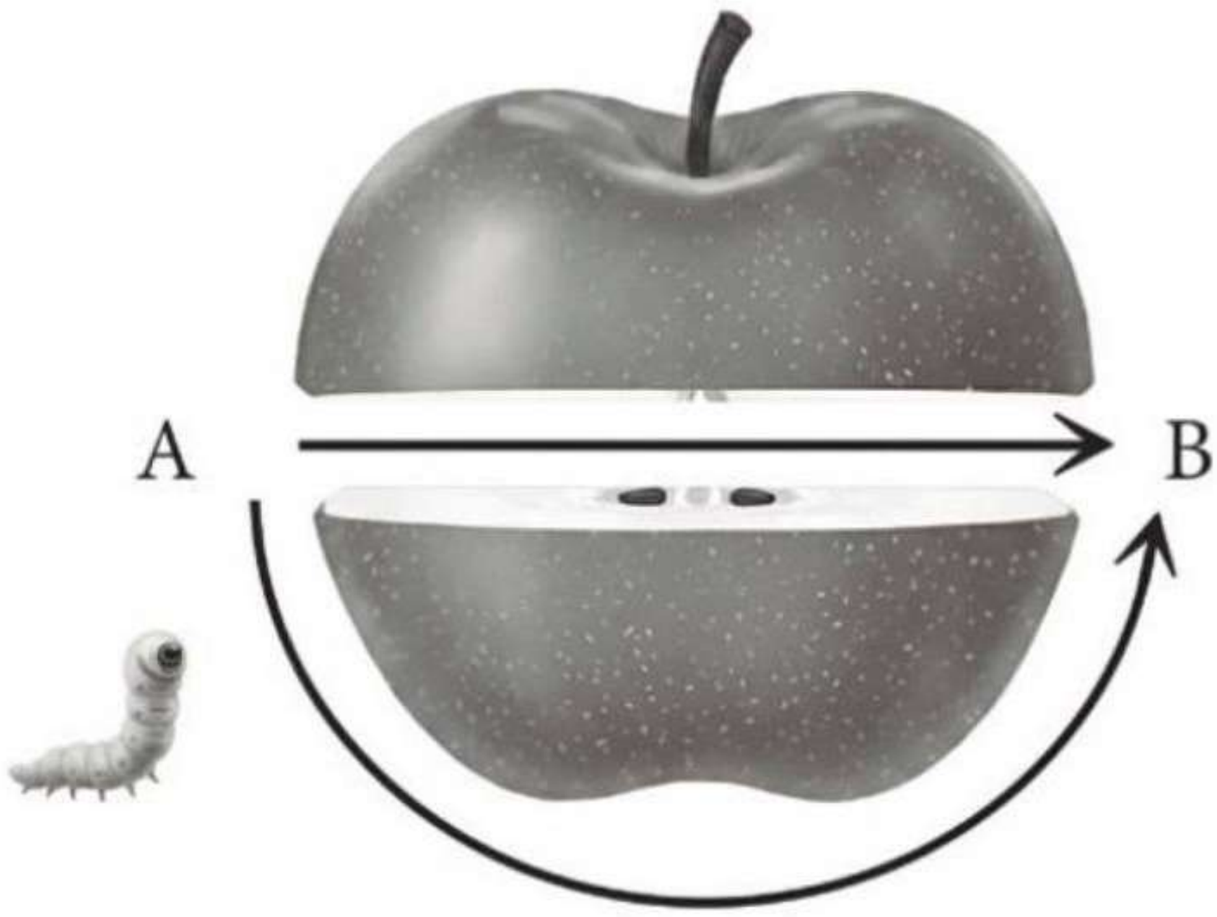


Figura 10. El juego dimensional del gusano y la manzana. Si los movimientos del gusano se restringen a la superficie de la manzana, no le quedará más remedio que contornearla para ir del punto A al punto B. Sin embargo, si tiene acceso a las tres dimensiones del espacio, podrá abrirse un atajo a través del volumen de la manzana.

Podemos extrapolar las dos perspectivas dimensionales con las que estamos considerando la manzana (limitarnos a su superficie bidimensional o aprovechar su hechura tridimensional) y aplicarlas a la geometría del espacio-tiempo. Si Ellie Arroway desea trasladarse desde el sistema solar a Vega a una velocidad muy cercana a la de la luz, invertirá un cuarto de siglo aproximadamente en el trayecto. Siempre y cuando se restrinja al espacio de tres dimensiones que nos muestran nuestros sentidos. Pero ¿qué sucedería si ese espacio estuviera inmerso en un ámbito de más dimensiones? Entonces, igual que la extensión bidimensional de la piel de la manzana se curva a lo largo de una tercera dimensión, albergando en su seno atajos invisibles para una criatura que solo perciba su superficie, el espacio que conocemos podría curvarse en una cuarta dimensión, encerrando atajos que nos pasan inadvertidos. Esos atajos serían como el camino que abre el gusano a mordiscos en la carne de la manzana (figura 11). De ahí que Wheeler los denominara agujeros de gusano. Si Ellie Arroway se adentrara en ellos, podría tardar mucho menos tiempo en llegar a Vega. ¿Por qué no una hora?

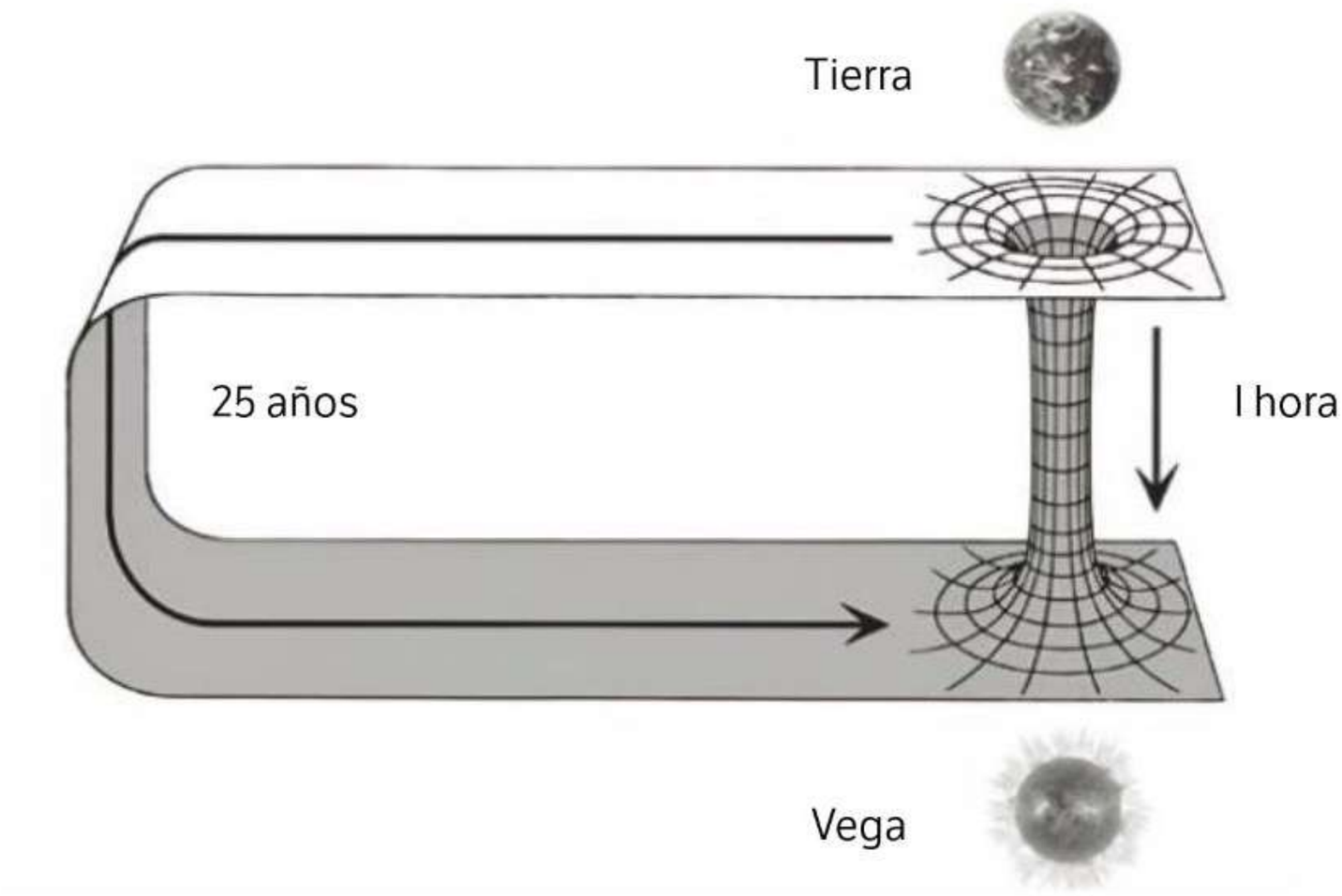


Figura 11. Agujero de gusano adaptado al argumento de *Contact*.

