

# LA LUZ EN LA OSCURIDAD

Los agujeros negros,  
el universo y nosotros

HEINO  
FALCKE

JÖRG RÖMER



Lectulandia

El 10 de abril de 2019 un equipo internacional de astrónomos liderados por el profesor Heino Falcke maravilló al mundo publicando la primera imagen de un agujero negro. Por fin la comunidad científica conseguía la prueba irrefutable de lo que Einstein había predicho en su teoría de la relatividad acerca de estos fenómenos hacía más de cien años. Sin embargo, las implicaciones de este hallazgo van más allá: si bien son objetos relativamente simples de definir, los agujeros negros plantean algunos de los interrogantes más complejos sobre la naturaleza del espacio, del tiempo, y, por último, de nuestra existencia. En este libro, Falcke no solo nos narra la emocionante historia de esta proeza científica, sino que da un paso más intentando responder a las grandes preguntas filosóficas que este hito plantea: ¿existe algo más allá de la nada?, ¿puede la ciencia explicar lo inexplicable?, ¿cuál es el origen de nuestra existencia y qué sentido tiene nuestro paso por el mundo?

Para Heino Falcke, la astrofísica y la metafísica, la razón y la fe, no tienen por qué excluirse mutuamente. La luz en la oscuridad es un poderoso alegato a favor de la ciencia que nos habla de lo que sabemos pero también de los misterios que quedan por resolver.

Heino Falcke & Jörg Römer

# **La luz en la oscuridad**

**Los agujeros negros, el universo y nosotros**

ePub r1.0

Un\_Tal\_Lucas 05-09-2021

Título original: *Licht im Dunkeln: Schwarse Löcher, das Universum und Wir*  
Heino Falcke & Jörg Römer, 2021  
Traducción: Jorge Seca

Editor digital: Un\_Tal\_Lucas  
ePub base r2.1



# PRÓLOGO

## Y, sin embargo, los vemos

De repente se oscurece la gran sala de prensa de la Comisión Europea en Bruselas. Ya está aquí el momento largamente esperado por el que todos hemos trabajado muchos años hasta la extenuación. Es el martes 10 de abril de 2019 y son las 15 horas 6 minutos y 20 segundos. Cuarenta segundos más y la opinión pública mundial admirará por primera vez la imagen de un gigantesco agujero negro. Se encuentra a cincuenta y cinco millones de años luz de la Tierra, en el centro de la galaxia elíptica Messier 87, o M87 para abreviar. Durante mucho tiempo, las profundidades más oscuras de los agujeros negros parecían estar irremediabilmente ocultas a nuestros ojos, pero hoy saldrán por primera vez a la luz.

La rueda de prensa ha comenzado, pero aún no captamos en absoluto todo lo que va a desencadenar. Un viaje de exploración hasta los límites de nuestro conocimiento emprendido por la humanidad hace milenios, unas teorías revolucionarias sobre el espacio y el tiempo, unas tecnologías modernísimas, el trabajo de las nuevas generaciones de radioastrónomos y toda mi vida como investigador se concentrarán hoy en la imagen de ese agujero negro. Astrónomos, científicos, periodistas y políticos observan fascinados lo que vamos a mostrar aquí y en otras capitales del mundo. Solo una vez finalizado el acto descubro que millones de seres humanos en todo el planeta han estado a la espera frente a sus pantallas y que en tan solo unas pocas horas han visto nuestra imagen aproximadamente cuatro mil millones de personas.

En la primera fila de la sala están sentados colegas de gran mérito y jóvenes científicos, entre ellos muchos de mis estudiantes. Durante años he trabajado con ellos intensamente, viendo cómo cada uno superaba sus propios límites y a mí con creces; algunos viajaron a los lugares más remotos del

mundo solo para alcanzar este objetivo, a veces incluso poniendo en peligro su vida. Y en el día de hoy tenemos el resultado, el éxito de su trabajo ocupa el centro de la atención pública mundial mientras permanecen sentados en la oscuridad. Quiero darles las gracias a todos ellos, sin excepción, porque todos y cada uno de ellos han hecho posible este logro.

Sin embargo, el reloj prosigue con su tictac. Me encuentro en un túnel, todo lo que me rodea me sobrepasa como el viento en contra a un piloto de carreras. No me apercibo del teléfono móvil de la tercera fila con la lente enfocada hacia mí. El clip aparece más tarde como *trending topic* en una de las páginas web más populares para niños y niñas, entre chistes vulgares sobre el trasero del presidente estadounidense y el porro de un conocido rapero. La tensión vigilante de los periodistas se extiende hacia mí: cada mirada es expectación. Se me aceleran las pulsaciones. Todos me observan.

Carlos Moedas, el comisario de la Unión Europea para Ciencia e Innovación, ha hablado antes que yo. «No se alargue demasiado», le habíamos sugerido. Las palabras de Moedas avivan la curiosidad del público, pero resulta que ha terminado demasiado pronto. Tengo que improvisar y rellenar ese hueco de tiempo tratando de disimular mi nerviosismo.

Anuncian que esta primerísima imagen se emitirá de forma simultánea en todo el mundo. Exactamente a las 15 horas 7 minutos, hora centroeuropea, la imagen aparecerá en la gigantesca pantalla de esta sala. Al mismo tiempo, mis colegas de Washington, Tokio, Santiago de Chile, Shanghái y Taipéi están preparados para presentar la misma captura de un agujero negro, comentarla y responder a las preguntas de los periodistas. Servidores informáticos de todos los continentes están programados para enviar comunicados de prensa a publicaciones especializadas de todo el mundo. El tiempo corre imparable. Lo habíamos coordinado y planeado todo con precisión, la más mínima anomalía pondría todo patas arriba, como ya nos había ocurrido en nuestras simulaciones. Y ahora, justo en el momento de comenzar, tropiezo.

Empiezo con unas palabras preliminares mientras detrás de mí una película se va acercando cada vez a una mayor velocidad al corazón de una gigantesca galaxia. Debido a la agitación cometo un tonto *lapsus linguae*. He confundido «años luz» con «kilómetros». No es ninguna nimiedad para un astrónomo, pero tampoco hay tiempo para un «tierra trágame», hay que seguir adelante.

La pantalla de información cambia de pronto: son exactamente las 15.07. De las profundidades y de la infinita oscuridad del cosmos, desde el centro de la galaxia Messier 87, emerge un anillo de color rojo candente. Sus contornos

se perfilan borrosamente, permanecen algo difusos en la pantalla, el anillo destella, cautiva a todos los espectadores y permite entrever que esta imagen, que se tenía por imposible de captar, halló por fin su camino hasta la Tierra por medio de las ondas de radio desde una distancia de quinientos trillones de kilómetros.

Los agujeros negros supermasivos son los cementerios del espacio sideral. Se originan a partir de estrellas que se extinguen lentamente, se consumen y se apagan. Sin embargo, el espacio los alimenta también con gigantescas nebulosas, con planetas y con estrellas. Su masa es tal que curvan el espacio vacío de una manera extrema e incluso parece que puedan detener el transcurso del tiempo. Los agujeros negros atrapan todo objeto que se les acerca demasiado, ni siquiera la luz puede escapar de ellos.

Ahora bien, ¿cómo es posible que podamos ver agujeros negros, cuando ningún rayo de luz puede llegar hasta nosotros desde allí? ¿Cómo sabemos que ese agujero negro ha condensado seis mil quinientos millones de masas solares y que por ello se ha vuelto supermasivo? Al fin y al cabo, el anillo candente envuelve la máxima negrura de su interior, de la que ningún rayo de luz ni ninguna palabra pueden escapar.

«Es la primera imagen de un agujero negro», digo cuando finalmente aparece en la pantalla en toda su plenitud<sup>[1]</sup>. La sala estalla en aplausos espontáneos. De mí se desprende todo el esfuerzo de los últimos años. Me siento libre, por fin se ha desvelado el secreto. Una fabulosa figura cósmica ha adoptado ahora una forma y un color visibles para cualquiera<sup>[2]</sup>.

Al día siguiente, los periódicos difunden la noticia de que hemos escrito una página en la historia de la ciencia y que obsequiamos a la humanidad con un instante común de alegría y de asombro; y sí, esos agujeros negros supermasivos existen de verdad! No son fantasmagorías creadas por autores de ciencia ficción chiflados.

Esa imagen pudo conseguirse únicamente porque unos pocos seres humanos en todo el mundo persiguieron un objetivo común durante muchos años, más allá de todas las dificultades y de las diferencias. Todos querían desvelar el misterio de los agujeros negros, uno de los mayores secretos de la física. Esta imagen nos ha conducido al límite de nuestro conocimiento. Por muy loco que suene, en el borde de los agujeros negros termina nuestra posibilidad de medir y de investigar actual, y se abre la gran cuestión de si algún día podremos sobrepasar ese límite.

Antes que nosotros, generaciones de científicos habían iniciado este nuevo capítulo de la física y de la astronomía. Hace veinte años, el deseo de

captar la imagen de un agujero negro seguía siendo considerado un sueño extravagante. En su día, por aquel entonces un joven investigador, me embarqué en esta aventura a la caza de agujeros negros, que aún hoy me tiene cautivado.

No presentí ni de lejos lo excitante que sería, ni cómo determinaría y cambiaría mi vida. Se convirtió en una expedición a los confines del espacio y del tiempo, un viaje al corazón de millones de seres humanos, si bien yo fui el último en comprenderlo. Habíamos logrado esa imagen con ayuda del mundo, ahora la compartíamos con él, y el mundo la abrazaba con una fuerza mayor de la que yo había creído posible en su momento.

Todo comenzó para mí hace casi cincuenta años. Cuando de pequeño alcé la vista por primera vez al cielo nocturno, soñé con él como solo un niño puede soñar con el cielo. La astronomía es una de las ciencias más antiguas y fascinantes, y en la actualidad sigue proporcionándonos nuevos conocimientos espectaculares. Desde el comienzo de los tiempos hasta nuestros días, los investigadores han transformado los fundamentos de nuestra visión del mundo una y otra vez, impulsados por la curiosidad y por la necesidad. Exploramos el universo con nuestra mente, con las matemáticas y la física, y con telescopios cada vez más potentes. Provistos de la tecnología más moderna emprendemos expediciones a todos los extremos del mundo e incluso al espacio, para explorar lo desconocido. En el inescrutable espacio sideral, en el infinito universo y en el divino cosmos, el conocimiento, los mitos y las leyendas, las creencias y las supersticiones han estado siempre tan entrelazadas que hoy en día ningún ser humano mira el cielo nocturno sin preguntarse qué más nos aguarda en esa vastedad oscura.

## ACERCA DE ESTE LIBRO

Este libro es una invitación a acompañarme en un viaje personal a través de este nuestro universo. En la primera parte partimos de la Tierra, volamos hacia la Luna y el Sol, pasamos los planetas a un ritmo rápido y aprendemos de la historia de la astronomía. A su vez, analizamos por qué la comprensión del sistema solar ha marcado hasta la actualidad nuestra visión del mundo. La



segunda parte del libro es un viaje a través del conocimiento de la astronomía moderna. El espacio y el tiempo se vuelven relativos. Descubrimos cómo nacen las estrellas, cómo mueren y cómo a veces se convierten en agujeros negros. Finalmente abandonamos nuestra Vía Láctea, hasta que vemos un universo de un tamaño inconcebible repleto de galaxias que narran los comienzos del espacio y del tiempo, del Big Bang, la Gran Explosión. Los agujeros negros representan el final del tiempo.

La primera imagen de un agujero negro fue una hazaña de la ciencia para la que trabajaron juntos centenares de investigadores durante años. La idea para llegar a esa imagen —una idea que empezó siendo del tamaño de un grano de mostaza y creció hasta convertirse en un gran experimento—, los esfuerzos que asumimos, las emocionantes expediciones a los radiotelescopios de todo el mundo y la excitante espera hasta que finalmente la imagen llegó a la opinión pública, todas las vivencias de esa aventura las describo en la tercera parte.

En la cuarta parte osaremos plantearnos algunas de las últimas grandes preguntas de la ciencia. ¿Los agujeros negros son el final? ¿Qué sucedía antes del comienzo del espacio y del tiempo y qué sucederá tras ellos? ¿En qué nos afecta este conocimiento a nosotros, pequeños seres humanos, aquí, en esta insignificante pero maravillosa Tierra? ¿Este triunfo de las ciencias naturales significa que pronto podremos saber, medir y predecirlo todo? ¿Sigue quedando espacio para las incertidumbres, para las esperanzas, para las dudas y para un dios?

## **PRIMERA PARTE**

### **Viaje a través del espacio y del tiempo**

Una sinopsis sobre nuestro sistema solar y los comienzos de la astronomía

# 1

## El ser humano, la Tierra y la Luna

### LA CUENTA ATRÁS

Emprendamos juntos un emocionante viaje a través del espacio y del tiempo. Comenzamos en la Tierra. Un cohete espacial que inspira temor sobresale entre el paisaje verde. Sin sospechar nada, las aves revolotean alrededor de esa joya de la técnica. La tímida calma antes de la tempestad; sobre el terreno de los lanzamientos espaciales reina todavía la penumbra del incipiente amanecer. La naturaleza no presiente en absoluto el tremendo infierno que va a acontecer aquí dentro de unos pocos segundos.

Excitados pero todavía con caras de sueño se reúnen el personal y los espectadores sobre una plataforma de observación. Desde ahí arriba, todo objeto, todo ser humano y el evento en sí tienen el aspecto gracioso de una casa de muñecas. Un espectador saca su teléfono móvil y retransmite el acto a través de una página web que está repleta de caracteres chinos y de logotipos parpadeantes. Es justo esa transmisión la que yo estoy siguiendo esperanzado y agradecido por internet mientras estoy en otro lugar de la Tierra, acomodado en un acogedor *bed & breakfast* en medio de la naturaleza verde de Irlanda. Hechizado, observo el desarrollo de los acontecimientos.

De repente se oye una voz en *off* entrecortada, una voz chillona, incomprensible, con un tono metálico que llega hasta la médula. Recita una cuenta atrás con monotonía y casi como de memoria, y a pesar de que no entiendo el idioma, también me pongo a contar. Con un estruendo atronador, un resplandor amarillo y rojizo a los pies del cohete espacial ilumina la oscuridad; el encendido de los motores a reacción provoca un ruido ensordecedor incluso en la apacible Irlanda, aunque el sonido procede solo de mi ordenador portátil. El suelo tiembla, caen las sujeciones del cohete, que

queda libre y se eleva majestuosamente, luego va dejando tras de sí una estela de calor y, como un cometa invertido, desaparece de la vista y sale disparado en dirección al cosmos.

Me sentí transportado de nuevo al lanzamiento del transbordador espacial Discovery, que pude observar desde Cabo Cañaveral, en compañía de mi soñolienta pero excitada familia en la madrugada del 11 de febrero de 1997. Todavía recuerdo la mirada de orgullo de mi hija de cuatro años al observar de lejos el día anterior aquel cohete espacial tan alto como una torre. En el brillo de sus ojos descubrí el mío propio.

Veintiún años más tarde, el 20 de mayo de 2018, solo veo una transmisión en directo desde China, pixelada y entrecortada. No obstante, sé exactamente cómo se siente uno en ese momento. Y se trata de un lanzamiento muy especial, pues a bordo de la nave hay un pedazo de mí: un experimento de mi equipo de Nimega. De nuevo me siento como un niño. Ese cohete espacial tiene un objetivo especial: la cara oculta de la Luna.

En mis pensamientos vuelo también en ese cohete, hacia la Luna y mucho más allá, igual que lo había hecho tantísimas veces. Vuelo allí donde mis anhelos me han llevado siempre, hacia el cosmos.

## EN EL ESPACIO

Una paz celestial. A todo aquel que accede al cosmos lo primero que le llama la atención es el silencio infinito. Los motores a reacción se apagan, fuera muere todo sonido. El telescopio espacial Hubble flota a quinientos cincuenta kilómetros por encima de la superficie terrestre —a una altura casi setenta veces mayor que la del monte Everest—, y se desliza a través de una capa de la atmósfera que es unos cinco millones de veces más fina que en la superficie de la Tierra<sup>[3]</sup>. El oído humano ya no puede percibir las ondas sonoras, pues son oscilaciones de un aire que aquí no existe: ningún rumor, ninguna palabra, ni siquiera la explosión más potente en la Tierra podría oírse en el cosmos.

Como astrónomo, empleo telescopios espaciales que orbitan alrededor de la Tierra, escucho con atención las historias de los astronautas que han estado allí, y analizo las imágenes que se captaron. En mi mente floto también con ligereza e ingravidez en el espacio, y eso que en realidad me desplazo a toda

velocidad alrededor de la Tierra: a unos vertiginosos veintisiete mil kilómetros por hora. Las intensas fuerzas centrífugas podrían arrojarme fuera de la órbita, pero la poderosa fuerza de atracción terrestre las equilibra por completo, y me mantiene en el rumbo adecuado. Este es el secreto de cada movimiento orbital alrededor de un cuerpo celeste. La ingravidez no significa librarse de la gravedad. En órbita, esta sigue dominándonos, pero nosotros nos sentimos ingravidos porque la fuerza centrífuga y la fuerza de atracción están equilibradas con precisión. En realidad nos hallamos en caída libre, pero esquivamos la Tierra una y otra vez porque damos vueltas en torno a ella, en grandes órbitas que parecen trazadas por un gigantesco compás. Si fuésemos frenando, las órbitas se volverían cada vez más pequeñas y más vertiginosas hasta que esa caída libre terminase en algún momento en un cráter de impacto sobre la Tierra. ¡Pero eso es algo que no quiere nadie!

La fricción del aire restante sobre la nave espacial es tan escasa que podríamos orbitar en torno a la Tierra durante décadas casi sin freno, sin tan siquiera encender el motor de nuestro cohete espacial<sup>[4]</sup>. Y sin embargo, en algún momento esa resistencia extremadamente baja de la atmósfera residual acabaría frenando nuestra cápsula espacial.

Mientras damos vueltas en el espacio sideral, podemos disfrutar desde allá arriba de la visión única de la Tierra. Similares a dioses, contemplamos esa canica azul en la negrura aterciopelada del universo. Los continentes, las nubes y los mares crean un rico e intenso juego cromático. Por la noche, los rayos y las ciudades resplandecientes, así como los destellos de las auroras polares, iluminan el escenario del mundo y ofrecen un panorama espectacular. Las fronteras desaparecen y con una mirada universal reconocemos la Tierra como el hogar común de todos los seres humanos. El borde que nos separa del frío del espacio sideral es claro y nítido. Solo ahora y solo desde aquí arriba comprendemos bien lo fina que es la capa de aire que nos protege de un cosmos hostil y que hace posible la vida. Incluso los fenómenos meteorológicos tienen lugar en la estrecha franja que hay sobre la Tierra. Qué frágil y quebradizo nos parece de pronto este soberbio planeta. Estas fascinantes vistas y visiones se las debemos a la tecnología moderna. Sin embargo, con su empleo desconsiderado en la Tierra estamos destruyendo también nuestros medios de subsistencia y este planeta azul y único.