Thorne comunicó la buena nueva a Sagan al regresar a Pasadena. «Kip me contestó con una larga carta», recordaría años después Sagan, sin poder evitar una sonrisa, «que contenía unas cincuenta líneas de ecuaciones argumentadas con todo rigor. Lo que suponía un nivel de detalle en su respuesta a mi llamada telefónica que no me esperaba». Aquellas cincuenta líneas de ecuaciones habían dictado una sentencia inapelable. La imprenta tendría que esperar. Para desesperación de los editores de *Contact*, que habían pagado un adelanto de dos millones de dólares por el libro, Sagan les pidió que retrasaran la impresión de más de doscientos cincuenta mil ejemplares que tenían programada. Acto seguido, se sentó a reescribir una decena de páginas, con el fin de transformar su agujero negro en un agujero de gusano. Si el revisor de la novela hubiera sido Edmond Hamilton, o incluso Isaac Asimov, las cosas hubieran acabado ahí. Pero Thorne era un experto en relatividad general y la resolución del problema planteado por el viaje de Ellie Arroway hizo saltar una chispa que le llevó a cuestionarse su propia comprensión de algunas sutilezas acerca de cómo funciona el espacio-tiempo einsteiniano.

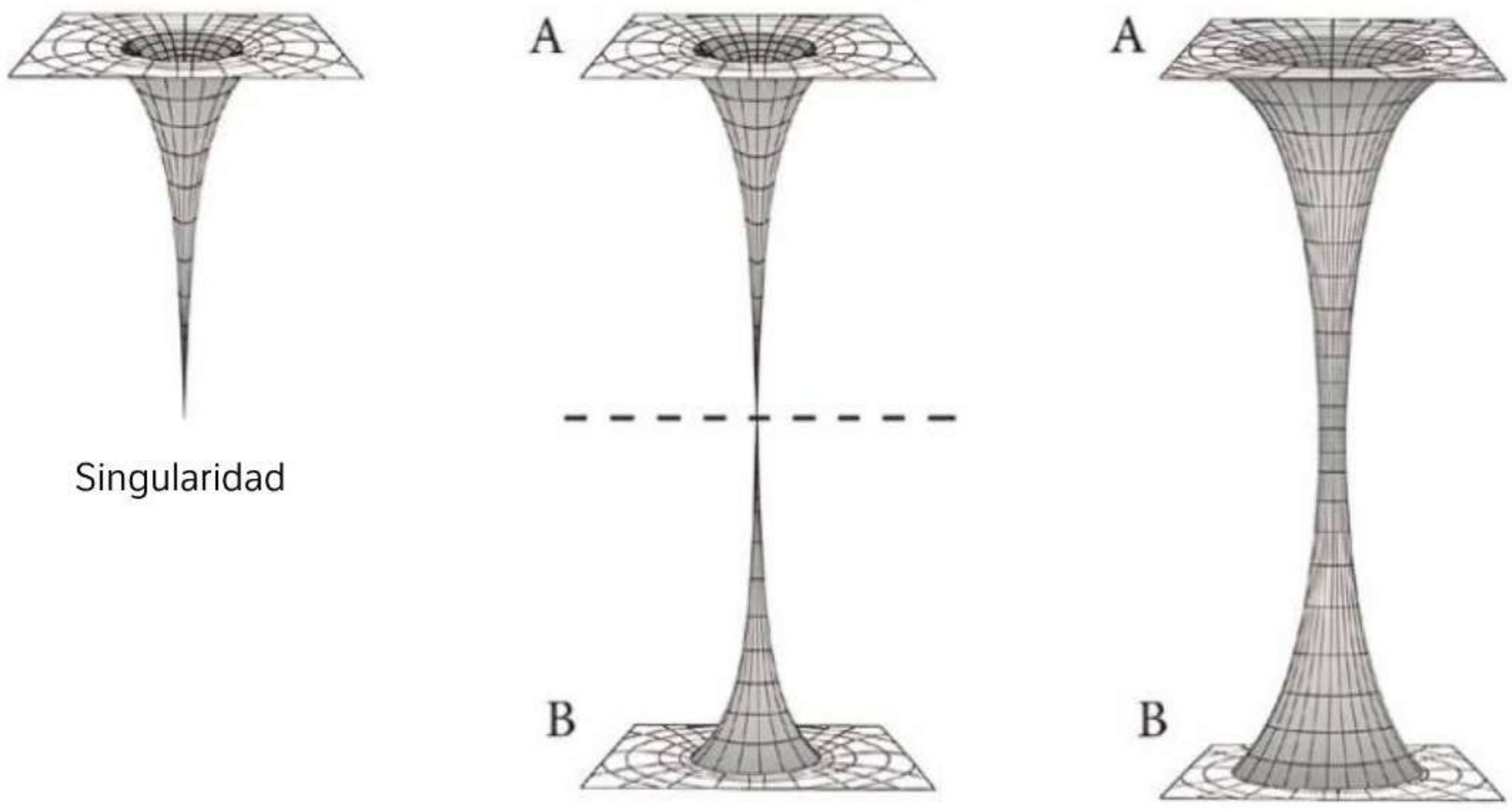


Figura 12. El embudo espacio-temporal del agujero negro (1) se prolonga hasta perfilar un reloj de arena (2). El agujero negro se extiende así a través de su reflejo en un espejo. Al engrosar el punto de contacto de la singularidad (3), se forma un conducto que conecta dos espacio-tiempos (A y B).

De una forma u otra, los agujeros de gusano venían rondando la relatividad general desde prácticamente sus orígenes. En 1916, solo un año después de que Einstein sentara los cimientos de la teoría, el físico austriaco Ludwig Flamm había descubierto una solución a sus ecuaciones que describía un espacio-tiempo peculiar. Lo que hizo fue extender matemáticamente la solución de Schwarzschild —que perfila un sumidero temporal que desagua en la singularidad—, reflejándola en un espejo. De ese modo, las paredes del pozo gravitatorio se van estrechando hasta alcanzar un punto de inflexión en el que la tendencia se invierte y comienzan a separarse cada vez más (figura 12). En el acto, toma forma un pasadizo que conecta dos espacio-tiempos, A y B (o dos secciones separadas del mismo espacio-tiempo). El hallazgo de Flamm

fue recibido como una simple curiosidad, merecedora de una atención puntual, y se perdió entre la multitud de artículos que cada año engrosan las revistas científicas. La idea salió a flote ocasionalmente, solo para volver a hundirse en las aguas del olvido. Albert Einstein y Nathan Rosen la redescubrieron de manera independiente en 1935, por ejemplo, en un intento de desarrollar una nueva teoría atómica a base de combinar las ecuaciones clásicas del electromagnetismo de Maxwell con la relatividad general. Por ese motivo, durante un tiempo los agujeros de gusano recibieron el nombre algo más largo, pero también más honorable, de «puentes de Einstein-Rosen».

En su concienzudo escrutinio de la relatividad general, John Wheeler no pasó por alto las configuraciones espacio-temporales que habían encontrado Flamm o Einstein y Rosen. Con la ayuda de sus estudiantes, incorporó a las ecuaciones toques cuánticos y descubrió que, al hacerlo, los agujeros de gusano se convertían en estructuras dinámicas y, sobre todo, tremendamente inestables. Las leyes de la física no parecían prohibir su existencia, pero, en el caso de formarse, colapsarían de inmediato. Cualquiera que se aventurase a cruzar un puente de Einstein-Rosen, ya fuera un fotón, un átomo o una radioastrónoma con prisas por llegar a Vega, sería aniquilado en el proceso de colapso antes de alcanzar el otro extremo.

Wheeler estaba definiendo esta imagen de los agujeros de gusano en 1962, justo cuando Kip Thorne llamaba a la puerta de su Shangri-La relativista para hacer el doctorado, así que Thorne conocía bien las conclusiones a las que había llegado su mentor. Sin embargo, en su viaje en coche de Santa Cruz a Pasadena, de manera inadvertida, se sorprendió buscando un modo de volver estables los puentes de Einstein-Rosen. Posibilidad que nunca hubiera explorado como investigador, ya que consideraba zanjada la cuestión. Con todo, las necesidades argumentales de *Contact* le empujaron a preguntarse si una civilización mucho más avanzada tecnológicamente que la nuestra podría explotar las leyes de la física para abrir atajos dimensionales transitables. Descubrió que había una manera de evitar el colapso de Wheeler. Para ello, el tejido del espacio-tiempo tendría que incorporar entre sus fibras materia que él denominó «exótica». ¿Exótica en qué sentido? Para el viajero que atravesara el puente, debía presentar una densidad de energía negativa. Cumplido este requisito, las ecuaciones de Einstein permitían a la materia exótica antigravitar y generar la imagen invertida del agujero negro, la base del reloj de arena que se muestra en la figura 12.

Si la gravedad fuerza en un agujero negro de Schwarzschild a que todo converja hacia un punto, estrechando el embudo del espacio-tiempo, la antigravedad hace precisamente lo contrario, que todo diverja a partir de un punto, dilatando el embudo. Este argumento parece sacado de un diálogo de El abismo negro, pero la mecánica cuántica admite, en efecto, la creación de materia exótica. Tampoco hay que dejarse llevar por el entusiasmo y preparar las maletas para Vega porque, de momento, en los laboratorios solo se producen cantidades ínfimas de materia exótica que, desde luego, no bastarían para cimentar la arquitectura de un agujero de gusano como el que podría transportarnos fuera del sistema solar.

CUALQUIERA QUE SE AVENTURASE A CRUZAR UN PUENTE DE EINSTEIN-ROSEN SERÍA ANIQUILADO

El trabajo de Thorne con los agujeros de gusano no hizo sino reconocer el poder de la ficción para dar de sí los marcos conceptuales establecidos por la ortodoxia académica. En colaboración con uno de sus estudiantes de doctorado, Michael Morris, elaboró un primer artículo para dar a conocer sus hallazgos, «Agujeros de gusano en el espacio-tiempo y su uso para el viaje interestelar: una herramienta para la enseñanza de la relatividad general». Lo envió a una revista de física orientada a la educación superior, amparándose, como se advierte en el título, en una pretensión didáctica que quitaba hierro a una especulación que muchos teóricos de la época podían juzgar demasiado aventurada. El mismo año, sin embargo, Morris y Thorne reincidieron con un artículo más breve en una de las revistas de investigación pura y dura más prestigiosas, *Physical Review Letters*. Para un colega de Thorne, Ígor Nóvikov, la aparición de este segundo artículo fue un regalo caído del cielo. Llevaba años queriendo abordar la física de los agujeros de gusano, pero no se atrevía a hacerlo por miedo a que lo ridiculizaran. La desprejuiciada ciencia ficción acudía así al rescate de los investigadores más imaginativos.

Después de sustituir *in extremis* su agujero negro por un agujero de gusano, Sagan entregó por fin el libro a sus editores. La espera mereció la pena. *Contact* entró como un cohete —o como una sofisticada nave interdimensional— en la lista de libros más vendidos. En 1989, cuatro años después, Lynda Obst consiguió recuperar los derechos cinematográficos de la novela. Para entonces ya se desenvolvía como pez en el agua en el inhóspito, caprichoso y a menudo traicionero ecosistema de Hollywood. Había contribuido al desarrollo de Flashdance y había producido Aventuras en la gran ciudad. «Fue un bumerán kármico maravilloso», comentó satisfecha. «Recuperamos la pieza. Y lo primero que hice fue llamar a Carl y Annie para que subieran de nuevo a bordo». Aun así, la producción de la película tuvo que atravesar todavía algunos sobresaltos. Varios directores entraron y salieron del proyecto y se barajaron diversos guiones, en los que se ensayaron algunas variaciones un tanto delirantes del argumento que Sagan había fijado ya en su novela. Por fin, las aguas volvieron a su cauce, Robert Zemeckis se hizo cargo de la dirección y las cámaras comenzaron a rodar a finales de septiembre de 1996. Para entonces Sagan, al que habían diagnosticado dos años antes una mielodisplasia, se encontraba muy enfermo. Llegó a pisar el set de rodaje y a ver cómo Jodie Foster encarnaba a Ellie Arroway, pero murió antes de que se completara el montaje definitivo de la película.

Podemos considerar el trabajo de Kip Thorne en *Contact* como un ensayo general para su principal contribución al mestizaje entre relatividad general y cine palomitero: *Interstellar*. Se advierten varios paralelismos entre la génesis de las dos películas. Thorne intervino en ambas para garantizar que la ciencia de la ficción fuera rigurosa y obtuvo como recompensa una comprensión más profunda de la física. En *Contact* hizo que eliminaran un agujero negro para sustituirlo por un agujero de gusano. En *Interstellar* no se privó de nada y se dio el gusto de incluir en el menú las dos variedades de geometría espacio-temporal. En el origen de esta segunda

DESPUÉS DE SUSTITUIR SU AGUJERO NEGRO POR UNO DE GUSANO, SAGAN ENTREGÓ EL LIBRO A SUS EDITORES

película volvemos a encontrar a Lynda Obst. Después del éxito de *Contact*, le tentó la idea de desarrollar una nueva historia de ciencia ficción con la ayuda de un científico profesional. Por desgracia, no podía repetir su colaboración con Sagan, que ya había muerto. ¿Qué tal resultaría el experimento con su antiguo amante y amigo Kip Thorne? El físico relativista no se hizo precisamente de rogar. De niño había vivido experiencias muy semejantes a las que había tenido Sagan con el Barsoom de Burroughs. En su caso, habían sido las novelas de Isaac Asimov y Robert Heinlein las que habían despertado su anhelo de convertirse en un científico. La vieja ambición de Gernsback —y de otros editores y autores de la ciencia ficción *pulp*— de utilizar la ficción como palanca para fomentar vocaciones científicas había funcionado a la perfección con él. Thorne estaba convencido de que el cine podía operar la misma magia. Por eso, soñaba con hacer un tipo de película muy particular:

En la que el director, los guionistas y los productores respeten la ciencia, se inspiren en ella y la integren de forma completa y convincente en la trama. Una película que ofrezca al público una muestra de las maravillas que las leyes de la física podrían, y pueden, crear en el universo, y de los grandes logros que los seres humanos pueden alcanzar al dominar las leyes de la física. Una película que despierte el interés de muchos espectadores por la ciencia e incluso, por qué no, el deseo de dedicarse a ella profesionalmente.

Steven Spielberg se entusiasmó con el primer tratamiento de *Interstellar* que le hizo llegar Obst, contrató a Jonathan Nolan para que escribiera el guion y estuvo en un tris de rodar la película. Sin embargo, otros proyectos, otros intereses contractuales, se cruzaron en su camino y lo sacaron de escena. Uno de los hermanos mayores de Jonathan, Christopher Nolan, vino a ocupar su lugar. Como es de rigor, las nuevas incorporaciones pusieron todo su afán en transformar de arriba abajo el argumento. En este sentido, *Interstellar* acabó contando otra historia, que no era la historia original de Obst y Thorne, sino una historia de los hermanos Nolan. Al mismo tiempo, no se puede decir que estos se alejaran un ápice de los deseos expresados por Thorne unas líneas más arriba.

PAGAR LOS ERRORES CON TIEMPO

El punto de partida de *Interstellar* nos sitúa en un escenario familiar para los aficionados a la ciencia ficción: el mundo tras una catástrofe global que amaga con extinguir a la humanidad. Un motivo casi tan antiguo como el género. A comienzos del siglo XX, la fantasía de una destrucción universal se solía relacionar con accidentes poco probables, como invasiones alienígenas, colisiones con la Luna o microorganismos que transformaban el mar en una enorme masa de gelatina. El progreso de la ciencia y la tecnología fue perfilando, sin embargo, causas más preocupantes. La posibilidad del apocalipsis cobró una inusitada verosimilitud mediado el siglo, tras las bombas de Hiroshima y Nagasaki. Cerca de su final, el miedo a la hecatombe nuclear encontró en la amenaza del cambio climático una fuerte competidora. Se aprecia aquí una indudable justicia poética, ya que una de las primeras fantasías apocalípticas de la literatura —al margen de mitos y religiones— es precisamente un poema de Lord Byron, «Oscuridad». Byron se inspiró para escribirlo en la erupción del

volcán Tambora producida en 1815, la más poderosa de la que se tiene noticia. Igual que una gota de tinta que se dispersa en el agua, la ceniza del volcán se diseminó por la atmósfera, formando un velo sutil que bloqueó parte de la luz solar. Las temperaturas descendieron en todo el planeta, arruinando las cosechas y castigando con hambrunas a gran parte de la población del hemisferio norte. El año siguiente, 1816, sería recordado como el «año sin verano». El poema de Byron desgrana un rosario de estampas desoladoras de una Tierra helada. El Sol se ha extinguido, el fuego ha consumido los bosques, el hambre acaba por aniquilar a nuestra especie.