Siempre que veo esas maravillosas imágenes de la Tierra, percibo también la soledad y el vacío, el sufrimiento y la miseria que imperan en ella. «Dios extiende el norte sobre el vacío, y cuelga la Tierra sobre la nada», exclamó hace milenios Job, sometido a duras pruebas<sup>[5]</sup>. En mitad de la nada, en el

cielo extendido como una lona negra, ¡está nuestro globo terráqueo! Al autor de la Biblia no se le concedió la posibilidad de esa mirada desde arriba, y no obstante, en sus visiones percibió la Tierra ya como un todo. Las antiguas visiones de la humanidad se completan hoy con imágenes nuevas que nos suministra la técnica actual. Un enjambre de satélites, cuyas cámaras apuntan de manera permanente a nuestro planeta, graba las nubes, los continentes y los mares ofreciéndonos unas vistas detalladas que cortan la respiración.

Job, que ve la Tierra suspendida en la nada, se lamenta ante Dios por algo profundamente humano, el sufrimiento absurdo. También en nuestros días coexisten en este planeta el sufrimiento y la belleza. Desde el espacio no es posible divisar a un ser humano en concreto. El sufrimiento solo se capta desde cerca; desde el espacio, todo en la Tierra parece sublime y único. Incluso los huracanes, las inundaciones y los incendios de los bosques provocan desde arriba una fascinación mórbida. En el espacio se está muy lejos del sufrimiento individual, que allá abajo se multiplica miles de veces, e incomprensibles son nuestros problemas terrestres. ¿No suele pasar desapercibida a los mismos seres humanos esa «mirada técnica»?

Es más que sorprendente cómo esta investigación, sobria y técnica, transforma de manera duradera incluso a los astronautas más avezados. Después de Yuri Gagarin en 1957, han estado en el cosmos unos quinientos cincuenta seres humanos y casi todos informan de cómo les impresionó en lo más profundo la sublime fragilidad de la Tierra y les cambió intensamente en lo personal. Poder abarcar todo el globo terráqueo con la mirada parece ser similar al estado de embriaguez. *Overview Effect*, denominó a este fenómeno el periodista estadounidense Frank White, que lo investigó y describió psicológicamente y en detalle. ¿Qué desencadena en nosotros la visión del globo terráqueo? ¿Cómo nos transforma? ¿Cómo podemos obtener provecho de ese efecto? Los médicos están investigando el *Overview Effect* desde que fue descrito por primera vez. La Tierra es única; hasta donde sabemos, en el espacio sideral no hay nada comparable. Esto es lo que sienten también los astronautas. Flotar por encima del planeta como ángeles y verlo todo desde arriba no nos deja fríos. Así pues, dejémonos inspirar por estas nuevas imágenes procedentes del espacio y que este no nos haga pasar por alto a los seres humanos.

Sin embargo, una vez que hemos alcanzado la órbita, también cambia nuestra perspectiva sobre el espacio y el tiempo. No solo obtenemos otra visión de nuestro hogar, la Tierra, sino también de cómo percibimos los días, los meses y los años. «Porque mil años ante tus ojos son como el día de ayer, que ya pasó», como se dice en un famoso y antiguo versículo de los Salmos<sup>[6]</sup>. El tiempo es relativo. Los seres humanos ya lo sospechaban desde tiempos inmemoriales, pero en ningún otro lugar lo experimentamos de una manera más drástica que en el cosmos.

Cuando escribí mis primeros programas de monitoreo para el telescopio espacial Hubble, tuve que dividir las secuencias de comandos en bloques de noventa y cinco minutos porque eso es lo que tarda el telescopio en dar una vuelta alrededor de la Tierra. Cada noventa y cinco minutos salía y se ponía el sol. Un día dura noventa y cinco minutos en el espacio. También los astronautas de la Estación Espacial Internacional experimentan amaneceres cada hora y media, y yo los vivía desde mi escritorio, mientras preparaba mis observaciones y en mi mente flotaba por el universo.

Ahora bien, la relatividad del tiempo significa mucho más que disponer de una nueva medida para la duración de un día. En el cosmos, aunque casi nadie lo considere posible, los relojes funcionan de una manera diferente que en la Tierra. En una órbita a veinte mil kilómetros por encima del planeta, el día avanza treinta y nueve microsegundos más rápido. Por tanto, en setenta años nuestros relojes terrestres van un segundo más lentos que nuestros relojes del espacio. Eso suena a poco, pero hoy en día podemos medir sin problemas esa diferencia mínima. Es precisamente esta diferencia inapreciable la que revela ya el pensamiento central de la teoría general de la relatividad de Albert Einstein: el tiempo es realmente relativo. Esta teoría describe no solo nuestro sistema solar, sino también los agujeros negros y el entramado del espacio-tiempo en el cosmos entero.

El camino hasta alcanzar esta comprensión ha sido excepcionalmente largo. Comienza, a grandes rasgos, con descubrimientos tan fundamentales como la estructura y las regularidades de nuestro propio sistema solar y se extiende hasta el entendimiento de todo nuestro cosmos. A pequeña escala, este camino de conocimiento empieza con la comprensión de la paradójica conducta cambiante de la luz como onda y también como partícula, y está vinculado, como es natural, a la famosa teoría de la relatividad de Einstein.

La clave de todo está en la comprensión precisa de las extrañas propiedades de la luz. Lo más asombroso es que gracias a ella no solo podemos ver la Tierra, la Luna y las estrellas, sino que está íntimamente ligada al tiempo, la gravedad y el espacio.

Hagamos una breve retrospectiva sobre la historia de la física moderna. Para Isaac Newton, el padre primigenio de la teoría de la gravedad, la luz estaba compuesta por pequeños corpúsculos. En el siglo XIX, el físico escocés James Clerk Maxwell, basándose en los geniales trabajos pioneros de Michael Faraday, desarrolló la teoría de que la luz y todas las formas de radiación son ondas electromagnéticas. Por tanto, la onda de radio de la red de área local inalámbrica (WLAN), los teléfonos móviles o las radios de los automóviles, la radiación térmica de los dispositivos de visión nocturna, los rayos X con los que hacemos visibles los huesos, o la misma luz visible que perciben nuestros ojos, son oscilaciones de campos eléctricos y magnéticos. Solo se diferencian unos de otros por la frecuencia en la que oscilan y por la forma en que se generan y se miden, pero en el fondo representan todas —luz de radiofrecuencia, luz infrarroja, rayos X y luz visible— el mismo fenómeno: la luz.

En el rango de las frecuencias de los teléfonos móviles, las ondas oscilan mil millones de veces por segundo y su longitud de onda se extiende más de veinte centímetros. En la luz visible, las ondas oscilan miles de trillones de veces por segundo y son cien veces más pequeñas que el diámetro de un cabello. Dado que las ondas luminosas de una frecuencia y un color determinados siempre oscilan al mismo ritmo, la luz es también el secuenciador perfecto para un reloj y la medida exacta para todo cuando se trata de medir el tiempo. Los relojes ópticos más precisos están ajustados en la actualidad a una fracción de  $10^{-19}$ <sup>[7]</sup>. ¡Dos de estos relojes discreparían solo medio segundo en toda la vida del universo hasta el momento, que es de unos catorce mil millones de años! Una precisión que las generaciones pasadas ni siquiera se atrevieron a soñar.

Pero ¿qué es lo que oscila en realidad? Durante mucho tiempo se pensó que todo el espacio sideral estaba lleno de lo que se denominaba «éter». No, no se trata de ningún disolvente, sino de un medio hipotético en el que las ondas electromagnéticas, es decir, las ondas de luz y de radio, se mueven y se propagan como las ondas sonoras en el aire.

Una de las propiedades de las ecuaciones de Maxwell que más sorprende, y aún hoy deja perplejos a todos los físicos, es la circunstancia de que la luz de cada color se mueva siempre a una velocidad constante en el espacio



vacío, con independencia de la velocidad de uno mismo. Los rayos X son igual de rápidos que la luz de radiofrecuencia o que un rayo láser, y la velocidad de la luz no depende, en las ecuaciones de Maxwell, de la velocidad del receptor o del emisor. El hecho de que la luz no sea infinitamente rápida no se supo hasta las mediciones de los movimientos de las lunas de Júpiter realizadas por Ole Rømer y Christiaan Huygens a finales del siglo XVII<sup>[8]</sup>. Sin embargo, ¿no tiene que cambiar la velocidad de la luz cuando te desplazas más rápido por el misterioso éter o cuando te quedas quieto en relación con él?

Si estoy en el mar con una tabla de surf, un viento tormentoso sopla de mar a tierra y me impulso con la tabla contra el oleaje, entonces las olas me alcanzan a una velocidad mayor, pero esta es exactamente la misma velocidad a la que chocan contra la costa. Ahora bien, si cambio mi dirección y surfeo con rapidez a favor del viento y las olas, seré igual de rápido que la ola bajo mi tabla de surf. En relación con mi tabla, la velocidad de las olas es baja; sin embargo, en relación con la orilla, la velocidad a la que surfeo es muy alta.

Exactamente esto mismo es válido para las ondas sonoras. Si voy en mi bicicleta con el viento soplando a mi favor, el sonido de la bocina de un coche que circule detrás de mí me alcanzará un poco más rápido que sin viento, y el aviso me llegará un poco antes; si pedaleo con el viento en contra, la bocina de atrás me llegará algo más tarde. El sonido tiene que avanzar contra el viento. Si pudiera pedalear a una velocidad supersónica en relación con el viento, el sonido de la bocina no me alcanzaría en absoluto. Si cada vez circulo más rápido y adelanto a mi propio ruido, rompo entonces la barrera del sonido y genero un estallido, porque muchos de mis tonos alcanzan al oyente al mismo tiempo. Contrariamente a los pilotos de los aviones a reacción, ningún ciclista ha logrado hasta la fecha provocar una explosión sónica.

Las ondas de radio tendrían que comportarse exactamente de la misma manera, esto es lo que se pensaba hace más de cien años. Se creía que el éter llenaba el vacío del espacio sideral —como el aire en nuestra atmósfera— y que la Tierra, en consonancia con mi bicicleta o mi tabla de surf, va arando el éter en su órbita alrededor del Sol a cien mil kilómetros por hora. Si medimos la velocidad de la luz en la dirección del movimiento de la Tierra en torno al Sol, esta «velocidad de la luz» tendría que adoptar en realidad una magnitud completamente diferente que si la medimos en ángulo recto o en el sentido contrario de la primera dirección, dependiendo de si la Tierra surfea a través del éter con el viento a favor o en contra.

Fue justo este efecto el que los físicos estadounidenses Albert A. Michelson<sup>[9]</sup> y Edward W. Morley quisieron demostrar a finales del siglo XIX. Para ello midieron la velocidad relativa de la luz en dos tubos que formaban un ángulo recto entre sí. El experimento fracasó estrepitosamente. No pudo demostrarse ninguna diferencia significativa en la velocidad de la luz. Por consiguiente, no había ningún indicio claro de que el éter existiera, se trataba de pura ilusión.

Los fracasos pueden ser revolucionarios. Y este en concreto se convirtió en uno de los experimentos clave, modélico, para la historia de la física y de la astronomía. Como el naufragio totalmente inesperado de la teoría del éter desestabilizó la flota entera de otras teorías, posibilitó arrojar por la borda antiguos esquemas de pensamiento e ir a la búsqueda de ideas del todo nuevas<sup>[10]</sup>. Las que mejor encajaban en este sentido eran las modernas ideas del joven Albert Einstein, quien estaba más radicalmente dispuesto a reorientar, repensar y colocar la física sobre unos nuevos cimientos teóricos. Mientras otros físicos seguían dándose de cabeza contra la pared, Einstein se apresuró a entrar en una nueva era en la que ya no existía ningún espacio ni ningún tiempo absolutos. Nacía una teoría audaz, la teoría de la relatividad, y con ella, por decirlo de alguna manera, Einstein desechó una visión del mundo secular en el ámbito de la física.

#### UN CHIQUILLO SUEÑA CON LA LUNA

Después de un número suficiente de órbitas alrededor de la Tierra podemos activar por fin el siguiente nivel de nuestra cápsula espacial y poner rumbo a la Luna. *Viaje a la Luna* fue un viejo sueño de la humanidad. El 21 de julio de 1969, Neil Armstrong pisó la superficie lunar con el paso tal vez más famoso de un ser humano, y el sueño se hizo realidad. Pude percibir la importancia de ese instante algunos años después.

Un día tórrido de verano de 1971, en la idílica localidad de Strombach, en el Condado del Monte, al este de Colonia. Plácidos y verdes montes y bosques adornan el horizonte, un grupo de niños y niñas juega alegremente en la calle en una pequeña urbanización de casas unifamiliares. Palas y cubitos, un triciclo con una barra para que lo lleven y algunas pelotas es todo lo que

necesitan para ser felices. Los adultos están sentados en el jardín delantero de la casa y contemplan la escena relajados.

Tan solo hay un chiquillo, algo regordete, que no juega en el grupo. A solas en una habitación a oscuras, está hechizado y con la vista clavada en las imágenes parpadeantes y borrosas en blanco y negro de un televisor grande de tubo. Falcon, el módulo lunar del Apolo 15, acaba de posarse en la Luna y transmite sus imágenes a la Tierra. La gran emoción por los alunizajes se había disipado rápidamente en la familia Falcke después de los primeros vuelos espaciales, espectaculares y muy exitosos.

Solo, ese chiquillo no puede apartar la vista de la pantalla. Con apenas cinco años de edad no posee todavía ninguna idea acerca del tamaño del cosmos o de la distancia que habían recorrido los astronautas de la NASA hasta llegar a la Luna. Ni siquiera puede entrever la enorme energía que se requirió para esa obra maestra de la técnica, ni la importancia de ese logro científico. Y, sin embargo, percibe en lo más hondo de su ser lo fascinante y al mismo tiempo atroz que debió de ser esa osada empresa. El chiquillo absorbe cada segundo de esa aventura, cada uno de esos segundos da alas a su imaginación. ¿Qué no será posible en adelante si ahora un ser humano puede deambular, saltar e incluso recorrer en un vehículo espacial la superficie de la Luna como han hecho los astronautas del Apolo 15? ¿Qué más no sería capaz de descubrir el ser humano en ese cielo infinitamente grande?

Ese chiquillo era yo, por supuesto. Estábamos pasando unos días en casa de mi tía abuela Gerda. Los astronautas junto al comandante David Scott me parecían por aquel entonces los superhéroes de un cómic. Él y los miembros de la tripulación, James Irwin y Alfred Worden, alunizaron con el Falcon muy cerca de los montes Apeninos, una de las más imponentes cordilleras lunares. Cuando David Scott puso un pie sobre la superficie lunar, dijo algo profundamente humano: «Esta es una verdad fundamental de la naturaleza humana: ¡el ser humano tiene que explorar!». «¡Sí! —pensé—, yo soy ese».

Quise ser astronauta igual que muchos niños y niñas. Más tarde la intuición me dijo que en realidad no estaba hecho para ese oficio. Ciertamente soy bastante versátil, deportista, sé trabajar en equipo, soy bueno en los trabajos teóricos y experimentales, me manejo bien con la tecnología y tolero bien el estrés, sí; pero me tiemblan las manos con mucha facilidad y cuando estoy sometido a mucha presión cometo demasiados errores. Varios años después intercambié algunas frases con los astronautas alemanes Ulrich Walter y Ernst Messerschmid durante una conferencia sobre navegación espacial. Sabían lo que eran capaces de hacer, sin ser arrogantes. «Nosotros,

los astronautas, tenemos que enfrentarnos a un estricto procedimiento de selección, todos los parámetros tienen que ser correctos», me dijo uno de ellos. En mí no eran todos correctos. No obstante, mi sueño de acercarme a nuestro satélite no se extinguió nunca.

Dependiendo de donde se halle la Luna en su órbita elíptica, una nave espacial tiene que recorrer entre 356 000 y 407 000 kilómetros para alcanzarla. Solo unos pocos coches consiguen esa marca en el kilometraje, pero para recorrer esa distancia la luz necesita exactamente 1,3 segundos. Desde un punto de vista astronómico, es algo decepcionante reconocer que incluso los mejores coches en su vida útil apenas viajan más de un segundo luz.

La velocidad de la luz es la única medida verdaderamente constante en el universo. Así pues, es del todo razonable expresar las magnitudes en el espacio sideral en unidades de luz. El año luz es en realidad una medida de longitud y no de tiempo, tal como podría suponerse por la denominación de «año». Pueden intuirse las gigantescas distancias que imperan en el espacio cuando a veces hablamos de miles de millones de años luz en el cosmos. Para los astrónomos, la Luna no es nuestro cósmico jardín delantero, ni nuestro cósmico patio trasero. A lo sumo, es el umbral que traspasamos en nuestro viaje al universo.

La distancia de un segundo luz significa también que todo lo que vemos de la Luna desde la Tierra siempre ha transcurrido hace más de un segundo. Cuando contemplamos el cosmos, estamos viendo siempre su pasado. En el caso de la Luna se trata tan solo poco más de un segundo; en el caso de las galaxias que exploramos nosotros se trata de millones y de miles de millones de años atrás.

Así pues, la luz nos alcanza siempre «tarde», con un retardo pequeño para los focos luminosos aquí en la Tierra y uno enorme para la luz procedente de las profundidades del espacio. De ahí que nunca podamos saber qué está sucediendo en este preciso instante en otro lugar cualquiera, ni en el universo y ni siquiera aquí, en la Tierra.

Por cierto, la demora de la luz hasta la Luna puede medirse y percibirse de una manera muy práctica. Un colega mío, neerlandés, celebró su boda en un radiotelescopio y envió su «sí, quiero» por onda de radio a la Luna. Esta se reflejó en la superficie lunar, y regresó al cabo de 2,6 segundos a la sala de control. Fue tan breve que la novia no consiguió escapar en ese escaso tiempo, y su matrimonio se celebró con éxito. Probablemente fue la primera boda del mundo con rebote lunar<sup>[11]</sup>.

Por razones algo menos festivas y sí puramente científico-técnicas, en la actualidad se disparan rayos láser a la Luna con regularidad. Estos se reflejan en los espejos colocados allí por las misiones Apolo (para disgusto de todos esos teóricos de la conspiración que afirman que la NASA no llegó nunca a la Luna). Los espejos funcionan todavía. A partir del retardo del eco de la luz podemos medir con extraordinaria precisión el movimiento de la Luna y nuestra distancia hasta ella, y de esta manera pueden ponerse a prueba las predicciones de la teoría general de la relatividad.

Además, comprobamos que la Luna se aleja cada año cuatro centímetros de nosotros y que la Tierra rota un poco más despacio. La fuerza de la gravedad vincula a ambas y provoca que se frenen mutuamente un poco en su respectiva rotación. Los meses y los días duran cada año una minúscula fracción de segundo más. En principio, envejecemos por ello un poco más lentamente, pero también morimos un poco antes si expresamos nuestra edad en meses y días. Hace cuatro mil quinientos millones de años un día duraba solo seis horas, un horror para un adicto al trabajo como yo<sup>[12]</sup>.