En *Interstellar* se dibuja una Tierra abocada al colapso ecológico, perfectamente en sintonía con «Oscuridad» y sus versos: «toda la tierra era un solo pensamiento, y ese pensamiento era la muerte». Las tormentas de arena azotan el planeta mientras las plagas se ceban en las cosechas. Quizá para los insectos o las bacterias la situación no resulte particularmente alarmante, pero la humanidad, que se muere de hambre, se encuentra en un atolladero que parece brindar una única salida: su mudanza a las estrellas. Esta exigencia del argumento se resuelve recurriendo al juguete preferido de Kip Thorne, un agujero de gusano, que muy oportunamente surge cerca de Saturno unas décadas antes de que la crisis climática nos ponga contra las cuerdas. Este portal cósmico conduce hasta un sistema planetario situado en una galaxia remota. El nuevo domicilio presenta sus ventajas e inconvenientes. Ofrece un tentador catálogo de tres planetas potencialmente habitables, pero, a cambio, la humanidad que prospere en ellos tendrá que acostumbrarse a unas vistas deprimentes. Los planetas no orbitan una estrella amigable y cálida, como nuestro Sol, sino un siniestro y colosal agujero negro: Gargantúa, que toma su nombre del gigante de las novelas de Rabelais. Este último era benévolo; el agujero negro, no lo será tanto.

Los protagonistas que recorren esta tramoya científica son un antiguo piloto de pruebas de la NASA, Joseph Cooper, interpretado por Matthew McConaughey, y sus hijos, Tom y, sobre todo, Murph. De hecho, el motor emocional de *Interstellar* es la relación entre Cooper y Murph. Antes de completar el guion, Christopher Nolan



WARNER BROS. PICTURES

La nave modular *Endurance* cruzando los límites del espacio profundo en la película de Christopher Nolan, *Interstellar* (2014)

EL PUNTO DE PARTIDA DE *INTERSTELLAR* NOS SITÚA EN UN MUNDO TRAS UNA CATÁSTROFE GLOBAL

le pidió al compositor de la banda sonora, Hans Zimmer, un breve tema musical que le sirviera de inspiración. No le mencionó que pretendía rodar una película de ciencia ficción monumental. Tampoco le habló de apocalipsis climáticos, éxodos interplanetarios ni agujeros negros supermasivos. Se limitó a informarle de que la historia trataba de un padre que debía abandonar a su hijo para acometer una tarea importante. De ahí que la mejor escena de *Interstellar* tenga lugar en el dormitorio de una granja, en el momento en el que Murph toma conciencia de la magnitud de la separación. El relato adopta, por tanto, la forma de una tragedia, en la que el héroe se ve abocado a perder a sus seres queridos a cambio de salvar a la humanidad. Solo al final, la tragedia colapsa en un *happy ending*. Muchas películas de Nolan parecen sufrir de un síndrome de hiperactividad mental y del estrés de servir a la vez a varios amos. Intenta manufacturar una superproducción para todos los públicos que reviente las taquillas y, al mismo tiempo, crear una película personal, de autor, con una narrativa sofisticada, que se adentre en profundidades existenciales. Este eclecticismo se traduce en obras que a veces exhiben un fascinante carácter poliédrico y otras producen la impresión de perder por completo el foco. En *Interstellar* la relación entre Cooper y Murph se revela como un eje vertebrador inquebrantable, capaz de soportar todas las pretensiones y motivos que Nolan quiera colgar de su película.

El viaje de Cooper resulta más movidito de lo esperado, como cabe esperar, por otra parte, de cualquier expedición ambiciosa. Y cuesta imaginar una expedición más ambiciosa que la que proponen los hermanos Nolan. La nave que pilota Cooper, la *Endurance*, es un arca de Noé que surca el espacio con una carga monótona y postmoderna: miles de embriones humanos congelados en los que se cifra el destino de nuestra especie. En este futuro postapocalíptico, Noé va a lo suyo y no está para preocuparse por la supervivencia de los leones o las jirafas. En cada lance de la aventura, Cooper pagará con tiempo que sacrificará a la relatividad general, haciendo cada vez más improbable el reencuentro con sus hijos. El primer planeta que visita, el más próximo a Gargantúa, se ve severamente afectado por su imponente distorsión gravitatoria, que lo vuelve inhabitable. Los efectos de la dilatación temporal son tan intensos allí que esta parada le costará a Cooper veintitrés años. Es la primera de una rápida sucesión de calamidades, que dejarán a la *Endurance* sin combustible. El único modo de que su cargamento de embriones alcance otro de los planetas consiste en ganar impulso explotando el pozo gravitatorio del agujero negro. Esta maniobra desesperada tiene lugar muy cerca del horizonte de sucesos y consume otros cincuenta años. Además, esta acción exige el contrapeso de una reacción, que fuerza a Cooper a precipitarse al corazón del agujero negro mientras la *Endurance* escapa. La escena recuerda el desenlace de *Pórtico*.

Los guionistas dan aquí un golpe de timón argumental para que Cooper esquive una muerte atroz en la singularidad —el final que, sin duda, hubiera preferido un dramaturgo de la antigua Grecia— y dirigirlo en su lugar hacia un... teseracto. ¿Hasta qué punto resulta inverosímil este giro de los acontecimientos? Hay que

reconocer que, a estas alturas de la película, pasadas dos horas de épica descontrolada, aturdidos por la música de Hans Zimmer, las impactantes imágenes en 4K de Gargantúa y el carisma de Matthew McConaughey, aceptaríamos hasta la aparición de *Kung Fu Panda*. También es verdad que el interior de un agujero negro que rota es más complejo que el de un agujero estático de Schwarzschild, como bien apuntamos al hablar de *El día después de mañana*, de Gerry Anderson. Dijimos entonces que en un agujero de Kerr la singularidad no se reduce a un punto, sino que se extiende a lo largo de un anillo. Esta nueva arquitectura espacio-temporal abre una tímida puerta al turismo dentro de los agujeros negros, con visitas guiadas que no tendrían por qué acabar forzosamente en tragedia. Mucho se ha debatido al respecto y la cuestión no es fácil de dilucidar, sobre todo si tratamos de introducir un flujo de materia —o astronautas— en las ecuaciones.

Sea como fuere, Gargantúa esconde una perla, un teseracto. El símbolo místico y matemático del acceso a dimensiones superiores se presenta como una tabla de salvación inesperada, una vía de salida del agujero negro, para, al abrigo de un cierto abracadabra pseudocientífico, posibilitar in extremis el reencuentro de Cooper con una centenaria Murph. El juego del tiempo, que desgarraba al espectador mientras asistía a la separación irreversible entre padre e hija, se resuelve así con una ligera sensación de trampa. Sin embargo, aquella fracción de la audiencia que todavía no se haya rendido al cinismo celebrará el hábito hollywoodense de no dejar un mal sabor de boca con sus superproducciones, sobre todo después de retener al respetable en su butaca durante casi tres horas.

Si Arthur C. Clarke se inspiró, en efecto, en un agujero negro a la hora de caracterizar el monolito que orbita Júpiter en *2001: Una odisea del espacio*, ese movimiento habría propiciado una interesante carambola. Nolan ha reconocido la influencia de Kubrick en *Interstellar* y el paralelismo entre el acceso de David Bowman al interior del monolito y la entrada de Joseph Cooper en *Gargantúa* resulta evidente. La misma afinidad se advierte en la manera que tienen las dos películas de representar el tránsito de un ámbito físico a otro metafísico. La caída en un agujero negro habría inspirado así la entrada en un monolito negro que, a su vez, habría inspirado la caída en un agujero negro. Un juego de referencias cruzadas cuya dinámica enriqueció el imaginario de estos hijos de la singularidad y su imbricación en la cultura.