La Luna ha dejado de rotar casi por completo. Durante su viaje alrededor de la Tierra gira solo una vez en torno a su propio eje, razón por la cual siempre nos muestra la misma cara. De ahí que siempre nos sonría el mismo semblante del hombre amable de la Luna. No pudimos ver la cara oculta de nuestro satélite hasta las primeras misiones lunares. No es el lado oscuro de la Luna, como se le denomina de forma poética, pues el Sol brilla allí cada mes durante dos semanas. Sin embargo, la cara oculta de la Luna sigue siendo un mundo casi inexplorado y misterioso.

Mi sueño sobre la Luna no me ha abandonado nunca del todo y en cierto modo se ha acabado cumpliendo con el radiotelescopio LOFAR, que dirigí en los Países Bajos durante un tiempo<sup>[13]</sup>. LOFAR es el acrónimo de *Low Frequency Array* (o red interferométrica de baja frecuencia), y consiste en una red de antenas de radio que trabajan en el intervalo de las frecuencias bajas. Están interconectadas para formar una única estación de observación; un ordenador de alto rendimiento concentra los datos y genera un telescopio virtual. La idea es que nos permitan ver hasta casi el momento de la Gran Explosión y que nos ayuden a encontrar todos los agujeros negros activos en el cosmos.

LOFAR se compone en la actualidad de treinta mil antenas en diferentes lugares de Europa; se ha convertido en un telescopio continental. Sin embargo, el sitio ideal para recibir ondas de radio cósmicas sin interferencias es la cara oculta de la Luna. En la Tierra, el mayor problema para los

astrónomos es la interferencia de las emisoras de radio y la distorsión de las ondas de radio causadas por la capa superior de la atmósfera, la ionosfera. Desde la Tierra no vemos nunca la cara oculta de la Luna, y por consiguiente tampoco puede llegar ninguna interferencia. «La Luna es tal vez el mejor lugar de la Tierra para practicar la radioastronomía», digo siempre medio en broma. Sin embargo, construir antenas allí me pareció durante mucho tiempo un sueño irrealizable.

En la navegación espacial y en la ciencia se precisa de mucha paciencia. Y a veces sucede algo imprevisible. Uno de estos imprevistos lo viví en el mes de octubre de 2015, cuando el rey Guillermo Alejandro de los Países Bajos cerró un acuerdo para la navegación espacial en una visita oficial del presidente chino Xi Jinping. Los chinos se ofrecieron a llevar al espacio una antena lunar desarrollada por nosotros para el programa LOFAR. Era el primer instrumento neerlandés en una misión lunar china. En el mes de mayo de 2018 despegó un cohete espacial de la CNSA, la agencia espacial china, desde el cosmódromo de Xichang con esa antena a bordo. Era exactamente aquel cohete espacial cuyo despegue seguí desde mis vacaciones en Irlanda en una transmisión en directo por internet, justo en la época en que logramos la primera imagen de un agujero negro. Por aquel entonces, toda mi energía estaba concentrada únicamente en obtener esa imagen, fue la fase más agotadora de mi vida. Por ese motivo, y sintiéndolo mucho en el alma, me vi obligado a ceder a mis colaboradores el sueño de mi infancia.

Nuestra estación de observación LOFAR está alojada en el satélite chino de comunicaciones Queqiao. El «puente de las urracas», su traducción al español, fue ubicado a una distancia de entre cuarenta mil y ochenta mil kilómetros más allá de la Luna. Este satélite transmite principalmente señales de radio desde la cara oculta de la Luna hasta la Tierra. Pero en el otoño de 2019 desplegamos nuestra antena y desde entonces permanecemos a la escucha de señales cósmicas. En definitiva, estamos buscando un ruido de radio extremadamente débil que, según las teorías actuales, debió de haberse originado en la etapa oscura del universo hace muchos miles de millones de años, antes incluso del nacimiento de las primeras estrellas. Contiene un eco de radio de la Gran Explosión, del comienzo del espacio y del tiempo. Es probable que necesitemos muchos años para la valoración extremadamente difícil de los datos y quizá solo futuras misiones puedan encontrar algo al respecto.

Sin embargo, ese satélite ya me obsequió una vista especial en el camino de ida a la Luna. La pequeña cámara a bordo consiguió tomar una instantánea

singular cuando el Queqiao estaba de camino a su ubicación. En la fotografía se veía la Luna y detrás la Tierra con un tamaño similar; en una esquina de la imagen sobresalía una parte de nuestra antena todavía plegada.

Cuando la vi, me sentí de nuevo como aquel chiquillo frente al televisor en blanco y negro: ante mí aparecía la misteriosa cara oculta de la Luna, y vi, pequeño y borroso, nuestro planeta azul, en el que me encontraba yo entonces. Nunca he ido a la Luna, pero en ese instante me sentí allí. Desde entonces, miro una y otra vez en dirección a nuestro satélite y pienso: allá arriba hay una pequeña parte de mí.

## 2

# El sistema solar y las visiones del mundo

### EL SOL, NUESTRA ESTRELLA MÁS CERCANA

Al dejar la Luna, nuestro camino nos conduce al Sol. Para realizar ese viaje desde la Tierra tendríamos que superar una distancia de ciento cincuenta millones de kilómetros. La luz lo consigue en ocho minutos, por lo que estamos a una distancia de ocho minutos luz del Sol. Y quien mira al Sol, mira un pasado de ocho minutos.

El Sol es la estrella que nos da la vida prácticamente en todos los sentidos. Como ningún otro cuerpo celeste —después de la Tierra—, hace posible la vida humana, afecta al clima, influye de manera profunda en nuestra cultura y ordena nuestra actividad diaria con el ritmo de los días y las noches. No comprendemos el valor del Sol hasta que nos falta. No es de extrañar que un eclipse de sol provocara una gran agitación en los seres humanos y en las sociedades de la prehistoria y de la protohistoria, y un poco todavía en nuestros días.

En el verano de 1999 me encontraba en una posición casi mendicante ante la directora de la escuela primaria de mi hija, porque quería emprender un viaje con ella. Era la mañana antes del 11 de agosto, el día en el que un eclipse total de sol oscurecería algunas zonas de Alemania y de Francia. Los medios de comunicación llevaban días anunciando ese acontecimiento. Se habían agotado las gafas especiales con protección solar, toda Alemania esperaba el oscurecimiento cósmico. Para mi hija y para mí se trataba de una ocasión única porque el siguiente eclipse de sol comparable está previsto para el año 2081 en nuestras latitudes, y yo ya no podré vivirlo.

Sin embargo, las estrictas reglas de la enseñanza obligatoria alemana no tienen ninguna consideración hacia los detalles sentimentales. En nuestra



tierra se cancelan las clases por una ola de calor, pero no por un eclipse de sol. La comprensiva directora se rascó por detrás de las orejas y me indicó que, conforme a la ley escolar, no podía eximir del deber de ir a la escuela a los niños y las niñas por un acontecimiento cósmico secular, ni siquiera a los hijos e hijas de astrónomos. «De todas formas —añadió en un tono revelador—, no existe obligatoriedad de asistencia a la escuela si por motivos laborales tienen ustedes que dejar su hogar a corto plazo. En ese caso pueden llevarse a Jana con ustedes». Le di las gracias por la información y por un día dejé mi hogar, al menos así constó sobre el papel.

Emocionado y lleno de curiosidad me subí al coche con mi hija de seis años. En ocasiones, los investigadores, impulsados por la búsqueda de los secretos del espacio, acuden a cualquier punto del mundo para satisfacer su curiosidad. En aquel momento iniciamos nuestra propia pequeña expedición.

La sombra del eclipse sería visible hacia el mediodía solo durante un tiempo breve y en una estrecha franja de algunas regiones del sudoeste. Allí fue donde quise ir, porque solo en esa franja experimentas ese instante más que fascinante de un eclipse total de sol: la oscuridad amenazadora en pleno día en la que súbitamente se sumerge el mundo. Quien haya experimentado un instante así alguna vez, percibe de manera instintiva lo importante que es la luz solar para toda vida, incluida la nuestra. Solo hay un problema que los astrónomos conocen demasiado bien: el clima no colabora. Estaba nublado en toda Alemania.

Fuimos en coche desde Frechen, mi ciudad natal, en dirección al oeste, siempre buscando el lugar correcto. Con desesperación seguimos el rastro de la luz solar que aparecía aquí y allá a través de las nubes. Finalmente fuimos a parar a Francia, en un campo de cultivo cerca de la ciudad de Metz. Solo quedaban unos pocos minutos hasta el comienzo del eclipse; justo en este momento se despejó el cielo por completo, y apareció la luz del Sol. Como pequeño investigador, a veces debes tener suerte en la vida. Lenta y majestuosamente, el disco lunar se desplazó por delante del Sol y lo cubrió por completo. Estábamos en el momento y en el lugar correctos. Fue algo único y maravilloso. Se nos regaló un raro momento de iluminación en plena oscuridad, en el más amplio sentido de la expresión.

Un eclipse de sol revela una de las coincidencias cósmicas más curiosas de nuestro sistema solar, pues solo es posible gracias a que la Luna, mucho más pequeña, se halla a la distancia precisa de la Tierra y logra tapar el gran disco solar. Si estuviera más cerca, ocultaría una zona mayor que el disco solar; si estuviera más lejos quedaría siempre un borde claro, cegador. Pero,

de esta manera, la Luna cubre exactamente el disco solar candente y nos permite observar algo muy especial, la corona solar, compuesta de gas a varios millones de grados de temperatura, que a veces se arremolina en gigantescas erupciones solares y es arrojado al exterior, igual que los volcanes solares arrojan plasma caliente a la corona.

Durante un eclipse de sol reconocemos al instante que esta no es una estrella muy tranquila, sino que burbujea como una misteriosa marmita mágica en la cocina de una bruja. Sin embargo, en las explosiones, grandes y pequeñas, de la superficie sucede algo especial y no menos mágico: se producen minúsculos neutrinos que son arrojados al espacio sideral. Se trata de residuos de átomos que son desmenuzados por el calor del Sol y a continuación salen disparados a la máxima velocidad a través del sistema solar. El núcleo de un átomo está compuesto por protones pesados, de carga positiva, y neutrones, sin carga eléctrica y casi igual de pesados; estos a su vez están rodeados por una o varias capas de electrones, de carga negativa y mucho más ligeros.

A estas veloces partículas energéticas también se las denomina equívocamente «rayos cósmicos». Al penetrar en la atmósfera terrestre, estos rayos cósmicos o —hablemos con propiedad— partículas cósmicas generan, entre otros fenómenos, las espectaculares auroras boreales que hacen que el cielo oscuro sobre Laponia o Alaska se ponga a brillar y a danzar de una forma sobrenatural. Sin embargo, la lluvia de partículas procedentes de las violentas tormentas solares son importantes para nosotros, los seres humanos, por un motivo adicional: pueden destruir la sensible electrónica de los satélites, cambiar el campo magnético de la Tierra y obstaculizar la propagación de las ondas de radio. En los episodios especialmente violentos incluso desencadenan tensiones en nuestra red eléctrica y paralizan el suministro de energía de ciudades enteras. Por suerte, esas tormentas son muy raras, y entretanto, gracias a los informes de la meteorología del espacio, pueden adoptarse a tiempo las medidas oportunas.

Solo durante un eclipse de sol podemos percibir a simple vista dónde se originan esas partículas cósmicas. A mí me impresiona particularmente esa visión. Por mi carrera universitaria sé que la misma física de partículas que mi hija y yo podemos ver con nuestros propios ojos en el borde del Sol también se desarrolla en el borde de los agujeros negros, solo que allí en una escala mucho más extrema. La interacción entre los campos magnéticos y las violentas turbulencias juegan al ping-pong con esas partículas minúsculas ionizadas, las lanzan de un lado a otro y les imprimen cada vez más energía.

Los electrones, acelerados de esta manera y desviados en el campo magnético, hacen que el Sol y también el entorno directo de los agujeros negros brillen con luz de radiofrecuencia. Las partículas cósmicas, que se generan en la explosión de estrellas y en las proximidades de los agujeros negros, alcanzan una energía incluso mucho más elevada que la del Sol y vagabundean a través de los turbulentos campos magnéticos de nuestra Vía Láctea y del espacio.

Algunas impactan en la atmósfera terrestre y entonces pueden ser medidas. Experimentos gigantescos, como los del Observatorio Pierre Auger en Argentina, en el que sigo colaborando, miden tales partículas con detectores distribuidos a lo largo de miles de kilómetros cuadrados.

Si no entendiéramos la física del Sol y de las partículas cósmicas, tampoco podríamos comprender la física de los agujeros negros. Qué asombroso es que todo en el universo entero esté conectado entre sí por los mismos procesos y que estos se desarrollen conforme a las mismas leyes: el brillo de los agujeros negros, las erupciones del Sol y las auroras boreales en la Tierra. Es un lazo de la física, infinitamente trenzado, que recorre el cosmos entero.

Todo esto fue casi visible para mí durante el eclipse de sol del 11 de agosto de 1999. Para mi hija se trató de una agradable excursión infantil con una buena dosis de espíritu aventurero y de curiosidad. Posteriormente fabricó unas gafas con papel de aluminio y fue pidiendo a todo el mundo que mirara con ellas el Sol. Me pregunto qué pensarían los vecinos.

Cuando miré el Sol junto a mi hija, sentí veneración ante las fuerzas del espacio. Me impresionó especialmente el color rojo candente del Sol oscurecido que brillaba a través del ligero velo de nubes. Ese anillo que borbotea posee algo lleno de fuerza y es casi hipnotizador. Me inspiró posteriormente durante la elección de los colores para nuestra predicción acerca de la radioimagen de los agujeros negros.

Tengo el privilegio de saber qué mecanismos cósmicos producen un eclipse de sol. Sin embargo, los seres humanos desde la Edad de Piedra hasta nuestros días los temían, y especialmente en el pasado la gente se horrorizaba ante tales sucesos, que contemplaban y experimentaban como poderosos mensajes divinos. Unos documentos de más de cuatro mil años de antigüedad informan sobre uno de esos eclipses. Por aquel entonces, los astrónomos oficiales chinos intentaban predecir esos fenómenos basándose en sus observaciones del cielo. Sin embargo, no siempre lo conseguían. Según una antigua leyenda, dos sabios que no predijeron con exactitud el momento de un

eclipse de sol y a quienes encontraron borrachos fueron ejecutados por orden del soberano<sup>[14]</sup>. Es posible que ese conocido episodio no sea cierto, pero en la actualidad, los astrónomos no cometerían esos errores. A pesar de todo, solemos equivocarnos bastante cuando investigamos los límites del conocimiento. ¡Afortunadamente, en nuestros días no debemos temer ya la pena capital!

El Sol es una estrella como cualquier otra, pero es *nuestra* estrella y, por tanto, está mucho más cerca y es mucho más luminosa que todas las demás. Si no existiera ese gigantesco tórrido sol, no nos sería posible reconocer nuestra luna ni los demás planetas que orbitan en el cielo, pues estos solo reflejan la luz solar. El Sol es tan imponente que contiene más del 99 por ciento de la masa de nuestro sistema solar. Su fuerza gravitatoria mantiene unido nuestro sistema planetario, y lo que hemos aprendido sobre las estrellas y sobre la fuerza gravitatoria se lo debemos en primera instancia a nuestro sistema solar.

El Sol es una bola de gas de un tamaño colosal y altísima temperatura, en la que arde el fuego nuclear. El hidrógeno, del que está compuesta nuestra estrella en su mayor parte, le sirve de combustible. Este elemento ligero se fusiona en el núcleo solar para convertirse en helio, donde imperan unos inconcebibles quince millones de grados Celsius. De todas formas, en la superficie del Sol sigue habiendo cinco mil quinientos grados Celsius. La radiación de ese calor es, en definitiva, la fuente de toda nuestra energía en la Tierra, y no se generaría sin la fuerza gravitatoria y la elevada presión resultante en el interior del Sol. Sin la luz solar no podrían crecer las plantas, que obtienen su energía de la fotosíntesis. También le debemos al Sol nuestra alimentación, independientemente de si somos veganos, vegetarianos o carnívoros, ya que los demás animales también viven de las plantas iluminadas por él.

Quien quema leña, está quemando energía solar. El petróleo, el gas natural y el carbón son residuos biológicos de procesos ocurridos en la Tierra en tiempos inmemoriales, es decir, energía solar almacenada. Sin embargo, estamos destruyendo todas nuestras reservas en un tiempo brevísimo y estamos sobrecargando el clima con una energía y unas sustancias que tardaron muchos millones de años en formarse. No hay que ser ningún científico climático para comprender que, a la larga, eso no puede terminar bien.

Sin el Sol tampoco podríamos generar electricidad. Resulta palmario que la energía fotovoltaica no se habría inventado nunca, sí, pero es que incluso

las centrales hidroeléctricas solo funcionan porque el Sol evapora constantemente el agua y luego la lluvia llena nuestros lagos y ríos. Incluso las plantas de energía eólica funcionan solo porque el Sol calienta nuestra atmósfera, generando así diferencias regionales de temperatura que avivan los vientos. Únicamente las centrales mareomotrices obtienen su energía de la gravedad lunar y las centrales nucleares a partir de elementos que se generaron en el espacio durante el nacimiento de los agujeros negros y de las estrellas de neutrones. De todas formas, estos elementos solo nos llegan a causa de la fuerza gravitatoria del Sol. Ahora bien, toda la energía del Sol, de la Luna, de las estrellas y de los elementos procede en última instancia de la Gran Explosión, de la energía primigenia del universo.

El Sol impulsó también nuestra evolución hasta los bípedos con pensamiento abstracto que somos, pues sus partículas cósmicas, al impactar en la Tierra, avivan las tasas de mutación en las células de los organismos. El hecho de que estos pudieran seguir desarrollándose, que la evolución avanzara, que los seres humanos procedieran de pequeños mamíferos, se lo debemos también al Sol. En cierto modo somos mutantes cósmicos. Sin embargo, las tasas muy elevadas de mutaciones producen también células cancerígenas y con ello la muerte y la ruina. Nuestra humanidad se ha conseguido también gracias al esfuerzo profundo unido al sufrimiento, sin esos cambios genéticos potencialmente peligrosos seguiríamos siendo organismos unicelulares.

En comparación con otras estrellas turbulentas, el Sol posee un temperamento tranquilo y en realidad es una estrella del montón, ni muy grande, ni muy pesada, ni especialmente activa<sup>[15]</sup>. A sus cuatro mil seiscientos millones de años de edad se encuentra también en el mejor momento de su vida. Haciendo el cálculo con relación a su masa total, se sabe que el reactor de fusión que es el interior del Sol está funcionando a medio gas. La energía generada por unidad de volumen queda muy por debajo de la del metabolismo humano. Nuestro cuerpo es una máquina bien entrenada, que trabaja permanentemente a toda marcha; puestos muy juntos todos seríamos una estrella pequeña<sup>[16]</sup>.

Sin embargo, gracias a su tamaño, el Sol lo eclipsa simplemente todo. La población mundial entera tendría que crecer miles de billones de veces para generar tanta energía como la que produce nuestro astro mayor.

El Sol se está consumiendo prácticamente a sí mismo. Durante la fusión de hidrógeno a helio, la materia se transforma en energía. En ese proceso, nuestra estrella disminuye en torno a los cuatro mil millones de kilogramos

por segundo. Teniendo en cuenta las grandes cantidades de energía que libera, tan solo consume una pequeñísima parte de su propia masa y posee, por consiguiente, una eficiencia inimaginable. Ninguna máquina humana puede producir tanta energía a partir de tan escaso combustible. Si nuestro cuerpo fuera tan eficiente y económico como el Sol, cada ser humano necesitaría en toda su vida menos de medio gramo de alimento. En el cosmos, solo los agujeros negros superan a las estrellas en lo tocante a la conversión eficiente de masa en energía.

No obstante, esto alberga también una noticia triste: en algún momento, el depósito solar se quedará vacío. Y no es posible repostar. El fuego del Sol se apagará y, por tanto, también la vida en la Tierra, si esta no se ha extinguido antes. Sin embargo, ese momento no ha llegado aún. Los pronósticos dan al Sol todavía entre cinco y seis mil millones de años. ¡Todavía tenemos tiempo más que suficiente para invertir en energía fotovoltaica o en paneles solares!

#### LOS DIOS EN EL CIELO: EL SECRETO DE LAS ÓRBITAS PLANETARIAS

Cuando abandonamos el Sol y dirigimos nuestra mirada hacia los planetas que giran alrededor de él, entonces las distancias de minutos luz se convierten rápidamente en horas luz. Es ahí, en los planetas, donde está la clave para comprender la fuerza gravitatoria y el desarrollo de nuestra visión moderna del universo. Hasta ellos y un poquito más allá han viajado vehículos espaciales construidos por seres humanos. Todo lo que está más lejos de nuestro sistema solar solo podemos observarlo de lejos, con ayuda de los telescopios.

Mientras que Mercurio, el planeta más cercano al Sol, está solo a sesenta millones de kilómetros de este, Neptuno, el planeta más alejado de él, traza su órbita alrededor de nuestra estrella a cuatro mil quinientos millones de kilómetros y está, por tanto, a cuatro horas luz de distancia. Para una vuelta completa necesita ciento sesenta y cinco años terrestres. Nuestros antepasados observaron los planetas durante milenios y se extrañaron de sus órbitas regulares y al mismo tiempo irregulares. Las estrellas «fijas» tienen un lugar permanente en el firmamento, mientras que nosotros giramos bajo él; sin embargo, los planetas parecen errar entre las estrellas. De ahí también su nombre: «planeta» significa «errante».

En nuestro cielo, todos los planetas, pero también el Sol y la Luna, se mueven a lo largo de la misma línea, como si existiese una pista de carreras planetaria. A esta línea invisible la denominamos «eclíptica», la palabra griega para «desaparición, ausencia u oscurecimiento». Este término se remonta a los eclipses de sol que pueden observarse en esa zona.

La eclíptica existe porque todos los planetas giran en un plano alrededor del Sol. Marcan un disco virtual de dimensiones astronómicas. La propia órbita terrestre forma parte de este disco y, como nos encontramos sobre él, se nos aparece solo como una estrecha línea en el firmamento, igual que un viejo disco de vinilo que observáramos desde un lateral. Los planetas que están más cerca del Sol giran más rápido en torno a él que la Tierra. Tiene que ser así para que la fuerza centrífuga de estos cuerpos celestes pueda compensar la intensa fuerza gravitatoria del Sol. Cuanto más cerca estamos de este, tanto más intensamente percibimos su fuerza de atracción. Los planetas más exteriores giran con mayor lentitud que la Tierra porque en ellos la fuerza gravitatoria es menor. Si giraran a mayor velocidad, se saldrían de su órbita alrededor del Sol.

Así pues, desde nuestra perspectiva terrestre resultan extrañas las sendas de los planetas en relación con el cielo de estrellas fijas. Son como los corredores en la curva de un estadio de atletismo, en la que los atletas de las pistas exteriores tienen que recorrer caminos más largos y avanzan sin duda con más lentitud. Los planetas Mercurio y Venus son los mejores velocistas en las calles interiores: son particularmente rápidos y se hallan siempre en las cercanías del Sol. De ahí que solo puedan verse al amanecer y al atardecer; Venus es el lucero matutino y vespertino más frecuente. Los grandes planetas son más lentos, corredores aficionados en las pistas exteriores, y los adelanta regularmente incluso nuestro planeta. Desde nuestra perspectiva, parece que van marcha atrás hasta que la Tierra los supera y se sitúa de repente frente a ellos en la parte opuesta del estadio solar. Vistos desde esa posición parecen avanzar de pronto en la otra dirección.

Obtener estos conocimientos nos costó milenios a los seres humanos. Las órbitas de los planetas visibles a simple vista (Mercurio, Venus, Marte, Júpiter y Saturno) fueron un misterio durante miles de años. No es de extrañar que hayan marcado nuestra visión del mundo y las religiones.

Mucho antes de que se entendieran las razones de estos fenómenos cósmicos, la astronomía estaba al servicio de fines muy diferentes. Los seres humanos de todas las regiones veneraban las estrellas y los fenómenos celestes de una forma muy natural, pues los astros reglaban la vida diaria y los

ciclos anuales. El Sol dominaba el día, y el momento de su salida y de su puesta documentaba el transcurso del año y de las estaciones. Las fases de la Luna nos daban la medida del tiempo para el mes, que por razones no aclaradas se corresponde aproximadamente con el ciclo femenino. El Sol y la Luna parecían determinar la fertilidad, el bienestar y las aflicciones de los seres humanos. El hecho de alabar esos poderes divinos se produjo por sí solo.

#### LOS COMIENZOS DE LA ASTRONOMÍA

Los primeros indicios arqueológicos de la exploración del cielo se remontan decenas de miles de años<sup>[17]</sup>. Los observadores del cielo crearon calendarios después de registrar el paso del día, la noche y las estaciones del año. Inicialmente el ciclo lunar sirvió como marcador del ritmo, y más tarde se sincronizó ese cálculo del tiempo con el recorrido del Sol. Un temprano testimonio europeo de esa sincronización es el famoso disco celeste de Nebra. Ese disco de bronce de más de tres mil setecientos años de antigüedad pasa por ser la más antigua representación concreta del cielo<sup>[18]</sup>.

Los seres humanos supieron aplicar esos sagaces conocimientos a la agricultura o la navegación marítima, una empresa muy arriesgada y peligrosa en aquellos tiempos. En la actualidad disponemos de la navegación por satélite, pero para establecer las coordenadas seguimos dependiendo en última instancia de las observaciones astronómicas, no de las estrellas, sino de las ondas de radio de agujeros negros muy distantes, que ahora nos sirven como puntos cósmicos de orientación<sup>[19]</sup>.

Aproximadamente en el tercer milenio a.C., los sacerdotes de Mesopotamia —cuya capital sería Babilonia— seguían con regularidad la posición de la Luna y de los planetas. Empleaban la Luna como calendario para sus días festivos, pero también para determinar los periodos de cosechas y de cobro de impuestos. El mes administrativo tenía treinta días y el año, trescientos sesenta; los días que faltaban se completaban en años bisiestos. La base de su sistema numérico era el número sesenta y no el diez como el nuestro. El hecho de que dividamos el día en dos periodos de doce horas y el círculo en trescientos sesenta grados se remonta, por consiguiente y con toda probabilidad, a los babilonios.



Con el desarrollo de la escritura cuneiforme fue posible comparar entre sí los datos cósmicos, independientemente del momento de su observación. A esto se añadió, a partir del primer milenio a. C., un programa de observación muy bien organizado y un desarrollo espectacular de las matemáticas. Entre los ríos Éufrates y Tigris había grupos de investigadores dedicados en exclusiva a las mediciones y a los cálculos celestes. Existen millares de tablillas cuneiformes repletas de datos astronómicos. Así pues, los análisis de los acontecimientos astronómicos podían transmitirse de una vez a través de las generaciones y ya no dependían solo de la memoria de individuos concretos. Este fue el comienzo del registro, del almacenamiento y del análisis cuidadoso de los datos, y podemos denominarlo ya «científico», a pesar de que servía principalmente para fines religiosos.

Para los mesopotámicos, el universo estaba ordenado, pero también sometido a la voluntad de los dioses, cuyos planes podían leerse en los presagios, por ejemplo a partir de la aparición de los planetas<sup>[20]</sup>. Cuando los observadores del cielo consiguieron predecir las órbitas planetarias, utilizaron esta información para tratar de interpretar el futuro. Los soberanos mandaban elaborar horóscopos para determinar el mejor momento para sus proyectos.

Imagino que este nuevo arte de la aritmética y de la predicción del movimiento de los planetas debió de impresionar enormemente a la gente. Y es probable que diera lugar a la idea de que el destino podría predecirse. La astrología babilónica influiría en muchas culturas; incluso la Biblia contiene un monumento literario a los astrólogos de Oriente en los personajes de los tres Reyes Magos<sup>[21]</sup>. No obstante, transcurrieron milenios para averiguar que la astrología se basaba en una suposición falsa: aunque sí se pueda calcular el recorrido de algunos cuerpos celestes, ello no tiene ninguna consecuencia para la vida humana.

En Egipto, las inundaciones del Nilo, que traían consigo el lodo fértil del curso alto del río, determinaban el ritmo del tiempo. Para los egipcios, el cielo poseía una explicación mitológica. El Sol, en la forma del dios Ra, renacía cada día y ascendía por el este desde las aguas. En la imaginación de aquellas gentes, Ra dispensaba la vida y lo mantenía todo vivo. Cruzaba el cielo, se sumergía al anochecer por el oeste, moría y renacía a la mañana siguiente. Era un ciclo de duración eterna.

El cielo y la tierra se tocan en el horizonte: en aquellos tiempos, el ser humano que miraba a su alrededor y hacia arriba tenía que estar imbuido por el sentimiento de que su planeta se hallaba en el centro del cosmos. La idea del disco terráqueo estaba muy extendida en aquella época y encajaba en el

sentimiento antropológico de la vida. Los egipcios creían en un cosmos con un supramundo y un inframundo. Los dioses habitaban en todas partes y se aseguraban de que el edificio entero del mundo permaneciera estable y en reposo: abajo reinaba el dios de la Tierra, Geb, y por arriba la diosa del cielo, Nut, que era la madre de todos los astros. Entre la tierra y el cielo se hallaba el reino de Shu, el dios del aire y de la luz, que mantenía el cielo en lo alto y cuidaba de que no se precipitara sobre la tierra.

Los antiguos babilonios creían que la masa terrestre era un disco que flotaba en el mar del mundo. Los dioses vivían en el cielo y determinaban el recorrido de los astros. El firmamento cubría la Tierra como una cúpula. Esta visión del mundo marcó toda la Antigüedad y encajaba con la ciencia de aquel entonces.

También los griegos creían en un supramundo y en un inframundo; intensificaron las observaciones del cielo y profundizaron en las matemáticas, sobre todo en la geometría. Además, combinaron las observaciones babilónicas de las estrellas con la teoría espacial de los egipcios. Ya en el siglo VI a. C. algunos pensadores griegos, entre ellos Pitágoras, llegaron a la conclusión de que la Tierra debía ser redonda. Platón (\* 428-427 a. C.) menciona también en sus escritos la forma esférica de la Tierra.

Entre los logros de las ciencias naturales de la Antigüedad que siguen impresionándonos en la actualidad se encuentra la medición de la circunferencia de la Tierra que realizó Eratóstenes de Cirene alrededor del año 200 a. C. En dos ciudades egipcias muy distantes hizo que se anotaran los ángulos de las sombras justo al mediodía. En una de las ciudades, el Sol se hallaba exactamente en el cenit, por lo que no arrojaba ninguna sombra; en la otra ciudad las sombras medidas tenían un ángulo de algo más de siete grados. Como Eratóstenes había medido concienzudamente la distancia entre ambas ciudades y conocía los ángulos de las sombras, pudo calcular con relativa exactitud la circunferencia de la Tierra según el teorema del ángulo exterior, un logro asombroso para aquella época. El conocimiento de la forma esférica de la Tierra se conservó también hasta la Edad Media europea y se enseñaba en las universidades<sup>[22]</sup>. Eso que cuentan acerca de que los científicos contemporáneos de Cristóbal Colón seguían creyendo que la Tierra era un disco es un cuento de hadas, como muchas otras anécdotas que hoy se siguen contando con agrado sobre los tiempos supuestamente sombríos de la Edad Media<sup>[23]</sup>.

Sin embargo, por aquel entonces no habría sido posible convencer a los soberanos o a la gente sencilla de que la Tierra no estaba en el centro del

cosmos. El universo era desde tiempos inmemoriales la residencia de los dioses y de las mismas estrellas errantes. Entre los babilonios, incluso la división de la semana se basaba en los siete cuerpos celestes que pueden verse a simple vista: el Sol, la Luna y los cinco planetas brillantes, que los romanos bautizaron tomando los nombres de sus propios dioses: Mercurio, Venus, Marte, Júpiter, Saturno... Los nombres de los días de la semana también se derivan del panteón romano<sup>[24]</sup>.

Los pensadores griegos moldearon nuestra visión del mundo durante largo tiempo, apoyados enérgicamente por la casi aplastante autoridad de Aristóteles (\* 384 a. C.), quien, desde la Antigüedad hasta bien entrada la era cristiana, fue considerado «el filósofo». Su influjo era tan grande que cualquier otra consideración diferente de la suya parecía absurda y se consideraba ilícita. Aristóteles no era astrónomo y su visión del mundo era relativamente simple. Sin embargo, la ampliaron importantes astrónomos de la Antigüedad tardía como Hiparco de Nicea (\* 190 a. C.) y Claudio Ptolomeo (\* 100 d. C.). Pero la Tierra continuó siendo el centro del cosmos: todos los planetas y las estrellas giraban en las esferas celestes alrededor de un centro, la Tierra. Ptolomeo compendió todo el conocimiento de la antigua astronomía en su *Almagesto*, una obra en trece volúmenes, y acuñó la expresión de «cosmovisión ptolemaica». Otros investigadores, como Aristarco de Samos (\* 310 a. C.), ya creían en la visión heliocéntrica del mundo, según la cual el centro del cosmos lo ocupa el Sol y no la Tierra. Sin embargo, al final se impuso la visión geocéntrica del universo.

#### UNA NUEVA VISIÓN DEL MUNDO

Esta visión del mundo —inconcebible para nosotros en la actualidad— estuvo en vigor durante aproximadamente mil quinientos años. Los aplicados astrónomos de la antigua China, de la India<sup>[25]</sup> y del mundo árabe-islámico la apreciaban de igual manera que la sociedad europea-cristiana, hasta que Nicolás Copérnico y Johannes Kepler la revolucionaron. En calidad de teólogos con sólida base matemática, en algún momento no consintieron que la autoridad de los antiguos filósofos los confundiera.

Hace algunos años, un viaje de trabajo me condujo a Pekín, a la vigésimo octava asamblea general de la Unión Astronómica Internacional. Miles de

astrónomos de todo el mundo se reunieron allí, debatieron acerca de los resultados científicos más recientes y adoptaron resoluciones como, por ejemplo, poner nombre a algunos cuerpos celestes. Un historiador de la ciencia autóctono informó allí sobre la evolución de la astronomía en China. Sus astrónomos observaban el cielo desde hacía miles de años y ya por entonces podían recurrir a considerables recursos económicos. De este modo, durante un largo periodo, se creó un tesoro a partir de cantidades impresionantes de datos fruto de las observaciones realizadas, un tesoro que sigue empleándose hoy en día. Hasta los siglos XI y XII d. C., la astronomía china aventajó con creces a la occidental. No obstante, según ese historiador, China no produjo por aquel entonces a ningún científico con las habilidades matemáticas de Copérnico o de Kepler. Los astrónomos chinos hicieron demasiado poco a partir de sus datos.

«¿Por qué?», preguntó un colega entre el público. «Tal vez tuvo que ver con su visión del mundo», supuso el orador. Porque mientras que en Occidente la mayor parte de los pensadores comenzaron a buscar explicaciones científicas para los secretos del cielo, en China se trataban asuntos predominantemente sobrenaturales. El mundo era un organismo complejo, y el cielo estaba repleto de espíritus y de seres míticos. Todo estaba mucho más entretelado, de un modo muy diferente al concepto de un único, distante y todopoderoso Dios y Creador en Occidente<sup>[26]</sup>. Para los astrónomos chinos, no tenía sentido preguntarse qué era lo que movía a los astros. En cambio, en Occidente, la antigua creencia en los dioses estaba siendo desplazada cada vez más por la monoteísta visión del mundo judeo-cristiana, si bien la superstición y la brujería, así como la astrología no se extinguieron por completo.

También el judaísmo estuvo muy marcado por la argumentación racional. La interpretación de la Torá, sus sagradas escrituras, va acompañada de intensos debates, razonamientos sutiles y cadenas lógicas de argumentación. Curiosamente, la visión astronómica del mundo, al contrario de lo que sucede en otras religiones, no desempeña ningún papel especial en la tradición judía. En verdad, esa visión se desarrolla también con el trasfondo del conocimiento cósmico en el Oriente de aquella época situado entre Babilonia, Grecia y Roma; el Sol, la Luna y las estrellas quedan degradadas a simples luces en la historia de la creación descrita en el Génesis. Esa grandiosa narración, al comienzo del Antiguo Testamento, explica el nacimiento de nuestro mundo actual paso a paso; el relato está dividido en segmentos diarios: al principio está la luz, luego se concentran el agua y lo seco, y al final surgen las plantas,

los animales y el ser humano. Las luces del cielo no aparecen al principio de la creación, sino en algún pasaje intermedio, degradadas casi con desapego. No son seres divinos, sino que solo existen para otorgar el tiempo a los seres humanos. El Génesis describe un mundo racional en extremo, desencantado. Los milagros en el mundo de la Biblia son categóricamente una excepción.

De ahí que según el sistema de valores judeo-cristianos no haya nada sobrenatural en la naturaleza. Esta no posee una voluntad propia, sino que tiene su origen en un único Dios, el creador y la causa primigenia de todas las cosas, que siempre fue, siempre es y siempre será. En esta concepción descubrimos ya un fundamento importante de las ciencias naturales modernas, esto es, la fiabilidad de los principios que están basados en la naturaleza. Únicamente con este supuesto, las ciencias naturales adquieren un sentido.

Aunque se lee una y otra vez que ciencia y creencia se hallan en eterno conflicto, se trata de un mito que a la era de la secularización le ha encantado propagar desde el siglo XIX<sup>[27]</sup>. Los historiadores contemplan este asunto en la actualidad de una manera mucho más matizada<sup>[28]</sup>. Las ciencias medievales fueron durante mucho tiempo una parte de la teología y no formaban disciplinas propias. Los monasterios de la Edad Media eran refugios del saber y de la transmisión del conocimiento; las universidades surgieron con la bendición eclesiástica. Muchos científicos importantes poseían una educación teológica, eran profundamente creyentes y a menudo se hallaban al servicio de la Iglesia. Ahora bien, la Iglesia reclamaba en todas las ciencias la soberanía hermenéutica, lo cual condujo a conflictos cada vez más numerosos durante los siglos XV y XVI. El Renacimiento y la Reforma hacía tiempo que se habían apoderado de las personas y habían transformado radicalmente la imagen del mundo y de la humanidad, podría decirse también que la habían revolucionado.