Al mismo tiempo que nos cuenta su conmovedora historia de un padre que debe renunciar a sus hijos para salvar a la humanidad, *Interstellar* funciona como un vehículo de divulgación científica particularmente eficaz, tanto de aspectos que sí se pueden rastrear en ficciones anteriores como de otros que se presentan aquí por primera vez ante el gran público. En la película encontramos los dramáticos efectos de la dilatación temporal causada por la gravedad, algunas pinceladas de mecánica cuántica, espacios con más de cuatro dimensiones, agujeros de gusano artificiales, bucles temporales, fuerzas de marea, blanetas, teorías del todo, mecanismos de Penrose... Pero, sobre todo, *Interstellar* imprimió en nuestras retinas la imagen icó-

INTERSTELLAR FUNCIONA COMO UN VEHÍCULO DE DIVULGACIÓN CIENTÍFICA PARTICULARMENTE EFICAZ

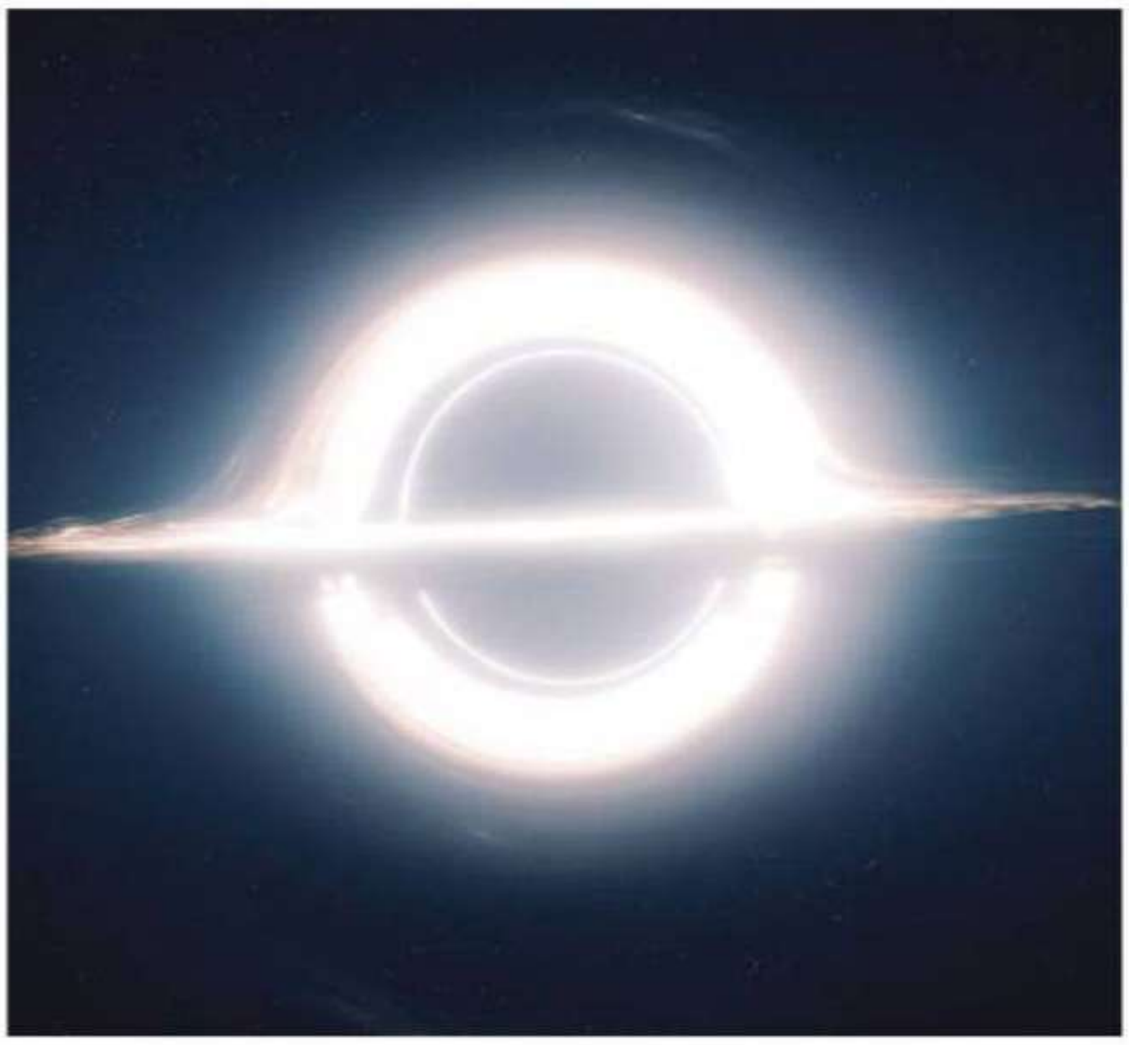


WARNER BROS. PICTURES

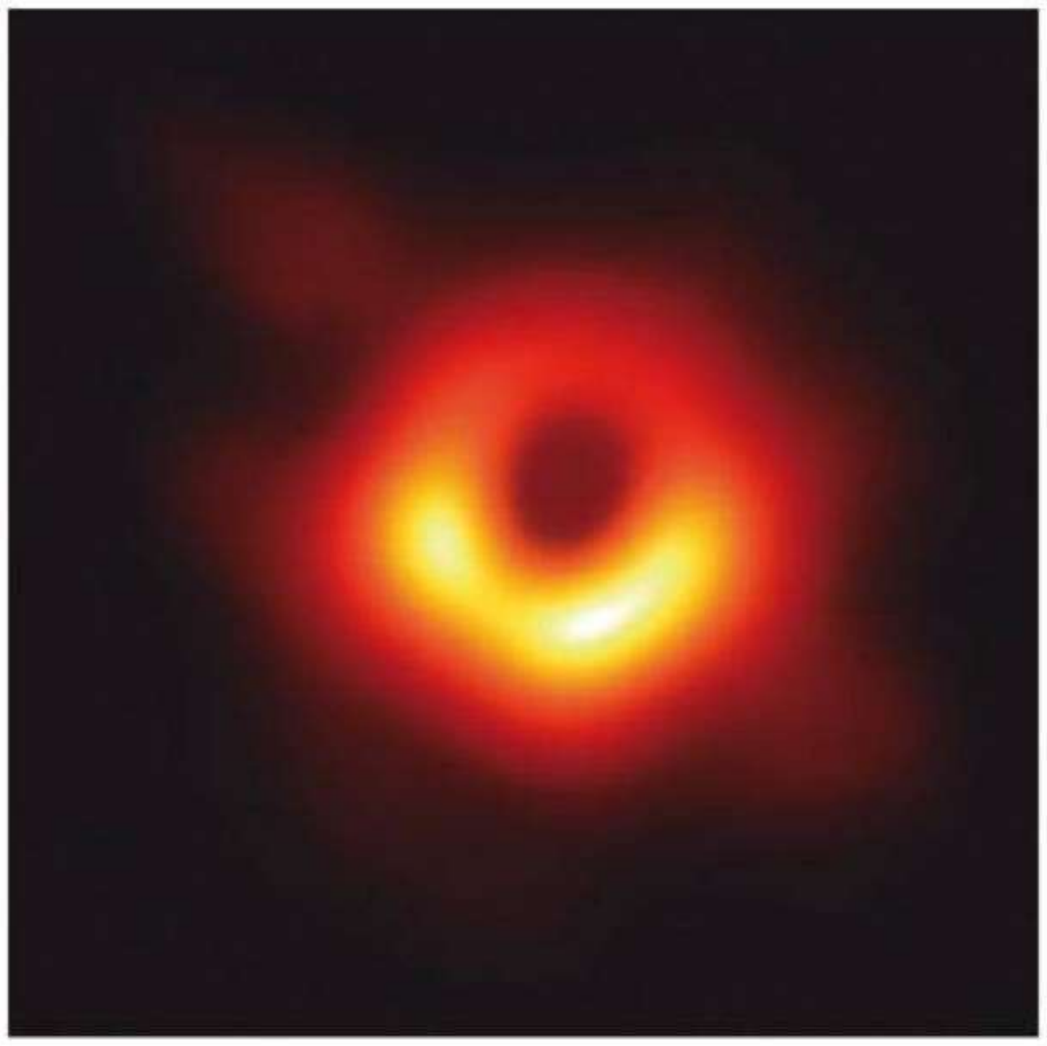
El piloto Cooper (Matthew McConaughey) y su tripulación caminan por un mundo oceánico tras cruzar un agujero de gusano en el film *Interstellar*.

nica de los agujeros negros. El carácter de canon visual de Gargantúa solo le ha sido disputado, muy relativamente, por la propia realidad, por la primera imagen de un agujero negro, obtenida a partir de los datos de la red de radiotelescopios de la colaboración EHT. En cualquier caso, la rotunda espectacularidad de Gargantúa, que toma al asalto los sentidos con la abrumadora banda sonora de Hans Zimmer de fondo, gana la partida al borroso dónut incandescente de M87, aunque solo sea a los puntos.