La revolución cosmológica comenzó en 1543 con el audaz proyecto de una visión del mundo, no del todo nueva, por parte del canónigo prusiano-polaco Nicolás Copérnico. En ella, el Sol pasa a ocupar el centro del cosmos, y la Tierra gira alrededor de su eje; como todos los demás planetas se mueve en una órbita alrededor del Sol. Desde un punto de vista matemático, esta teoría era convincente y progresista; ahora bien, también era desconcertante porque, en esta visión del mundo, el espacio tenía que ser mucho más grande de lo que se había supuesto hasta entonces y la Tierra rotar a una velocidad más elevada. ¿No debería notarse esa peligrosísima rotación de alguna manera?

Así pues, pasaría mucho tiempo hasta que se estableciera esta nueva visión del mundo. Incluso algunos sabios contemporáneos de Copérnico, que trabajaban o bien al servicio de la Iglesia o de soberanos seculares, tenían buenos motivos para dudar de ella. El influyente astrónomo danés Tycho Brahe no creía en una misteriosa y gigantesca fuerza que hiciera rotar a la Tierra, pero también sabía que el modelo cósmico de Ptolomeo no podía ser cierto. Así que Brahe, como observador excelente que era, legó los datos decisivos a partir de los cuales el matemático, teólogo y astrónomo alemán Johannes Kepler deduciría posteriormente sus famosas leyes de las órbitas planetarias. Descubrió que los planetas giran en torno al Sol en órbitas elípticas, y no circulares, y que un planeta gira más rápido alrededor del Sol cuanto más cerca está de él. Para Kepler, que veía en el cosmos la belleza y la armonía de Dios, la elegancia de sus ecuaciones matemáticas significaban un descubrimiento satisfactorio incluso desde un punto de vista teológico, pues se correspondían con la fiabilidad del Creador, que había erigido su obra como un arquitecto.

Las mediciones de Brahe, que sirvieron posteriormente de base para proseguir las investigaciones, es probable que fuesen los últimos grandes logros de la astronomía conseguidos sin ayuda de un telescopio. Este instrumento fue construido a comienzos del siglo XVII por un ingenioso fabricante de gafas de Middelburgo<sup>[29]</sup>, y se empleó primero en la navegación marítima hasta que Galileo Galilei lo enfocó una noche hacia el cielo estrellado de Padua. Cuando en 1609 descubrió las primeras lunas de Júpiter, desencadenó intensos debates en Italia y en toda Europa. Para el italiano Galilei se reforzaba así la visión copernicana del universo, pues la rotación en torno a Júpiter de las lunas recién descubiertas demostraba que de ninguna manera todos los cuerpos celestes giraban alrededor de la Tierra.

Enseguida, este joven investigador se mostró cada vez más seguro de sí mismo. Sus tesis, promovidas durante mucho tiempo por la Iglesia católica, comenzaron a ser debatidas favorablemente entre los jesuitas. Sin embargo, el ambicioso Galileo ignoraba en sus publicaciones los trabajos de Kepler y seguía creyendo en las órbitas circulares de los planetas. Por tanto, su modelo no encajaba, hablando con rigor, con los mejores datos disponibles en su época. Sin embargo, el pisano, profundamente creyente aunque en sus declaraciones cuestiona incluso la autoridad del Papa, irritó con sus enérgicas actuaciones las incipientes simpatías del padre de la Iglesia. Los escritos de Copérnico figuraron en este tiempo en el índice de libros prohibidos y solo pudieron publicarse más tarde con una docena de cambios. La confrontación

de Galileo con la Inquisición en Roma tuvo lugar en el año 1632; lo condenaron a un arresto domiciliario de por vida, pero el obispo de Siena continuó apoyándolo con medios económicos. La publicación de sus escritos en Italia resultaba entonces difícil, razón por la cual aparecieron en otras partes de Europa. Galilei era un buen comunicador y un retórico, por lo que sabía dar a conocer los resultados de las investigaciones fuera de los círculos especializados. En ese sentido, se olvidó de dignificar convenientemente los trabajos preparatorios de otros científicos. En la actualidad existen muchas leyendas e historias en torno a Galileo, pero no todas superan un examen histórico riguroso, sino que contienen muchas retroproyecciones modernas sobre su persona y su época<sup>[30]</sup>.

Después de Kepler y de Galileo tendrían que pasar doscientos años hasta que se disiparan los últimos argumentos científicos en contra de esta nueva visión del universo. Sin embargo, hacía mucho tiempo que había comenzado ya el cambio en el modo de pensar.

Desde la perspectiva actual considero más esenciales los logros de Johannes Kepler. Por su forma de ser, este era un personaje en las antípodas de Galileo, era un matemático excelente, delgado y enfermizo que vivió siempre atormentado por sus inseguridades, y que continuamente se vio afectado por los golpes personales del destino. El corregidor de Leonberg acusó a su madre de bruja<sup>[31]</sup>, y cuando murió su esposa, se lamentaba por la penosa búsqueda de una nueva compañera; con las mujeres tuvo poca suerte. Sin embargo, sus tres leyes todavía forman hoy en día la base de la mecánica celeste. Gracias a ellas se deducen las masas de las estrellas y la existencia de la materia oscura. Cuando en mis clases explico los agujeros negros, menciono la primera ley de Kepler sobre el movimiento de los planetas alrededor del Sol; pues prácticamente de la misma manera se mueve la materia en torno a un agujero negro, solo que a una mayor velocidad.

Más de cincuenta años después y sobre los fundamentos de Kepler, el teólogo y genio universal inglés Isaac Newton, conseguiría fundar no solo la mecánica clásica, sino también explicar la fuerza gravitatoria en la Tierra, la órbita de la Luna y el movimiento de los planetas alrededor del Sol con ayuda de su Ley de la Gravitación Universal<sup>[32]</sup>.

Según Newton, la gravitatoria es una fuerza universal de gran alcance que se ocupa de que las masas se atraigan independientemente de su composición. Esa fuerza actúa con menor intensidad cuanto más separadas estén las masas entre sí, pero nunca queda anulada por completo. Además, rige en todo el universo para todos los cuerpos; para los planetas igual que para las manzanas

que caen del árbol en la Tierra, pero también para los mares o para las mareas vivas durante el plenilunio. Con ella quedaba explicado casi todo el sistema, pero solo casi.

#### VENUS, LA DIOSA DEL AMOR Y LA REGLA DE MEDICIÓN DEL ESPACIO

El tamaño del espacio y la distancia entre las estrellas seguían siendo cuestiones fundamentales que estaban pendientes de respuesta desde hacía mucho tiempo en la exploración de las esferas celestes. Si la Tierra giraba alrededor del Sol, ¿no deberían desplazarse entonces las posiciones de las estrellas en el cielo?

Este aparente desplazamiento de una estrella se denomina «paralaje» y se origina cuando la estrella es observada desde dos lugares muy distantes entre sí. Todos podemos percibir ese efecto con facilidad cuando extendemos un brazo, alzamos el pulgar y lo contemplamos primero con un ojo y luego con el otro. Esas perspectivas ligeramente diferentes hacen que parezca como si el pulgar se moviera hacia un lado u otro. Cuanto más acerquemos el brazo hacia nosotros, mayor será ese movimiento aparente. Cuando miramos con los dos ojos hacia un objeto alejado de nosotros, podemos ver espacialmente y calcular así la distancia.

Lo que vale para nuestro ojo a pequeña escala, es válido también para nuestra órbita alrededor del Sol. Si mido la posición de una estrella en verano y de nuevo en invierno, cuando la Tierra está una vez a la izquierda y otra a la derecha del Sol, las estrellas, dependiendo de su distancia, deberían desplazarse también hacia la derecha o hacia la izquierda. Sin embargo, nada de eso podía verse por aquel entonces. O bien no era cierto el modelo de Kepler y de Copérnico, o bien las estrellas estaban tan lejos que el desplazamiento era mínimo y apenas podía detectarse. Así pues, la distancia a la que se hallaban y, por consiguiente, el tamaño del universo visible, dependía de la distancia exacta de la Tierra al Sol. Determinar esa distancia se convirtió en uno de los grandes desafíos de la astronomía. Para superarlo fue precisa una coordinación entre astrónomos de todo el mundo, quienes se sumergieron al mismo tiempo en una competición a escala global.

Venus se convirtió en el objeto del deseo. Nuestro planeta vecino, bautizado así por la diosa romana del amor y de la belleza, es muy caliente y



no muy seductor que digamos. La presión de la densa atmósfera que lo rodea nos aplastaría. Sobre la superficie de Venus la presión atmosférica es la misma que a novecientos metros de profundidad marina en la Tierra, y el calor reinante allí es como el de una placa de inducción.

Sin embargo, Venus ha realizado un servicio de incalculable valor a la astronomía moderna, pues gracias a este planeta pudo calcularse con exactitud la distancia entre el Sol y la Tierra, la unidad astronómica, el tamaño del sistema solar y, por tanto, incluso las dimensiones de todo el universo. Para ese cálculo, los investigadores necesitaban eso que se denomina el «tránsito de Venus», ese breve instante en el que este planeta pasa justo por delante del Sol; es algo similar a un eclipse solar, solo que muchísimo más pequeño y perceptible tan solo por astrónomos avezados.

Mientras que la Luna cubre en ocasiones todo el Sol a causa de su proximidad a la Tierra, Venus nunca lo consigue porque está mucho más lejos. Solo puede observarse una mancha pequeña y muy poco llamativa cuando este planeta pasa como flotando durante unas pocas horas por delante del Sol candente. De ahí que durante mucho tiempo los seres humanos no pudiéramos percibir los tránsitos de Venus.

Johannes Kepler predijo, ya en el siglo XVII, los tránsitos planetarios de Venus y de Mercurio, los dos planetas situados en el lado interno de la órbita terrestre. Sin embargo, no vivió para comprobar si su predicción era cierta; Kepler murió antes de que pudiera observar el siguiente tránsito de Venus, que tuvo lugar en el año 1631.

El rastro de la sombra de Venus sobre el Sol depende del lugar de observación en la Tierra y de la distancia al Sol. Si nos desplazamos hacia el sur, la sombra se desplaza más hacia el norte, se alarga más, porque la vemos desde otro ángulo. A partir de las mediciones del tránsito de Venus a lo largo del tiempo desde diferentes puntos de la Tierra y con ayuda de las leyes de Kepler, fue posible calcular la distancia de nuestro planeta al Sol. Una idea genial. Solo tenía una pega, y es que los tránsitos de Venus son rarezas astronómicas. Eso se debe principalmente a que los ejes de las órbitas de Venus y los de la Tierra están un poco inclinados uno respecto del otro. Aunque contemplado desde nuestro planeta, Venus esté en la misma dirección que el Sol, puede pasar por encima o por debajo del disco solar. Uno de sus tránsitos se produce tan solo dos veces cada 243 años. Los últimos que pudieron verse desde la Tierra ocurrieron en los años 2012 y 2004, los penúltimos tránsitos tuvieron lugar en 1874 y en 1882.

Cuando se daban todas las circunstancias, los investigadores no podían perderse bajo ningún concepto el tránsito de este planeta. Astrónomos de muchos países se ponían en camino a diferentes partes del mundo para seguir el paso de Venus desde todas las perspectivas posibles. En aquellos tiempos, ese tipo de iniciativas lo eran todo menos un juego infantil. Algunos fracasaban ya casi en casa: en Inglaterra, Jeremiah Horrocks estuvo a punto de perderse el tránsito de Venus del 4 de diciembre de 1639. Al principio esperó junto a su telescopio, que había enfocado al Sol, pero como Venus no se dejaba ver todavía, abandonó su puesto de observación y presumiblemente se fue a una misa. Cuando regresó a casa, llegó demasiado tarde. Hacía rato que el tránsito había comenzado, y Venus se hallaba ya delante del disco solar. Horrocks solo pudo calcular la duración del tránsito a ojo de buen cubero.

Por este motivo, los investigadores querían realizar observaciones más precisas para los siguientes tránsitos de Venus, en los años 1761 y 1769, y organizaron diferentes expediciones internacionales. Sin embargo, tampoco esta vez resultó fácil. El fracaso más espectacular lo experimentó Guillaume Le Gentil, quien quiso observar el tránsito desde la India. Cuando su barco arribó a su destino en Puducherry, en el sudeste del país, se topó con que los ingleses habían tomado la ciudad durante un conflicto bélico. El francés Le Gentil no tenía autorización para entrar, y por ello realizó las mediciones desde el barco. Sin embargo, las barcasas de madera, que se balancean, no son un buen lugar para mediciones astronómicas precisas; sus resultados fueron inservibles. Le Gentil decidió esperar ocho años hasta el siguiente tránsito, pero justo cuando se aproximaba el gran instante, el cielo se encapotó. La astronomía también requiere tener el clima de tu lado en el momento adecuado, y no todo el mundo tiene esa suerte. Cuando después de varios años, el francés regresó por fin a casa, cayó enfermo y casi muere de disentería. De vuelta en Francia, hacía ya mucho tiempo que su familia le había dado por muerto y había repartido sus propiedades. Incluso su puesto en la Academia Francesa de las Ciencias había sido asignado a otra persona.

De todas formas, la comunidad de investigadores ofreció finalmente un resultado útil de la distancia de la Tierra al Sol. El valor de la unidad astronómica fijada por aquel entonces solo se desvió alrededor del 1,5 por ciento del valor actual de 149 597 870 700 metros.

No fue hasta el año 1839 que el astrónomo alemán Friedrich Bessel consiguió determinar por primera vez la distancia exacta hasta la estrella 61 Cygni, con ayuda del paralaje y de la unidad astronómica. El

desplazamiento de esta estrella en el cielo, que Bessel midió en un periodo de seis meses, fue de tan solo 0,3 arcosegundos. Estos se corresponden con la anchura de un cabello desde una distancia de cincuenta metros. Valiéndose de un simple teorema trigonométrico y de la unidad astronómica pudo calcular la distancia hasta esa estrella: 107 850 000 000 000 de kilómetros, una distancia de 11,4 años luz. Bessel constató con asombro en una carta que la luz de la estrella que había medido llevaba más de una década viajando de camino a la Tierra. Fue con esta medición con la que quedó eliminada definitivamente la última objeción científica en contra de la visión heliocéntrica del universo.

Como casi todas las distancias en la astronomía dependen del paralaje, los expertos han introducido una unidad de longitud en su honor: el pársec. Esta palabra significa «segundo de paralaje» y corresponde a la distancia en la que una estrella mostraría un paralaje de un arcosegundo; unos 3,26 años luz. Así pues, el pársec no es una unidad de tiempo como nos hacen creer algunas películas de *La guerra de las galaxias*, sino una medida de longitud<sup>[33]</sup>.

Nuestra estrella vecina más cercana es Próxima Centauri, que está a una distancia de 4,2 años luz, es decir, a 1,3 pársecs. Así que no hay ninguna estrella a menos de un pársec del Sol. En la actualidad, gracias a la sonda espacial europea Gaia pueden medirse los paralajes de casi dos mil millones de estrellas en nuestra Vía Láctea hasta una distancia de varios millares de años luz. Con las redes globales de radiotelescopios esto se ha incrementado para algunas estrellas y nebulosas incluso más allá de los sesenta mil años luz, al otro lado de la Vía Láctea<sup>[34]</sup>.

Cuando hoy en día los satélites atraviesan el sistema solar con una seguridad casi intuitiva o cuando los astrónomos miden el cosmos, debemos estos éxitos también a las tempranas expediciones astronómicas de los siglos XVII, XVIII y XIX, que exploraron nuestro sistema solar con los primeros telescopios y con ideas audaces. Ninguno de los primeros astrónomos se puso en marcha a solas. El cielo nos pertenece a todos, y a veces se necesita a todo el mundo para estudiarlo y ampliar nuestros conocimientos. La colaboración y la competencia globales siempre han formado parte de la esencia de la astronomía. Desde los primeros astrólogos de Oriente en los tiempos bíblicos, pasando por la exploración del sistema solar y por las expediciones para observar el tránsito de Venus, hasta el intento de recibir ondas gravitatorias o imágenes de radio de los agujeros negros, los astrónomos siempre han estado unidos, se han abierto al universo y han competido entre sí para explorar y medir el cosmos.

## **SEGUNDA PARTE**

### **Los secretos del universo**

Un viaje a través del universo actual y de la historia de la astronomía y de la radioastronomía modernas: la revolución de la teoría de la relatividad, el nacimiento de las estrellas y de los agujeros negros, el misterio de los cuásares, el cosmos en expansión y el descubrimiento de la Gran Explosión

# 1

## El pensamiento más dichoso de Einstein

### LA LUZ Y EL TIEMPO

El Sol es la luz más intensa de nuestro cielo, y el tamaño del sistema solar es nuestra medida fundamental del universo. Contamos las distancias en el sistema solar en segundos luz hasta la Luna, en minutos luz hasta el Sol y en horas luz hasta los planetas exteriores. Sin embargo, muchos no saben que también en nuestra vida cotidiana medimos las distancias con luz. Hasta 1966, el «metro patrón» determinó la unidad de longitud. Consistía en una varilla de platino e iridio que fue depositada en París y que servía como medida de contraste. El metro patrón corresponde a la diezmillonésima fracción de la cuarta parte de la circunferencia de la Tierra a lo largo del meridiano que discurre desde el Polo Norte y que pasa por París. Así que nadie debe extrañarse de que, hasta el momento, los británicos se hayan negado en redondo a adoptar el sistema métrico. En la actualidad, el metro está definido por la velocidad de la luz y se corresponde justo con la longitud que recorre la luz en el vacío en la 299 792 458.<sup>a</sup> parte de un segundo. ¿Por qué se eligió esa cifra retorcida? Bueno, es exactamente el mismo metro patrón de París, pero ya no tiene trazas de orgullo nacional. Así pues, quien emplea una regla para medir, está midiendo en realidad en unidades de luz.

Sin embargo, en la actualidad también empleamos la luz para medir el tiempo, pues está compuesta por oscilaciones electromagnéticas. Así pues, la luz es una medida fundamental de todo, y esto es cierto en un sentido muy profundo. Einstein reflexionó sobre lo que significaba que la luz se moviera siempre a la misma velocidad, independientemente de lo rápido que uno mismo se desplazara. Este razonamiento pondría del revés todas nuestras ideas acerca de que el espacio y el tiempo eran invariables y absolutos.

Ahora bien, ¿cómo es posible que la luz sea siempre igual de rápida? Una hormiga que corre en un deportivo en marcha se mueve con mayor rapidez que una hormiga que camina simplemente a lo largo de la calzada. Lo que ocurre es que las velocidades del coche y de la hormiga se suman. ¿No debería suceder esto mismo en el caso de la luz? No, pues la luz no es ninguna hormiga, ningún coche, ninguna pelota de fútbol, ningún cohete espacial. La luz es energía pura, y no tiene masa inerte. La materia solo puede acelerarse con fuerza y energía. Ahora bien, cuanto más ligera es con mayor facilidad podrá ser acelerada. Cuesta menos acelerar a una hormiga que a un coche. La luz es tan «liviana» que no requiere siquiera que se le dé un empujoncito; la luz echa a volar por sí sola. En el espacio vacío se mantiene siempre a la máxima velocidad, esto es, casi exactamente a mil millones de kilómetros por hora.

Nada puede moverse a mayor velocidad que la luz, pues nada puede ser menos inerte. Incluso los cambios en la gravedad y las ondas gravitatorias resultantes se propagan «solo» a la velocidad de la luz. Lo que en su momento comenzó como tal, se ha convertido entretanto en la «velocidad de la causalidad». Cuando hablamos en este libro de «luz», solemos incluir también, tácitamente, otros procesos que transmiten informaciones en forma de ondas como la luz.

No obstante, algo tiene que cambiar cuando nos movemos con relación a la luz, ¿no? El tiempo y el espacio cambian, afirmó Einstein. ¿Existen el espacio y el tiempo independientemente de todo lo demás? Yo diría que no. Al revés de lo que sucede con la energía y con la materia, el espacio y el tiempo solo son magnitudes abstractas en una descripción del universo; no los podemos tocar. Finalmente se convierten en una realidad física que se mide<sup>[35]</sup>. Y eso se hace, en definitiva, con la luz u otras ondas comparables. La medida de la realidad en el cosmos y en la Tierra es la luz, que no solo mide, sino que también define el espacio y el tiempo.

Lo primero que se originó en la historia bíblica de la creación fue la luz, y solo así se creó el primer día. También en nuestra historia científica de la creación de hoy en día, la luz está al comienzo del tiempo: una bola de fuego de luz y de materia dio inicio al universo.

Ahora bien, ¿por qué es tan fundamental la luz? ¡El universo está compuesto también de materia! Sin embargo, si seguimos preguntando, descubrimos que en el nivel más profundo todo es luz y energía. La famosa fórmula de Einstein,

$$E = mc^2$$

significa que la energía ( $E$ ) es igual a la masa ( $m$ ) por la velocidad de la luz ( $c$ ) al cuadrado. Toda masa es también al mismo tiempo energía; toda energía es también masa. En principio hay otra variante para esa ecuación, a saber:

$$E = h\nu$$

donde la letra griega  $\nu$  (nu) es la frecuencia de la luz y  $h$  la constante de Planck, que traduce la luz en energía. Esta es la ecuación más simple de la teoría cuántica, cuyo fundador fue el físico alemán Max Planck. En las dimensiones más diminutas, por ejemplo en los átomos, la energía en forma de luz solo puede ser emitida o recibida en determinadas unidades de energía, los denominados «cuantos de luz».

Por tanto, la luz es también energía, que tanto más elevada es, cuanto más elevada es la frecuencia. La materia y la luz son energías y pueden transformarse la una en la otra.

Para terminar de rizar el rizo, Einstein averiguó que en el caso de las energías elevadas, la luz se comporta a veces como una partícula. Entonces hablamos de «fotones», paquetes de onda corta, en los que la luz continúa oscilando. Sin embargo, van zumbando por el espacio como paquetitos de luz.

De ahí que Newton y Maxwell tuvieran ambos razón: la luz es partícula y onda *a la vez*, dependiendo de lo que se busque. ¡La pregunta determina aquí la respuesta! En la actualidad sabemos que este dualismo onda-partícula también es válido para las partículas de materia más pequeñas: incluso estas pueden comportarse a veces como ondas.

Hasta las fuerzas de la vida cotidiana se aplican mediante la luz. Lo que mantiene unidos a los átomos y a las moléculas son las propiedades de la física cuántica y las fuerzas electromagnéticas, es decir, los mismos campos de fuerza de los que se compone la luz. En la teoría cuántica, todas esas fuerzas están mediadas por la transferencia de partículas de luz. Cuando nos tocamos o cuando golpeamos con un martillo en un clavo, también hay una transferencia al nivel más pequeño a través de las fuerzas electromagnéticas. Las ondas sonoras se propagan porque el gas es comprimido y una onda expansiva recorre el aire. Sin embargo, cuando las moléculas de aire se encuentran y se repelen en el gas, entonces transfieren de nuevo las partículas virtuales de luz más pequeñas. Al final, todo lo que sentimos, medimos, percibimos o transformamos provoca alguna propiedad de la luz. En el nivel

atómico, todos nuestros sentidos se basan en la transferencia de partículas de luz; no solo la vista, sino también el tacto, el olfato y el gusto. Por este motivo, ninguna información puede llegarnos nunca con mayor rapidez que a la velocidad de la luz.

En principio siempre medimos con luz, y para mí solo existe aquello que puedo medir. Un universo sin luz no existiría en absoluto. El espacio y el tiempo, la materia y los sentidos, todo eso, en el fondo, no es nada sin la luz<sup>[36]</sup>.

La importancia de medir en la definición de «realidad» es una comprensión que recorre toda la física del siglo xx. Aún hoy sigue siendo una revolución radical del pensamiento y determina la teoría de la relatividad tanto como la física cuántica, ya que también en esta solo cuando mido algo, ese algo adquiere realidad. Todo lo demás es interpretación y está muy cuestionada precisamente en la física cuántica, al igual que la pregunta acerca de lo que de verdad significa medir<sup>[37]</sup>. Este proceso abarca siempre aquellos en los que las partículas aplican fuerzas y se transfieren luz entre sí. Este pensamiento conduce a puntos de vista completamente nuevos. En la física cuántica, una partícula puede estar en todas partes con cierta probabilidad, hasta que es medida. En la oscuridad de la nada, todo es posible hasta que alguien hace brillar la luz en ella. «Medir» significa, por ejemplo, centrarse en la luz de un proceso cuántico. Dado que estamos trabajando a nivel atómico, el intento de medir las partículas significa siempre influir en ellas, transformarlas y asignarles un punto en el espacio mediante cuantos de luz. La medición no solo define la realidad, también la altera.

Erwin Schrödinger describió esto en su famosa paradoja. Para ello se imaginó un gato dentro de una caja de zapatos cerrada. Mientras nadie levante la tapa y mire, el gato está supuestamente muerto y vivo *a la vez*. La imagen de Schrödinger es, por supuesto, algo engañosa, pues el gato dentro de la caja de zapatos no es ningún objeto cuántico aislado. Sus partículas se transfieren sin cesar fotones virtuales entre ellas y con la base de la caja o el aire. Así pues, el gato es medido constantemente o se mide a sí mismo, lo cual establece su estado<sup>[38]</sup>. Esto no ocurre cuando levantamos la tapa, pero se trata tan solo de una idea, y dejamos aparte el hecho de que hoy en día nadie encerraría en una caja a un gato hasta morir, ni siquiera hipotéticamente. ¡Se metería en problemas con los animalistas, y con razón!

Un gato de verdad, o está muerto o está vivo, pero no ambas cosas a la vez. Ahora bien, si nuestro gato fuera un electrón solitario en el vacío, si estuviese muy lejos de otra materia, entonces esa afirmación sería cierta en



ese sentido. El electrón no estaría entonces aquí o allá, sino que con cierta probabilidad —a veces minúscula— estaría en todas partes del cosmos y en ninguna al mismo tiempo. Solo cuando el gato electrón es alcanzado por un rayo de luz, este lo fija a un lugar determinado, y justo entonces deja de encontrarse en todas partes del cosmos. Los electrones pueden pasar por dos puertas al mismo tiempo, a no ser que se instale una barrera de luz en ellas que mida su paso; en este caso solo pasarían por una.

Con esto destacamos de nuevo la asombrosa importancia de la luz, una importancia sin par. La luz crea realidad porque transmite información. Incluso el espacio y el tiempo se originan en la luz y en la materia; son conceptos abstractos que solo se vuelven reales cuando concebimos el tiempo o medimos el espacio. Sin reloj no hay tiempo; sin una regla no hay espacio. El «aparato» más elemental para medir el espacio-tiempo es la luz. Solo gracias a la mensurabilidad, el espacio adquiere propiedades físicas que describimos en modelos e ideas.

Ahora bien, si la luz se mueve siempre a la misma velocidad en relación con *cualquier* observador, entonces algo debe de cambiar para un observador, a saber: el espacio y el tiempo. Albert Einstein pudo demostrarlo por medio de sencillos experimentos mentales, y concluyó que el espacio y el tiempo no son dimensiones absolutas como las de Newton, que son fijas e inmutables, sino tan solo relativas. Lo único absoluto es la velocidad de la luz<sup>[39]</sup>.

Si, por ejemplo, un coche viene en dirección hacia mí, entonces el tiempo en el interior del vehículo parece transcurrir de diferente manera. Esto suena extraño, y lo es, sí, pero se vuelve inevitable si nos tomamos en serio la constante de la velocidad de la luz.

Reflexionemos acerca de la manera más básica de medir el tiempo. Los relojes de pulsera mecánicos marcan una frecuencia estable determinada por las características de una rueda dentada. Ese tictac regular del reloj mide el tiempo segundo a segundo. Solo tenemos que contar el número de tictacs y entonces sabemos cuánto tiempo ha transcurrido. Las manecillas tienen la amabilidad de contar por nosotros, de modo que no tenemos más que mirar relajadamente la esfera del reloj.

Este mismo principio vale también en última instancia para un reloj digital, solo que en este caso oscila un cristal. Sea lo que sea, al final, a nivel atómico se produce también una transmisión de energía a través de las fuerzas electromagnéticas: son intercambiados fotones virtuales. Incluso un reloj de arena está sometido a las fuerzas de la luz cuando las moléculas de la arena se

repelen mutuamente y tratan de abrirse paso por la fuerza a través del estrecho cuello de cristal.

De cara a la sencillez, construyamos un reloj de péndulo cuyo tictac no lo marque un peso, sino la luz entre dos espejos. Para una distancia fija de quince centímetros, la luz necesita alrededor de un nanosegundo, para ir y venir. Así pues, se cuentan mil millones de tictacs de luz por segundo. La frecuencia correspondiente se denomina «gigahercio» o, en forma abreviada, GHz. Un hercio equivale a una oscilación por segundo. Se bautizó esta unidad así en honor del profesor de física de Bonn, Heinrich Hertz, el primero en generar y medir las ondas electromagnéticas predichas por Maxwell.

Ahora viene el punto crucial. Primero, me siento en el coche con este «reloj de luz», y dispongo el aparato para que la luz que hay entre los espejos se mueva en vertical arriba y abajo. Segundo, si hay un policía parado en el arcén de la carretera y observa el coche con atención al pasar por su lado a una velocidad elevada, le parecerá que la luz se mueve ligeramente en diagonal, no completamente vertical arriba y abajo. El rastro de la luz se asemejaría a un patrón en zigzag. Esto podemos imaginárnoslo mejor si la luz corriera con tanta lentitud como una hormiga que pusiéramos en el coche para que avanzara verticalmente arriba y abajo. El policía la ve escalar hacia arriba y moverse a la vez con el coche hacia un lado; contemplado desde su posición, se mueve con relación a él con bastante inclinación y a una velocidad de lo lindo.

Las líneas oblicuas del movimiento de la hormiga y de la luz son, por supuesto, más largas que las líneas exactamente verticales. En ese mismo tiempo, la hormiga y la luz recorren una mayor distancia a ojos del policía, así que un guardián del orden despistado deduciría que la hormiga está viajando a una supervelocidad para su tamaño y, en el coche, mayor que la velocidad de la luz. A la hormiga se le concede eso, pero a la luz no, porque Albert Einstein y James Maxwell descartaron explícitamente ese «exceso de velocidad». Por tanto, un policía fiel a la ley debería ver el movimiento de la luz a la misma velocidad que el conductor, a pesar de que, desde su posición, la luz recorre una distancia mayor.

¿Cómo puede ser posible tal cosa? La única respuesta es: si desde la perspectiva del policía cambia la longitud que recorre la luz, también tiene que cambiar el tiempo para que la velocidad permanezca constante, pues la velocidad es igual a la longitud dividida por el tiempo. Si aparentemente la distancia recorrida cambia, el tiempo tiene que cambiar también. Por tanto, el

policía mide desde fuera un tiempo que en el coche transcurre un poco más lento.

Esto se denomina «dilatación relativista del tiempo» y contradice de una manera flagrante todas nuestras intuiciones. Estamos acostumbrados a que se pueda cambiar de velocidad. Si con el coche tengo que tomar un desvío y aun así quiero llegar a mi destino a la misma hora, tendré que conducir más rápido. Algunos actúan con irresponsabilidad y se arriesgan incluso a pagar una multa por exceso de velocidad. Esto no puede suceder con la luz porque esta simplemente cambia el tiempo; la luz define el tiempo. Todos nosotros tenemos que guiarnos por el tiempo, pero él se guía por la luz.

Todo esto suena increíblemente abstracto, igual que el reloj de luz en el coche. En la realidad ningún reloj funciona de diferente manera, ¿o sí? Para probar esto, los investigadores Joseph Hafele y Richard Keating volaron en el año 1971 por todo el mundo, una vez en el sentido de la rotación terrestre y otra vez en contra. A bordo tenían cuatro relojes atómicos de cesio de alta precisión, cuyos tiempos compararon posteriormente con los relojes atómicos que se habían quedado en tierra. ¿Funcionarían de manera diferente si volaban mucho y más rápido? El experimento era simple: recibieron prestados los relojes; lo más caro fueron los billetes de avión alrededor del mundo para los relojes, a los que llamaron «mister Clocks». Estos inusuales pasajeros permanecían en sus asientos con los cinturones de seguridad abrochados. A pesar de todo, puede que haya sido el experimento más barato de todos los tiempos para poner a prueba la teoría de la relatividad.

Y, en efecto, el experimento de Hafele y Keating demostró que los relojes que volaron hacia el este —es decir, en la dirección de rotación de la Tierra y con un pequeño movimiento en relación con los relojes de tierra— iban sesenta nanosegundos más lentos después del vuelo. Los relojes que volaron hacia el oeste —es decir, en contra de la dirección de rotación de la Tierra y con un gran movimiento en relación con los relojes de tierra— iban incluso doscientos setenta nanosegundos más rápidos que el reloj del laboratorio<sup>[40]</sup>. El experimento se repitió varias veces con posterioridad y confirmó de una manera impresionante determinados aspectos de la teoría de la relatividad.

Así pues, no podemos fiarnos del tiempo, pero luego están también las distancias que medimos, que no siempre son iguales porque las calculamos con luz. Si el coche pasa al policía a la velocidad de la luz, este podrá medir la longitud del coche con un cronómetro; puede calcularla a partir de la velocidad y del tiempo que el coche precisa para adelantarlo. Sin embargo, si el conductor tiene dos relojes perfectamente sincronizados en la parte

delantera y trasera del coche, y mide el tiempo que tarda en pasar junto al policía, entonces encuentra otra diferencia de tiempo debido a la dilatación del tiempo. El policía mide un intervalo temporal más corto que el conductor y, por consiguiente, también una distancia mucho más corta que las personas que van en el coche. Por tanto, al policía le parecería el coche demasiado estrecho para él, mientras que el conductor disfrutaría del ancho para sus piernas.

Así pues, tampoco debemos fiarnos ya del espacio cuando los objetos se mueven, pues las consecuencias son considerables aunque la gravedad entre en juego.

#### LA SEÑAL DE MERCURIO: UNA TEORÍA NUEVA DEL ESPACIO Y DEL TIEMPO

Hace algunos años me llamó por teléfono un periodista neerlandés que dudaba de los beneficios sociales de la investigación básica y que deseaba escribir un artículo al respecto. «¿Qué ganamos si medimos con exactitud la órbita de Mercurio?», fue su primera pregunta provocadora. Yo me quedé perplejo. «¿Se trata de una broma con cámara oculta? —repliqué en el acto y proseguí—: Precisamente Mercurio es el paradigma de una investigación aparentemente inútil que ha transformado los fundamentos de nuestra visión física del mundo y que ha hecho posible la creación de nuevos sectores industriales». Una empresa neerlandesa como TomTom, que vende dispositivos y programas de navegación, debe su facturación anual, de más de quinientos millones de euros, sobre todo a las meticulosas mediciones astronómicas de la órbita de Mercurio y a un empleado de la oficina de patentes llamado Albert Einstein que fue capaz de explicarlas. «¿Cómo puede mofarse nadie del pequeño Mercurio?».

Después de que Kepler y Newton comprendieran la perfecta belleza de las leyes de las órbitas planetarias, a estas se les despojó de la magia y del misterio en el siglo XIX. La astrología, que había mantenido despierto y en secreto el interés investigador en los planetas, solo se practicó posteriormente en círculos esotéricos, y ahora nuestro sistema planetario nos parece tan solo una materia simpática para la escuela primaria. El problema parecía resuelto, ¿o no? No, no estaba todo resuelto. Surgió un pequeño problema que volvía a

girar en torno a nuestro sistema solar, en el sentido literal de la expresión, y que demostraba lo importante que es medir con exactitud.

Desde Kepler sabemos que los planetas orbitan alrededor del Sol en trayectorias elípticas. Sin embargo, esto no es del todo cierto; en realidad parecen flores o, más exactamente, rosetones. Estas órbitas elípticas no son cerradas; cada elipse se mueve un poco más, de modo que ningún planeta está siempre más cerca del Sol en el mismo punto. A este efecto se le denomina «precesión del perihelio». El perihelio (que significa «alrededor del Sol») de la elipse es el punto más cercano al Sol en una trayectoria de precesión.

Los planetas no solo experimentan la fuerza gravitatoria del Sol, sino también la fuerza de atracción de todos los demás planetas. Con ayuda de la teoría clásica de la gravitación de Newton puede calcularse este efecto con toda precisión, pero en la práctica no es tan sencillo como parece, porque en un sistema así todos los planetas atraen a todos. Si los planetas y el Sol tuvieran la misma masa, todo el sistema nos tendría ocupadísimos; de vez en cuando, dos de ellos podrían atraer simultáneamente a otro y arrojarlo fuera del sistema solar. Nuestros planetas no necesitan tirar de un compañero celeste con especial virulencia para sacarlo de su rutina, basta con atraerlo ni más ni menos que al ritmo correcto.

Es como en un columpio infantil que cuelga de unas cuerdas largas del gran cerezo en el huerto. Un empujoncito en el momento adecuado y el niño o la niña comienza a balancearse. Sin embargo, si empujamos regularmente en el momento correcto, la pobre criatura saldrá volando en algún momento desde el columpio al huerto de los vecinos. De esta misma manera, entre los planetas que se mueven con regularidad alrededor del Sol pueden producirse resonancias que van ampliándose cada vez más.