A veces se ha dicho que hasta *Interstellar* no se había producido una imagen veraz de un agujero negro. Ya sabemos que, fuera del ámbito del cine y la televisión, esa afirmación es falsa. Como tuvimos ocasión de comprobar al comienzo del capítulo, unos cuarenta años antes del estreno de la película, los físicos ya se habían formado una idea bastante aproximada de lo que observaría un astronauta que se aproximara con precaución a un horizonte de sucesos. La calidad de la representación y la riqueza de sus detalles es harina de otro costal, claro. El estudio de efectos especiales Double Negative recibió el encargo de generar las memorables escenas presididas por Gargantúa. Un equipo de cuatrocientas cincuenta personas se puso a disposición del arte de Christopher Nolan y la ciencia de Kip Thorne. Para descifrar y procesar esta última, más críptica, contaban con la mediación del jefe científico del estudio, Oliver James, que, por fortuna, venía armado con un grado en física. Thorne suministró explicaciones, ecuaciones relativistas y código, una auténtica avalancha de información que los técnicos de Double Negative supieron digerir y traducir a lenguaje cinematográfico. Plasmaron las distorsiones de lente gravitacional y la dinámica del flujo gaseoso del disco de acreción en ultraalta definición. Ninguna animación científica había suscitado hasta la fecha semejante ilusión de realismo, dando a un agujero negro relativista el cuerpo y la presencia necesarios, no ya para llenar una pantalla en formato IMAX, sino para desbordarla. La era de los remolinos había concluido. Había llegado la hora de enviar al Maelstrom de vuelta a los océanos.



WARNER BROS. PICTURES



NASA

A la izda., representación del agujero negro Gargantúa en *Interstellar*. A la dcha., la primera imagen de la silueta de un agujero negro supermasivo en el corazón de la galaxia Messier 87 (M87.).

El hecho de que en internet se cantaran las alabanzas de *Interstellar* con el mantra de que la película reproducía el entorno de un agujero negro con un rigor sin precedentes estimuló seguramente las críticas de Jean-Pierre Luminet a ciertos aspectos científicos de la película. Hizo particular hincapié en la visualización del disco de acreción de Gargantúa, que no incorporaba un efecto que sí refleja su dibujo a tinta china de 1978: la asimetría en su resplandor inducida por la rotación de la masa gaseosa. No se puede culpar a Thorne de esta ausencia. El código que envió a Double Negative generaba ese brillo desigual, pero Nolan consideró —no se sabe muy bien por qué— que confundiría a los espectadores y dio instrucciones para que se eliminara de las imágenes.

Luminet ha llegado a sostener que la asimetría en el brillo del disco de acreción constituye la seña de identidad de un agujero negro. El retrato de M87, compuesto a partir de los datos de la colaboración EHT, le daría en parte la razón. A pesar de su grosera falta de definición, el dónut incandescente exhibe claramente esa luminosidad desigual. Cuando el observador de un agujero negro entrecierra los ojos, pierde gran parte de los detalles de la imagen que se está formando de él, pero la asimetría permanece. Además, esa asimetría encierra un tesoro de información. Analizando las diferencias de brillo entre los extremos de la imagen de M87, los científicos han sido capaces de deducir que este agujero negro supermasivo está girando a una velocidad muy próxima a la de la luz: el espacio-tiempo arrastra al disco de acreción en su rotación, forzándolo a recorrer cuarenta y dos millones de metros cada segundo.

Los esfuerzos del equipo de Double Negative fueron premiados con un Oscar y un BAFTA, pero no terminaron de convencer a Luminet. «La imagen de *Interstellar* resulta sin duda impresionante, pero no refleja qué aspecto tendría de verdad un agujero negro», fue su dictamen. En su opinión, el mismo trabajo se había hecho mejor veinte años antes del estreno de la película y no habían hecho

falta cientos de técnicos en efectos especiales ni un presupuesto multimillonario. Había bastado una sola persona, provista de una computadora con una memoria RAM de 256 megabytes. En 1991, un antiguo colaborador de Luminet, Jean-Alain Marck, había realizado un vídeo en color que mostraba lo que vería un observador que describiera diversas trayectorias en torno a un agujero negro, cruzando el disco de acreción y atravesando el horizonte de sucesos. Su animación ofrecía una resolución mucho más pobre que la de *Interstellar*, faltaría más, pero en opinión de Luminet se ajustaba más a la realidad astrofísica. Entre otras cosas, porque tomaba en cuenta la asimetría en el brillo del disco de acreción.

Marck elaboró además una secuencia de imágenes de un disco de acreción captadas desde múltiples perspectivas. Si se aplica un filtro de desenfoque a una de ellas en concreto, tomada no de canto, sino desde un ángulo cenital, se obtiene algo muy parecido al anillo ardiente de M87. El trabajo de Marck se pudo ver en un documental sobre relatividad general producido para el canal de televisión francoalemán Arte y en diversos congresos de física, pero no llegó a publicarse en un artículo científico, lo que dificultó su difusión dentro de la comunidad de astrofísicos.



JEAN-PIERRE/ LUMINET

Simulación del disco de acreción de un agujero negro visto por un observador en pleno movimiento a 7° sobre el plano del disco (Jean-Aude Marck, 1991).