Cuando hay más de dos columpios o planetas involucrados, la situación se vuelve del todo compleja. Porque puede probarse matemáticamente que no es posible resolver con exactitud el movimiento de tres cuerpos en un campo gravitatorio común, lo que lleva al caos en el sentido literal de la palabra. Cualquiera que haya estado en un parque infantil con niñas y niños pequeños conocerá muy bien esta situación y podrá confirmarlo. Así pues, no es de extrañar que el «problema de los tres cuerpos» haya ocupado desde hace siglos a muchos matemáticos y, como todo el mundo sabe, ha ofrecido a muchos autores y autoras de novelas de amor una abundancia infinita de materiales. Cuantos más cuerpos —planetas o estrellas— orbitan entre sí, tanto más caótica se vuelve la situación. Se puede demostrar incluso que, en

principio, no son posibles las predicciones a largo plazo sobre los cursos de las órbitas.

Sin embargo, la teoría del caos no es, ni de lejos, inútil. Ciertamente, no puede predecir el futuro, pero puede calcular el momento a partir del cual un sistema se vuelve impredecible. También nuestro sistema solar está al borde del caos. Por ejemplo, la escala temporal del caos, el denominado «tiempo de Liapunov», se utiliza para calcular las órbitas planetarias para un periodo de entre cinco y diez millones de años<sup>[41]</sup>. Cambios extremadamente pequeños transformar por completo el futuro. El lugar exacto en el que se hallará la órbita de la Tierra dentro de más de diez millones de años quizá dependerá de dónde tosa una hormiga en la actualidad.

Cuando se formó nuestro sistema solar reinaba un caos mucho mayor que en nuestros días. En aquellos tiempos primigenios este estaba repleto de planetoides y planetas menores, que gradualmente fueron lanzados de un lado a otro y, en ocasiones, fueron arrojados incluso fuera del sistema solar debido al efecto columpio. A través de las interacciones recíprocas, los grandes planetas comenzaron a moverse hacia el disco exterior o interior. Si seguimos el modelo de Niza de mi colega Alessandro Morbidelli y sus colaboradores, Urano y Neptuno podrían incluso haber intercambiado sus posiciones. No todo en nuestro sistema solar ha sido siempre como es en la actualidad, ni mucho menos. Los planetas menores que han quedado son valientes supervivientes de una fase caótica de acoso que se prolongó durante más de mil millones de años.

Uno de estos planetoides restantes, que figura con el número 12 654 en el catálogo de planetas menores de la Unión Astronómica Internacional, se llama Heinofalcke desde 2019, dicho sea de paso, y discurre en una órbita bastante excéntrica alrededor del Sol. «Eso encaja contigo», afirmó mi antiguo jefe<sup>[42]</sup>. «Probablemente le acosaron en épocas tempranas igual que a mí y, sin embargo, no ha dejado que lo saquen de su órbita», repliqué yo.

La teoría del caos no solo es válida para nuestro sistema solar, sino para muchos otros sistemas, y establece un límite fundamental a nuestra anticipación. Sin embargo, esto no significa que no exista nada impredecible en absoluto. Desde un punto de vista estadístico podemos hacer, por ejemplo, que los ordenadores calculen cómo evolucionará la cantidad total de asteroides durante largos periodos. Solo que, por desgracia, a partir de los datos obtenidos, no se podrá determinar con exactitud dónde se encontrará el asteroide Heinofalcke. Yo espero y ruego fervientemente que su órbita no termine algún día cruzándose con la Tierra. Sería muy desagradable para mí

tener que escuchar en un momento dado en las noticias que Heinofalcke acaba de destruir Nueva York.

Ahora bien, por suerte, nuestro sistema solar parece haber alcanzado algo de sosiego, y todos los planetas parecen haber encontrado un lugar más o menos estable. En un futuro próximo no hay que temer que alguno de ellos pueda abandonar el sistema solar, incluso el pequeño Mercurio parece ser lo suficientemente resistente frente a los ataques gravitatorios de los grandes planetas, justo porque se ha instalado con toda comodidad cerca del potente Sol.

La atracción alternada de los planetas entre sí se considera matemáticamente como una perturbación menor y se puede calcular. En ese proceso, las órbitas elípticas se desplazan poco a poco una contra otra, de modo que la precesión del perihelio puede ser predicha con exactitud en un margen determinado. En los pocos siglos de los que disponemos de medidas, el porcentaje caótico del movimiento debería ser imperceptible. Estos cálculos de la teoría de perturbaciones fueron un gran éxito de la mecánica celeste y condujeron en el año 1846 al descubrimiento de Neptuno<sup>[43]</sup>.

Trasladémonos por unos instantes al siglo XIX. Los astrónomos habían explicado con detalle todas las órbitas planetarias. ¿Todas? No. Un pequeño planeta irreductible no dejaba de resistirse y de desconcertar a los investigadores. Si calculamos las influencias de todos los planetas, entonces el eje de la órbita elíptica de Mercurio debería rotar unos 5,32 arcosegundos por año, pero en realidad rota unos 5,74 arcosegundos por año, es decir, con una desviación anual de 0,42 arcosegundos.

Hay que tener claro lo diminuta que es esa diferencia. Si cortamos la tarta de cumpleaños en doce trozos, cada uno de ellos tendrá una apertura angular de treinta grados. Cada porción puede dividirse entonces en mil ochocientos pedazos de un arcominuto cada uno. Y cada uno de estos arcominutos puede subdividirse a su vez en sesenta arcosegundos. Si cometiéramos un error de 0,4 arcosegundos, entonces en una tarta de treinta centímetros de diámetro habríamos cortado un trozo de más, y sería trescientas veces más pequeño que un cabello humano.

Hay que ser verdaderamente un gran pedante para encontrar un pelo en la sopa de la física con una desviación tan pequeña, pero una diferencia tan mínima se va sumando a lo largo del tiempo, y a los físicos esto los perturba en lo más profundo. Si los resultados de las mediciones de Mercurio no coinciden con la teoría, o bien no se realizaron las mediciones con exactitud,

o bien la teoría ya no es correcta. ¿Se había pasado por alto alguna pequeñez? Bien, de acuerdo, pero cuál, dónde y por qué.

Durante mucho tiempo se consideró que un misterioso planeta no descubierto en las inmediaciones del Sol era el culpable de esa debacle. Los astrónomos tenían ya un nombre para él, lo llamaron Vulcano, y sus moradores eran los vulcanianos. Sin embargo, tal hipótesis acabó en la sección de ciencia ficción, porque un joven empleado de patentes de segunda clase<sup>[44]</sup> en Berna tuvo una idea del todo nueva, revolucionaria.

## EL ESPACIO ES TAMBIÉN SOLO UNA SÁBANA

A comienzos del siglo xx, Einstein puso literalmente patas arriba nuestra idea acerca del espacio y del tiempo, e integró la física clásica en su nueva teoría de la relatividad<sup>[45]</sup>. No era, para nada, un genio solitario que consiguió el éxito, sino un bohemio sociable y un intelectual de salón.

En 1896 comenzó sus estudios en la Escuela Politécnica Federal de Zurich junto con Mileva Maric<sup>[46]</sup>. Esta joven física parecía a la par de Einstein e incluso era superior a él en física experimental. Se casaron cuando Albert obtuvo su primer puesto de trabajo. Permanecían horas sentados juntos debatiendo y leyendo libros de filosofía. Probablemente Mileva y Albert escribieron también juntos sus primeros artículos, pero solo aparecía él como autor.

¿Se echó a un lado Mileva para aumentar las oportunidades de Albert de labrarse una carrera? Algunos opinan que conforme a los estándares actuales, Mileva habría tenido que ser nombrada coautora de los artículos. «Necesito a mi esposa, ella soluciona todos mis problemas matemáticos», se cita a Albert en la etapa temprana de sus trabajos. Puede que Mileva se centrara principalmente en su futuro en común. A la pregunta de por qué faltaba el nombre de ella junto al de Albert en una solicitud de patente desarrollada en común, contestó ella: «Los dos no somos más que “Ein-Stein” [“una-pieza”]». En aquella época era ciertamente mucho más complicado, cuando no imposible, hacerse respetar en la física como mujer. Sigue siendo controvertido en la actualidad entre los historiadores el porcentaje de su contribución científica en las ideas de Einstein. Las fuentes no son inequívocas. Einstein mantenía correspondencia escrita con muchos físicos,



pero los pensamientos que se debatían en privado en la mesa de la cocina no se encuentran todos en los archivos.

Einstein obtuvo su primer empleo después de la universidad a través del padre de su compañero de estudios Marcel Grossmann en la entretanto legendaria oficina de patentes de Berna. En 1905, un año maravilloso para Einstein, aparecieron cinco artículos pioneros. Por el trabajo conjunto del matrimonio sobre la naturaleza de la luz, el descubrimiento del efecto fotoeléctrico, concedieron el Premio Nobel a Albert en el año 1921. Otro estudio exponía que la masa y la energía son equivalentes; la ecuación  $E = mc^2$  puede que sea hasta el momento la fórmula de la física más conocida en el mundo. Finalmente, apareció también en 1905 el artículo sobre la teoría especial de la relatividad, en el que Einstein demostraba que el tiempo y el espacio son relativos y cambian dependiendo de la velocidad relativa del observador. Sin embargo, el físico no había acabado su labor.

Antes de que llegara la gran época de Einstein, su denominada «contracción relativista de la longitud» ya había cuestionado el espacio absoluto tal como predice la teoría de la relatividad. El segundo paso comenzó con Newton, un cubo giratorio y un tiovivo dando vueltas. El físico británico había reflexionado en su día sobre la extraña propiedad de un cubo al girar. Einstein continuó considerándolo y constató que la relación entre la circunferencia y el diámetro de un círculo que gira debía depender de la ubicación del observador a causa de la contracción de la longitud.

Tomemos un tiovivo de feria con un eje en el centro y muchos niños y niñas montados en coches de policía, cohetes espaciales o caballitos de madera fijados a una plataforma giratoria. Si alguno de los que esperan en la cola midiera con una cinta métrica la circunferencia y el diámetro del tiovivo, entonces averiguaría que la relación entre la circunferencia y el diámetro es el famoso número  $\pi$  (pi) del círculo.

Ahora bien, si la niña que está sentada en el cohete espacial del tiovivo y dando vueltas midiera con una cinta métrica la circunferencia, el niño que está parado en la cola de la caja supondría que la circunferencia es más pequeña. A él le parecería más corta la cinta métrica a causa de la contracción relativista de la longitud. Sin embargo, estas longitudes aparentes dependen de la dirección del movimiento. La circunferencia del tiovivo, medida según la dirección del movimiento, parece más corta, no así el diámetro, que es medido perpendicularmente. La relación entre la circunferencia y el diámetro ya no es  $\pi$ . ¡Esto es sorprendente! Los círculos normales no se comportan así: la longitud de su circunferencia es siempre  $\pi$  por el diámetro.

Esto es válido, en todo caso, para los círculos del cuaderno de ejercicios de la escuela; pues el espacio en el que dibujamos es plano. Sin embargo, esto cambia en el momento en que contemplamos superficies curvas. Los niños y las niñas podrían pintar un gran círculo en el centro de una sábana tensada. Si la sujetan por los cuatro extremos y la elevan conjuntamente, el plano bidimensional se combará. El plano del espacio será curvo, y la geometría del círculo se transformará: la longitud de la circunferencia seguirá siendo más o menos la misma, pero el diámetro será más largo si lo medimos a lo largo del plano de la sábana. La relación de la circunferencia con el diámetro en espacios curvos ya no sería exactamente  $\pi$ . Lo importante aquí es tan solo que se trate de una sábana bajera ajustable, ¡pues solo una de ese tipo puede desfigurarse de verdad!

Aún somos capaces de imaginar una sábana curva, pero el espacio es tridimensional en realidad. Esto complica las cosas y las hace difíciles de imaginar. ¿Pueden ser también curvas las tres dimensiones? Nuestro cerebro no puede imaginarse un espacio tridimensional curvo. Ahora bien, ¿podrían describirlo tal vez las matemáticas? Con el paso del tiempo, Einstein comprendió que se necesitaban incluso cuatro dimensiones, pues el tiempo desempeña asimismo un papel decisivo en la teoría de la relatividad.

Las herramientas matemáticas para una descripción semejante del espacio curvo no se desarrollaron precisamente hasta el siglo XIX. Los espacios curvos tetradimensionales se describen a través de tensores: tablas de números que se componen, por ejemplo, de cuatro por cuatro, es decir, dieciséis entradas. Cada columna o línea representa una dimensión del espacio y con los tensores se pueden hacer cálculos igual que con los números simples, es decir, se puede sumar, multiplicar, restar..., pero solo si se sabe cómo funciona.

En aquella época solo eran unos pocos los expertos que se habían ocupado de este asunto. Tenían nombres tan prestigiosos como Riemann, Ricci-Curbastro, Levi-Civita, Christoffel y Minkowski, y en la actualidad figuran en los libros de texto de las matemáticas superiores. Excepto Riemann, todos los demás matemáticos citados eran contemporáneos de Einstein. Estas matemáticas eran completamente nuevas y demasiado complejas para el alemán, que dijo: «He adquirido un enorme respeto por las matemáticas, cuyas partes más sutiles había considerado hasta ahora, en mi ignorancia, como un lujo».

Nadie investiga completamente a solas y tan solo para sí mismo. Por suerte estaba allí también Marcel, su antiguo compañero de estudios.

«Grossmann, tienes que ayudarme o me volveré loco», escribió Einstein cuando ya era profesor universitario.

A Einstein y a Grossmann se les exhortó a que describieran las ecuaciones físicas de manera que funcionaran en los espacios curvos. Inspirado por los trabajos de Ernst Mach, un físico y filósofo, a quien conocemos como homónimo de la velocidad supersónica, Einstein estaba convencido de que las leyes naturales debían tener la misma forma en todas partes, independientemente de si se está de picnic en el parque, en el caballito de un tióvivo o en un cohete espacial en el universo.

A primera vista, esperar una validez universal de las leyes físicas parece obvio, pero permitió a Einstein juntar la naturaleza del espacio, del tiempo y de la gravedad en una teoría universal, esto es, en la teoría general de la relatividad de 1915.

La inspiración decisiva le vino a Einstein cuando todavía trabajaba en la oficina de patentes de Berna. Dejemos a un lado su motivación como empleado de una oficina de patentes, pero es evidente que ese trabajo le proporcionaba suficiente tiempo para reflexionar. Esa chispa creativa sentó los cimientos para la teoría que en la actualidad describe el universo en expansión con la misma fiabilidad que la fuerza de atracción de los agujeros negros o el temblor del espaciotiempo por las ondas gravitatorias.

«Fue el pensamiento más dichoso de mi vida», diría Einstein posteriormente. La idea decisiva era que, en principio, no puede distinguirse la gravedad de una aceleración normal. «Si un hombre salta por una ventana con los ojos cerrados, en ese momento no puede distinguir si flota en el espacio o si está en caída libre, por lo menos hasta el momento del golpe». Einstein debió de pensar de una forma similar<sup>[47]</sup>. Tal vez se planteó en aquel momento: si se cerrara la ventana, un hombre podría imaginarse flotando en un ascensor en el espacio. Como el ascensor se halla en aceleración continua, se vería presionado contra la silla. Pero ¿cómo saber si la fuerza que lo mantiene en la silla procede de la fuerza de atracción de la Tierra o de la aceleración del ascensor? ¡No podría distinguirlo<sup>[48]</sup>!

No es posible distinguir localmente la gravedad de cualquier otra aceleración. Este principio se conoce hoy en día como «principio de equivalencia de Einstein». Se trata de una suposición básica, no de una prueba. Es un principio, un dogma que debe interpretarse y probarse con experimentos una y otra vez<sup>[49]</sup>.

En la conclusión inversa, este principio significa que incluso cuando estás sentado sin moverte en una silla, estás al mismo tiempo en aceleración. ¡La

sensación es exactamente la misma! Incluso cuando estamos sentados y relajados, tienen que ser válidas por fuerza las mismas leyes de la relatividad que dentro de un ascensor en aceleración o de un cohete espacial, esas leyes que enuncian que el espacio durante un movimiento acelerado parece curvarse como una sábana.

Sin embargo, como Einstein no podía distinguir si se encontraba sentado en un ascensor decorado como una oficina de patentes o en una verdadera oficina de patentes dentro del campo gravitatorio terrestre, la Tierra tenía que ser capaz de curvar también el espacio solo mediante la gravedad de su masa. ¡Y, en efecto, resulta que la gravedad no solo curva el espacio, sino también el tiempo! El espacio y el tiempo han de pensarse juntos.

La conclusión es radical: la gravedad no es ninguna fuerza, sino que tiene su expresión mucho más en la geometría del espacio-tiempo. Dado que todavía no podemos pensar en espacios tetradimensionales curvos, imaginémonos de nuevo el espacio-tiempo como una sábana tensada. Si no hay nada ni nadie encima, está lisa y plana. Pero si colocamos una bola de bolera en el centro, entonces esta la hundirá. Si ahora ponemos una bola de billar cerca del borde de la sábana, esta causará una abolladura más pequeña y comenzará a rodar hacia la bola de bolera. En realidad, ambas se deslizan la una hacia la otra: la bola de billar muy rápida y la bola de bolera solo un poquito. Cuanto más cerca están, tanto más rápidamente se mueven la una hacia la otra, porque la abolladura se hace más pronunciada. Así pues, la curvatura de la tela se corresponde con la fuerza de atracción.

Si ahora lanzamos una canica sobre la sábana, esta se moverá en órbitas elípticas cada vez más pequeñas alrededor de la abolladura de la bola de bolera. En una sábana plana se movería simplemente en línea recta; en un espacio curvo realiza un recorrido también curvo. A causa de la fricción de la sábana, la canica pierde pronto velocidad y se acerca cada vez más y más a la gruesa bola de bolera, por lo que cae en el hueco en el que se encuentra esta. Sin fricción en la sábana, la canica seguiría moviéndose siempre, exactamente igual que los planetas trazan sus órbitas elípticas en torno al Sol sin ser perturbados desde hace mucho tiempo.

Desde la primera idea hasta una formulación contundente de la teoría general de la relatividad, que luego incluyó también la gravedad, Einstein necesitó ocho años, de 1907 a 1915, y muchas conversaciones, cartas y debates. Entretanto creyó haber hallado una teoría concluyente de la gravedad, pero pronto rechazó esos ensayos de nuevo. No fue sino a finales del año 1915 cuando consiguió formular una teoría completa y coherente.

Einstein estaba convencido de haber encontrado entonces la respuesta correcta.

Se sintió casi redimido después de calcular con su teoría la precesión anómala de Mercurio. Y, en efecto, ella explicaba por fin esa desviación mínima que no se había entendido durante mucho tiempo. Las abolladuras del espacio-tiempo en la sábana inconmensurablemente grande en torno al Sol hacían que la longitud de la circunferencia pareciera más corta; Mercurio recorría su elipse un poco más deprisa de lo esperado. Einstein estuvo «durante algunos días fuera de sí por la alegría» y le entraron palpitaciones. Newton estaba tocado, pero no hundido todavía.

El hecho de que una teoría nueva parezca razonable y coherente no es suficiente en absoluto. Cada una tiene que demostrarse también con experimentos y aplicarse a la vida. El principio es el mismo que en las canonizaciones en la Iglesia católica. Después de su defunción, la prospectiva santa o el prospectivo santo debe demostrar que es merecedor de ese honor realizando no uno, sino dos milagros desde el más allá. Un único milagro solo alcanza para una beatificación.