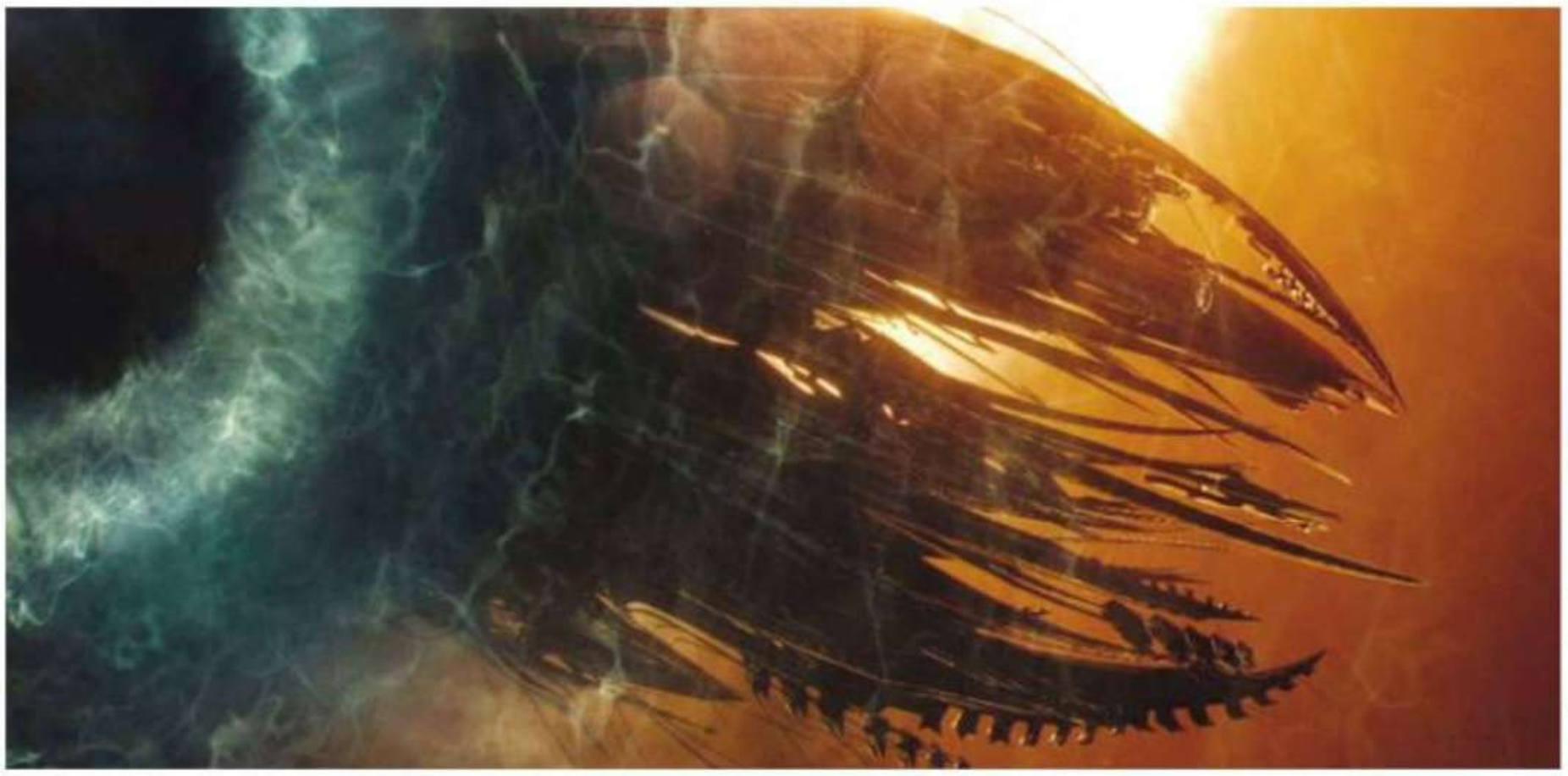
Un aspecto importante, que hemos omitido hasta ahora, es que el disco de acreción de un agujero negro emite luz dentro de un amplio rango de longitudes de onda, tanto visibles como invisibles. El tipo de radiación emita con mayor intensidad depende de una serie de factores, como el espesor del disco o la velocidad con la que esté rotando. Por lo general, sin embargo, el grueso de la emisión se concentra en longitudes de onda que el ojo humano es incapaz de percibir. ¿Qué significado tienen entonces todas las visualizaciones de agujeros negros que circulan por internet? Se suele asumir que son versiones adulteradas, que se elaboran asignando diferentes colores a distintas longitudes de onda no visibles, para adaptar a nuestra percepción un fenómeno que de otro modo escaparía a nuestros sentidos. Esta operación de traducción se asemeja a la que llevan a cabo las gafas de visión nocturna, que detectan luz infrarroja y la muestran en un visor como luz verde. En el caso de *Interstellar*, el propio argumento de la película invalidaba la aplicación de este procedimiento.

LOS ESFUERZOS DEL EQUIPO DE DOUBLE NEGATIVE FUERON PREMIADOS CON UN OSCAR Y UN BAFTA

Si la temperatura del disco de acreción de Gargantúa superase el millón de grados —como ocurre con M87, por ejemplo—, emitiría suficiente radiación de alta energía como para esterilizar los tres planetas que lo orbitan y aniquilar a la *Endurance* en cuanto asomara el morro fuera del agujero de gusano. Para evitar que Joseph Cooper y su precioso cargamento de embriones acabaran achicharrados, Thorne tuvo que enfriar el disco. ¿Cómo lo consiguió? Adelgazándolo. Debilitó el flujo de materia gaseosa en torno a Gargantúa, hasta dejarlo a la misma temperatura que la superficie de una estrella común, volviendo visible en el acto gran parte de su luz. Eso sí, en lugar de tumbarse a tomar el sol, la nueva humanidad tendrá que conformarse con tumbarse a tomar el disco de acreción.

Interstellar enriqueció y contribuyó a poner al día la cultura astronómica de millones de espectadores. El trabajo de Thorne, Nolan y Double Negative fijó en la mente del gran público la imagen moderna de los agujeros negros. Después de salir del cine, el aficionado que viera una película como la nueva versión de *Star Trek* de Jeffrey Jacob Abrams —estrenada tan solo cinco años antes— sentiría que estaba admirando una reliquia. De golpe, *Interstellar* volvió anticuadas todas las representaciones populares de agujeros negros ensayadas hasta el momento, desde la esfera negra de *Space: 1999* a los remolinos de *El abismo negro* o *Stargate SG-1*. Por no hablar de las descripciones de *Pórtico* o *La máscara del desplazamiento al rojo*, que quedaron directamente relegadas al Pleistoceno.

Interstellar fijó un nuevo estándar de lo que se podía considerar aceptable a la hora de mostrar un agujero negro en una pantalla. Hay quien opina que producciones posteriores lo hicieron incluso mejor, como es el caso de la perturbadora *High Life*, escrita y dirigida por la francesa Claire Denis. Esta película de 2018 se puede considerar como el reverso tenebroso de la obra de los hermanos Nolan. Muchos personajes de *Interstellar* parecen dominados por un arrebato mesiánico, interpretan el papel de salvadores; en *High Life* todos son condenados. En la primera, los protagonistas exhiben a menudo un comportamiento luminoso y altruista; en la segunda, resultan casi siempre oscuros y depravados. La función que desempeña en la trama

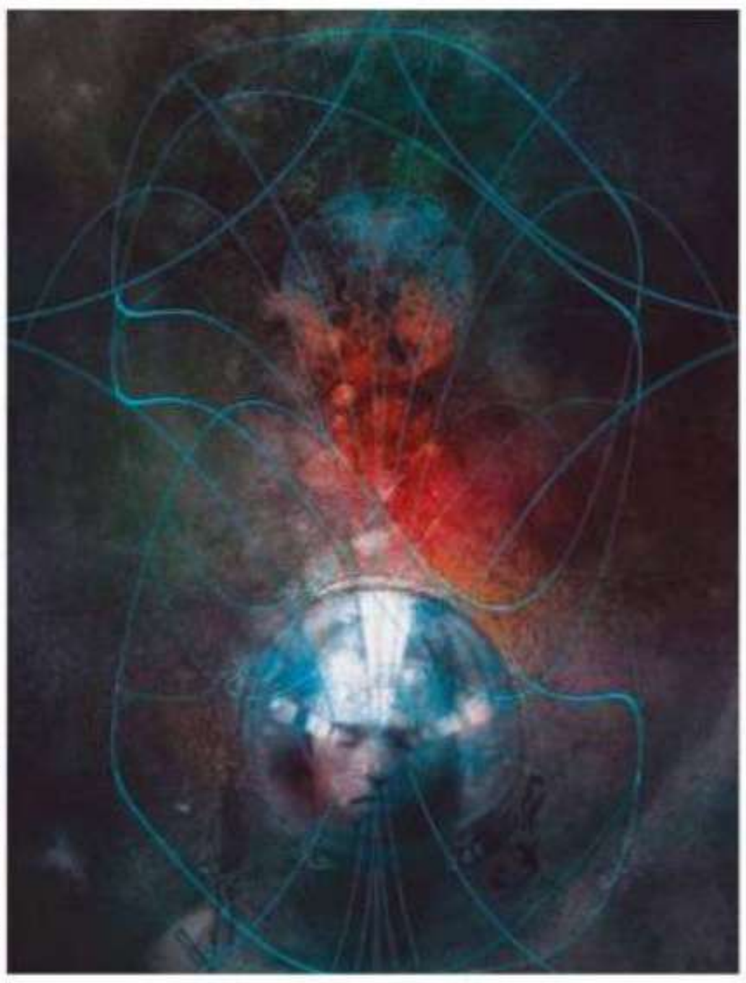


PARAMOUNT PICTURES

Imagen de la nave *Narada* saliendo de un agujero negro en la escena inicial de *Star Trek* (2019), dirigida por J.J. Abrams y protagonizada por Chris Pine, Zachary Quinto, Zoe Saldaña y Eric Bana.

LOS AGUJEROS NEGROS RELATIVISTAS INSPIRARON GRAN PARTE DEL ARGUMENTO DE *INTERSTELLAR*

el agujero negro refleja estas disparidades de temperamento. Si en *Interstellar* la caída en un agujero negro suponía en realidad una elevación metafísica, en *High Life* depara una muerte espeluznante. *Interstellar* es un típico producto estadounidense, que hace todo lo que está en su mano por entretener y agradar al espectador. *High Life* es un típico producto de arte y ensayo europeo, que hace todo lo posible por aburrirlo y desagradarlo. Es muy probable que Claire Denis considerase que, a cambio de maltratar a su audiencia, también estaba mostrando más respeto por su inteligencia. En lo que respecta a la relatividad general, contó con el asesoramiento del astrofísico francés Aurélien Barrau, que se aseguró de que el disco de acreción del agujero negro se viera distorsionado por los efectos de lente gravitacional, generando la célebre curva de ala de sombrero levantada. Además, Denis consideró, con acierto, que los agujeros negros, cuanto más extraños y desconcertantes, más descolocarían e impresionarían al espectador, y no censuró como Nolan la asimetría en el brillo del disco. Así que *High Life* pasa el test de Luminet que había suspendido *Interstellar*. De hecho, algunos fotogramas de la película de Denis parecen una versión coloreada del viejo dibujo a plumilla de Luminet. Todo queda en casa. *Vive la France!*


PANDORA FILMPRODUKTION

Cartel de *High Life*, (2018), película que marcó el debut de la directora francesa Claire Denis.

De lo que no cabe duda es de que sin *Interstellar* los borrones oscuros y los remolinos hubieran seguido dominando los rincones más inescrutables del cosmos, quién sabe si durante décadas. Pocas obras han sabido encarnar como la película ese cruce entre agujeros negros y cultura que ha servido de hilo conductor a lo largo de todo este EDC. Los agujeros negros relativistas inspiraron gran parte del argumento y sus creadores se esforzaron por tratarlos con el máximo rigor posible, sin perder tampoco de vista que se hallaban al servicio de una historia, y no a la inversa. La influencia de la ciencia en la ficción produjo una retroalimentación inesperada. El equipo de Double Negative y Kip Thorne publicaron en una revista científica un artículo en el que daban a conocer el código que habían utilizado para resolver las ecuaciones de Einstein, no para rayos de luz individuales —la técnica más extendida entre los físicos— sino para haces de rayos, ofreciendo a la comunidad de astrónomos nuevas herramientas para la visualización de los agujeros negros. De este modo, el proyecto culminó su perfecta hibridación entre ciencia y ficción. ■

BIBLIOGRAFÍA

❏ Al-Khalili, Jim: *Black Holes, Wormholes & Time Machines*. Taylor & Francis, 1999.

❏ Asimov, Isaac: *Agujeros negros*. Alianza Editorial, 1984.

❏ Bartusiak, Marcia: *Black Hole: How an Idea Abandoned by Newtonians, Hated by Einstein, and Gambled on by Hawking Became Loved*. Yale University Press, 2015.

❏ Begelman, Mitchell y Martin Rees: *Gravity's Fatal Attraction: Black Holes in the Universe*. Scientific American Library, 1996.

❏ Carroll, Sean: *Spacetime and Geometry: An Introduction to General Relativity*. Addison-Wesley, 2004.

❏ Chandrasekhar, Subrahmanyan: *The Mathematical Theory of Black Holes*. Oxford University Press, 1998.

❏ Eisenstaedt, Jean: *The Curious History of Relativity: How Einstein's Theory of Gravity Was Lost and Found Again*. Princeton University Press, 2006.

❏ Fernández Barbón, José Luis: *Los agujeros negros*. CSIC, 2014.

❏ Frolov, Valeri P. e Igor D. Novikov: *Black Hole Physics: Basic Concepts and New Developments*. Kluwer Academic Publishers, 1998.

❏ Galfard, Christophe: *El universo en tu mano*. Blackie Books, 2023.

❏ Greene, Brian: *El tejido del cosmos. Espacio, tiempo y textura de la realidad*. Booket, 2023.

❏ Hawking, Stephen: *Historia del tiempo*. Editorial Crítica 1990.

❏ Hawking, Stephen: *Black Holes: The Reith Lectures*. Random House, 2016.

❏ Hawking, Stephen y George F. R. Ellis: *The Large Scale Structure of Space-Time*. Cambridge University Press, 1973.

❏ Kaku, Michio. : Hiperespacio. Booket, 2012.

❏ Martí Vidal, Iván: *Rosquillas de espacio y tiempo. Qué sabemos sobre los agujeros negros y cómo los observamos*. Siglo XXI, 2014 .

❏ Melia, Fulvio: Cracking the Einstein Code: *Relativity and the Birth of Black Hole Physics*. University of Chicago Press, 2009.

❏ Miller, Arthur I.: *Empire of the Stars: Obsession, Friendship, and Betrayal in the Quest for Black Holes*. Houghton Mifflin, 2005.

❏ Misner, Charles W., Kip S. Thorne y John Archibald Wheeler: *Gravitation*. W. H. Freeman, 1973.

❏ Penrose, Roger: *Ciclos del tiempo. Una extraordinaria nueva visión del universo*. Debolsillo, 2011.

❏ Raine, Derek J. y Edwin G. Thomas: *Black Holes: An Introduction*. Imperial College Press, 2010.

❏ Riazuelo, Alain: *Agujeros negros. Un misterio cósmico por fin desvelado*. Alianza Editorial, 2025.

❏ Rovelli, Carlo: *El orden del tiempo*. Editorial Anagrama, 2020.

❏ Smethurst, Rebecca. *Breve historia de los agujeros negros*. Blakie Books, 2016.

❏ Starvane, Ethan: *Agujeros negros. Donde muere la luz*. Independently Published, 2026.

❏ Thorne, Kip S.: *Agujeros negros y tiempo curvo*.Editorial Crítica, 2024.

❏ Tucker, Wallace H.: *Chandra's Cosmos: Dark Matter, Black Holes, and Other Wonders Revealed by NASA's Premier X-Ray Observatory*. Smithsonian Institution, 2017.

❏ Wald, Robert M.: *General Relativity*. University of Chicago Press, 1984.

❏ Wald, Robert M. (ed.): *Black Holes and Relativistic Stars*. University of Chicago Press, 1999.

❏ Wheeler, J. Craig: C*osmic Catastrophes: Exploding Stars, Black Holes, and Mapping the Universe*. Cambridge University Press, 2007.

❏ Will, Clifford M.: *Was Einstein Right? Putting General Relativity to the Test*. Basic Books, 1986.



ENLACE AL CANAL
x.com/byneontelegram
Ó escanea el código QR:

muy INTERESANTE

REDACCIÓN
Directora: **Cristina Enríquez** (cenriquez@zinetmedia.es)
Coordinador de Diseño: **Óscar Álvarez**
Redacción:
Carmen Castellanos (ccastellanos@zinetmedia.es)

Autora de los textos: **David Blanco Laserna**
Texto original: *Agujeros negros. Ciencia, historia y mito. De la relatividad de Einstein a la ficción de Interstellar*
© Editorial Pinolia, S. L., 2026.

Colaboradores: **Javier Alvaredo** (edición y corrección), **Manuel Arrubarrena** (maquetación).

DIRECCIÓN Y TELÉFONO
C/ Alcalá 79 1º A - 28009 Madrid; tel.: 810 58 34 12
Suscripciones: suscripciones@zinetmedia.es

zinet MEDIA GLOBAL

Consejera Delegada: **Marta Ariño**
Director General Financiero: **Carlos Franco**
Director Comercial: **Alfonso Juliá** (ajulia@zinetmedia.es)
Brand Manager: **Marta Espresate** (mespresate@zinetmedia.es)

Editada por **Zinet Media Global, S.L.**
Distribuidor exclusivo en España: Logista Publicaciones Distribuidor exclusivo en México: Sefeco México, S.A. de C.V., con domicilio en calle Corona No. 23, Colonia Cervecera Modelo, Municipio Naucalpan de Juárez, Estado de México. CP. 53330. Tel. (55) 7586 5532.
Número de Certificado de Reserva de derechos al uso exclusivo del Título MUY INTERESANTE: 04-2025-011715474400-102 de fecha 17 de enero de 2025 ante el Instituto Nacional del Derecho de Autor.

IMPRESO EN ESPAÑA. EDICIÓN: 11/2026
Esta publicación es miembro de la Asociación de Revistas de Información (ARI).
Depósito Legal: M-4343-2020. ISSN 1130 - 4081 © Copyright 2017 Zinet Media Global, S.L. Prohibida su reproducción total o parcial sin autorización expresa de la empresa editora.

«EL ESPACIOTIEMPO LE DICE A LA MATERIA CÓMO MOVERSE; LA MATERIA LE DICE AL ESPACIOTIEMPO CÓMO CURVARSE »

John Archibald Wheeler (1911-2008)

Físico teórico estadounidense



MUY INTERESANTE