El primer hecho milagroso por el que Einstein pudo ser beatificado fue su explicación de la precesión anómala de Mercurio mediante la teoría general de la relatividad. Sin embargo, todavía quedaba pendiente la canonización de su teoría. Su siguiente milagro tuvo que ver de nuevo con las propiedades de la luz.

#### EXPEDICIÓN A LA OSCURIDAD

La vista no posee una importancia fundamental solo para nosotros, los seres humanos, sino también para la ciencia. A través del sentido de la vista podemos orientarnos y convencernos o no de un hecho. La vista hace particularmente experimentable y perceptible a la astronomía. La mayoría de nosotros tenemos que ver primero antes de creer: «ver es creer», se dice con razón.

Aunque la vista no funciona sin luz, también se precisa de la oscuridad para poder reconocer mejor la esencia de todo. Y así fue también en una expedición para observar un eclipse de sol, probablemente el más famoso de la física moderna, ocurrido el 29 de mayo de 1919. Con ese viaje de

exploración, el físico Arthur Eddington pretendía probar la teoría general de la relatividad de Einstein<sup>[50]</sup>. Quería demostrar que, en efecto, el Sol desvía la luz de las estrellas. Es particularmente digno de mencionar el hecho de que Eddington era británico y que ayudó al alemán Albert Einstein a alcanzar la fama mundial. Esto no era algo natural ni mucho menos en aquellos años, pues unos pocos meses después de la Primera Guerra Mundial y tras años de hostilidades entre los Aliados y el Imperio alemán, esa expedición demostró una valentía extraordinaria y fue realmente destacable para la historia de la física.

Según la teoría general de la relatividad, la masa del Sol curva el espacio-tiempo alrededor de sí mismo, de modo que el Sol desvía la luz de los cuerpos celestes que se encuentran detrás de él<sup>[51]</sup>. Puede parecer una locura, pero las estrellas que están cerca del Sol, contempladas desde de la Tierra, producen un efecto de desplazamiento mínimo. La teoría de Einstein era matemáticamente perfecta, pero ¿resistiría también un examen experimental? Para responder a esta pregunta, los astrónomos necesitaban un eclipse total de sol, porque de día no vemos ninguna estrella; aunque, por contrario, de noche no vemos el Sol.

Eddington se embarcó en el año 1919; pretendía medir la desviación de la luz, tal como predecía la teoría de Einstein, en la isla volcánica de Príncipe situada frente a la costa occidental de África. Frank Watson Dyson, el astrónomo de la corte británica que había organizado la expedición con Eddington, envió un segundo equipo a Brasil. El Sol, en aquel mes de mayo, estaba rodeado por las Híades, un cúmulo estelar; las condiciones eran casi perfectas. Eddington, seguidor de la teoría de Einstein y además un brillante matemático, se frotó las manos.

El Sol iba a estar más de cinco minutos a la sombra de la Luna. Sin embargo, la mañana del día decisivo comenzó a llover. Eddington se puso nervioso. En el mar y detrás de un telescopio, todos estamos en las manos de Dios, al menos en lo que se refiere al clima. Pero de repente, poco antes del comienzo del eclipse de sol, ¡se despejaron las nubes! Era ahora o nunca: con los nervios del momento quedaron impresionadas a la luz dieciséis placas fotográficas, de las cuales tan solo dos contendrían posteriormente datos útiles. Los investigadores ya habían sacado una foto de referencia antes de emprender su viaje. Entretanto, la intensa radiación solar había deformado la carcasa metálica del telescopio de los colegas en Brasil.

Tras su regreso a casa, los científicos estuvieron analizando los datos durante meses. Y entonces llegó el momento culminante: las estrellas

aparecían desplazadas, en efecto, en las placas fotográficas, justo dos centésimas de milímetro. Teniendo en cuenta la desviación del error de medición, ese resultado encajaba exactamente con las predicciones matemáticas de Einstein. Así pues, era cierto que la gravedad curvaba la luz y podía mover la posición aparente de los objetos.

«¡La teoría de Einstein triunfa! Las luces en el cielo están todas movidas», fue el titular del *New York Times*. Estas mediciones se convirtieron en el segundo milagro de la gran teoría de Einstein y lo catapultaron de golpe a estrella de la ciencia. Ambas expediciones son todavía un ejemplo paradigmático de la interacción perfecta entre la teoría y la práctica. Tras la Primera Guerra Mundial, esta colaboración transnacional fue una señal clara no solo para la comunidad científica internacional; después de las turbulencias de la guerra fue un primer momento de alegría y de fascinación comunes que compartieron amigos y enemigos.

Sorprendentemente, Dyson ya había fotografiado en el año 1900 un eclipse de sol idéntico por completo, y en sus placas fotográficas pueden verse incluso las estrellas. Ahora bien, cuando se analizaron esos datos en aquel entonces, se andaba a la búsqueda del misterioso planeta Vulcano y nadie prestó atención a las estrellas ligeramente desplazadas. Así pues, la parte decisiva de la respuesta permanecía guardada desde hacía años en los archivos. Y esto, además, algunos años antes de que Einstein formulara la teoría de la relatividad especial y la teoría general de la relatividad. ¡Resulta muy importante disponer de una teoría convincente y formular las preguntas adecuadas!

Esa expedición fue todo un éxito para Eddington y aún en mayor medida para Einstein. Cuando el británico presentó sus resultados en el mes de noviembre de 1919 en Londres, la teoría general de la relatividad todavía no tenía muchos adeptos. A muchos físicos de avanzada edad el pipiolo de Einstein les infundía poca confianza, y otros tantos no estaban capacitados para seguir sus pensamientos. Eddington estaba considerado uno de los pocos capaces de tal cosa. Se dice que cuando le preguntaron si era cierto que solo había tres seres humanos que comprendieran la teoría de Einstein contestó: «¿Y quién es el tercero?».

Las observaciones astronómicas hicieron que la teoría de Einstein fuera presentable y en la vida cotidiana nos beneficiamos todavía hoy de sus resultados. Otra predicción de la teoría es que también el tiempo cambia a través de la curvatura del espacio-tiempo. Formulado de una manera simple, si la luz se desplaza en un espacio curvo, entonces tiene que recorrer una

distancia mayor, pero si su velocidad es constante, entonces el tiempo tiene que alargarse también. Las ondas luminosas se espacian y marcan un ritmo más lento. El tiempo corre más despacio en la Tierra que en el espacio.

Cuando fueron lanzados al espacio los primeros satélites del Sistema estadounidense de Posicionamiento Global (GPS) en el año 1977, se pensó que revolucionarían la navegación en la Tierra. A bordo llevaban relojes de fina precisión, cuyas señales de tiempo eran enviadas por radio hacia la superficie terrestre. Durante la planificación del proyecto, los físicos advirtieron a los desarrolladores que, según Einstein, los relojes del espacio funcionarían más rápido porque la Tierra curva el espacio-tiempo.

Los ingenieros incorporaron con algunas reticencias esa corrección, pero no se fiaban del todo del asunto. Cuando lanzaron los satélites al espacio, desactivaron esa corrección del tiempo. Pronto se demostró que los relojes se adelantaban treinta y nueve millonésimas de segundo cada día<sup>[52]</sup>. Desde entonces, los relojes funcionan conscientemente un poco más despacio a causa de las correcciones de la teoría general de la relatividad. En la Tierra funcionan mal, pero tan pronto como están en su órbita, funcionan correctamente, y todos nosotros nos aprovechamos de ello<sup>[53]</sup>.

Los relojes ópticos son en la actualidad tan precisos que no es necesario transportarlos al espacio para registrar las diminutas diferencias en el espacio-tiempo curvo de la Tierra. Basta con elevarlos diez centímetros para que registren una aceleración del tiempo en relación con un reloj de referencia en el suelo<sup>[54]</sup>.

La corrección del tiempo en la superficie de la Tierra es tan solo mínima y, no obstante, posee una importancia tecnológica. Todos estos efectos nombrados resultarían aún más extremos si se aplicara más masa en un espacio mucho más pequeño y se intensificara la curvatura del espacio. En el borde de los agujeros negros, el tiempo parece detenerse. Para generar esta curvatura se requieren unas fuerzas enormes, fuerzas estelares.



## 2

# La Vía Láctea y sus estrellas

### LA VIDA SECRETA DE LAS ESTRELLAS

A todos nos parecen siempre iguales los procesos que acaecen en el cielo estrellado. Sin embargo, las apariencias engañan. No son iguales. Las estrellas cambian en intervalos muy largos de tiempo; llevan una vida propia, casi podría hablarse de una biografía de las estrellas.

Las estrellas nacen y mueren, surgen del polvo y se convierten de nuevo en polvo. Igual que las plantas y los animales en la Tierra, se encuentran en un ciclo continuo de desarrollo y de muerte. Cuando mueren y expulsan sus envolturas externas de nuevo al espacio, propician así el nacimiento de las estrellas jóvenes. En esa agonía estelar, el gas y el polvo son lanzados al espacio y se acumulan allí en gigantescas nubes que son enriquecidas por las cenizas de estrellas activas. Esta mezcla química genera el caldo de cultivo para nuevas estrellas y planetas.

Semejantes nubes interestelares de gas y de polvo, que pueden alcanzar diámetros de entre diez y centenares de años luz, puede que sean las formaciones más bellas del espacio. Una mirada profunda a nuestra Vía Láctea revela cuántas nebulosas hay. Extrañas acumulaciones o nubes gigantescas brillan con claridad, o bien se desplazan como sombras negras ante la luz de la Vía Láctea. Con sus poderosos brazos espirales, nuestra galaxia las va acumulando como hacen las máquinas quitanieves con la nieve virgen. Cuando contemplamos estas formaciones con el telescopio, se nos revelan estas fantásticas obras de arte cósmicas del universo.

Tan solo a mil trescientos años luz de distancia de nosotros se despliega la nebulosa de Orión, una de las más bellas de nuestra Vía Láctea. Esta es la única nebulosa brillante que podemos contemplar a simple vista si se dan las

condiciones adecuadas. Para las estrellas jóvenes y candentes, la nebulosa de Orión es una única y gigantesca sala de partos, envuelta por velos neblinosos y brillantes. La mayoría de las veces brilla con colores que van del rojo al rosa, y en algunos puntos con una tonalidad azulada, ofreciendo un aspecto un poco cursi. Su núcleo permanece oculto al ojo humano porque el polvo se traga toda luz visible procedente de su interior. Los astrónomos logran penetrar a través de estas barreras de polvo empleando longitudes de onda larga, y obtienen así una representación del centro de tales nebulosas. La radiación térmica infrarroja del gas caliente, por ejemplo, avanza con bastante libertad hacia el exterior, exactamente igual que las ondas de radio. Así como los rayos X atraviesan el cuerpo humano, esos rayos pueden penetrar en las nubes de gas molecular.

Y así como los elementos calientes en los gases o en la superficie de las estrellas emiten un código único para determinados colores de la luz, las moléculas emiten también el suyo propio en las nubes de polvo<sup>[55]</sup>. Especialmente la onda de radio de alta frecuencia está repleta de tales líneas. La longitud de onda de esta radiación es de tan solo unos pocos milímetros, o incluso más corta. Conocemos estas ondas en nuestra vida cotidiana sobre todo por los modernos escáneres de pasajeros en los aeropuertos.

Por suerte, es posible medir en la Tierra la radiación de las nebulosas. En los últimos cuarenta años se han construido radiotelescopios en todo el mundo para observar el comportamiento de tales moléculas en el cosmos. A 2550 metros de altura en la meseta de Bure de los Alpes franceses se encuentra el mayor interferómetro del hemisferio norte. Los once platos de antena de 15 metros y color plateado del telescopio IRAM-NOEMA destellan en la cresta de la montaña cubierta de nieve. El mayor complejo de este tipo en todo el mundo es el Atacama Large Millimeter Array (ALMA), en Chile. Este telescopio se compone de 66 platos de antena, la mayoría de los cuales posee un diámetro de 12 metros. Operado conjuntamente por europeos, americanos y japoneses, este telescopio se halla a 5000 metros de altura en un emplazamiento que disfruta de un viento extremadamente débil y seco porque, de lo contrario, las pequeñas ondas de radio de la atmósfera húmeda serían absorbidas con demasiada intensidad en altitudes inferiores. Son precisamente estos radiotelescopios los que desempeñan un papel decisivo también en la representación gráfica de los agujeros negros.

Pero regresemos al espacio, al nacimiento de las estrellas y de las nebulosas de gas. Estas nos sugieren un lugar mágico de un mundo lejano. Los astros jóvenes parecen originarse como por arte de magia en el interior de

esas nebulosas. Como es natural, no se trata de ninguna magia, sino de las fascinantes ciencias naturales. Las nebulosas están compuestas de hidrógeno en su mayor parte. Este elemento, el más ligero de todos, es el componente decisivo del fulgor cósmico y del nacimiento de las estrellas. En la Tierra, las pequeñas nubes interestelares se disipan con rapidez, pero en el espacio se aglomeran masas de gas muchísimo más grandes. Se mantienen unidas debido a su fuerza gravitatoria y se vuelven cada vez más densas. Lo que sucede exactamente antes del nacimiento de una estrella está descrito en la «inestabilidad de Jeans», denominada así por el astrónomo británico James Jeans. En una nebulosa semejante, la fuerza gravitatoria y la presión del gas están siempre en equilibrio. Sin embargo, diferentes factores pueden anular este equilibrio, según hizo entender Jeans. Si se supera un determinado punto crítico de la «masa de Jeans», la nebulosa se vuelve inestable: como si estuviese embarazada, dará a luz nuevas estrellas.

En ocasiones, basta una pequeña compresión, y la nebulosa se va condensando cada vez más bajo el influjo de su propia fuerza gravitatoria en el transcurso de millones de años. La temperatura se incrementa entrecortadamente desde unos doscientos sesenta grados Celsius iniciales bajo cero hasta más de cien grados sobre cero. Es entonces cuando las moléculas que han sido calentadas en la nebulosa irradian y liberan energía.

Si el gas se halla a algunos miles de grados de temperatura, las moléculas y los átomos revientan, la presión baja y la estructura implosiona de repente. La nebulosa colapsa y se descompone en pequeños fragmentos. Este proceso es muy rápido, al menos contemplado a una escala cósmica; no tarda ni treinta mil años en ver la luz del espacio una pequeña protoestrella, cuando irradia una luz cálida y rojiza. Hasta convertirse en una estrella joven, tendrá que esperar treinta millones de años. Durante ese tiempo, la temperatura se incrementa en millones de grados Celsius bajo una presión enorme, hasta que se inicia en algún momento la fusión nuclear: entonces el hidrógeno se convierte en helio, exactamente igual que en nuestro sol. Al final, nace una estrella nueva, como las que vemos a millares en el cielo.

LOS PLANETAS SE FORMAN A PARTIR DE GRUMOS

No solo se originan estrellas en esas nebulosas. En la actualidad podemos deducir a partir de los datos de observación cómo nacen y evolucionan sistemas planetarios enteros. Cuando las nebulosas se contraen, el polvo se concentra en grandes discos que giran lentamente en torno al embrión de la estrella. Cuanta más materia se contraiga alrededor del centro, tanto mayor será su velocidad de giro.

Todos reconocemos este efecto en las piruetas propias del patinaje artístico: cuando la patinadora extiende los brazos, primero gira poco a poco sobre su propio eje, pero si acerca un brazo o una pierna al cuerpo, se eleva entonces la velocidad de rotación. Sobria y objetivamente, la física describe este proceso de la siguiente manera: el momento angular es igual al producto de la masa, el radio y la velocidad, y se conserva. Si se reduce el radio, se incrementa la velocidad. Así ocurre también en el espacio con las nubes de polvo que rodean a las estrellas jóvenes o que incluso las envuelven. Cuanto más se contraen, mayor es su velocidad de rotación: es entonces cuando surgen los discos de acrecimiento.

En el fondo sucede exactamente lo mismo que en el nacimiento de las estrellas: en los discos de polvo se forman otra vez pequeños grumos. Yo me lo imagino como en una cacerola al preparar una salsa: si no estamos atentos a la hora de espesar y no removemos con la suficiente rapidez, no conseguimos ninguna salsa, sino que la cacerola se llena de pequeños grumos. En este caso, de esos grumos de polvo no se forman estrellas, sino planetas. Estos protoplanetas no se vuelven lo suficientemente calientes para desencadenar la fusión nuclear en su interior porque su masa es demasiado pequeña y la presión demasiado baja. Los planetas crecen, absorben el polvo de su órbita y aran surcos en el disco de polvo alrededor de la estrella joven. En imágenes tomadas por el telescopio ALMA se observan anillos de protoestrellas que parecen una gigantesca variante de los anillos de Saturno<sup>[56]</sup>.

La rotación del disco explica también cómo se originó la eclíptica de nuestras órbitas planetarias. Todos los planetas nacieron en un disco primigenio de polvo alrededor del Sol. Así pues, la protoestrella solar que se calentó lentamente fue la princesa de hielo que dio a luz a nuestro sistema planetario.

Los pedazos de hielo de la fase temprana de este nacimiento siguen estando en la linde de nuestro sistema solar. Son los vaporosos cometas, en los cuales se agrupan agua, minerales y polvo para formar pedazos de hielo sucio. No surge un pequeño planeta en bruto de todos los grumos que se

arremolinan en el disco de polvo. En el mejor de los casos, algunos se convierten en planetas enanos como Plutón o en bloques de rocas más pequeños, los planetoides y los asteroides. Carecen de la fuerza gravitatoria suficiente para formar una bonita bola redondeada.

Este polvo celestial es, finalmente, el que trajo la vida a la Tierra. El agua y muchas moléculas orgánicas alcanzaron y enriquecieron el planeta. Todos los elementos de los que estamos hechos se sintetizaron primero en las estrellas, luego se congelaron en moléculas en las nebulosas y por último llegaron a nosotros durante el nacimiento de la Tierra y en sus dolores de sobrepeso. Por tanto, también nosotros, los seres humanos, somos seres cósmicos cuyos cuerpos se componen de polvo de estrellas<sup>[57]</sup>.

## LA VIDA EN EL ESPACIO

Cuando contemplamos todo ese polvo y todos esos discos planetarios, nos viene a la cabeza la pregunta de si puede haber vida en otro lugar. ¿Estamos solos en el cosmos? ¿O existen otras formas de vida ahí fuera? Me hice esta pregunta cuando era un niño pequeño, y casi todo ser humano se la formula cuando comienza a comprender las dimensiones del cielo.

Cuando empecé mi carrera universitaria a mediados de los años noventa, se conocía un único planeta fuera de nuestro sistema solar. Este orbita, por descontado, alrededor de una estrella muerta, el púlsar PSR B1257+12, y fue descubierto en 1990 por el astrónomo polaco Aleksander Wolszczan y su colega canadiense Dale Frail. No se supuso allí ningún entorno favorable a la vida. Poco después de mi doctorado, en 1995, Michel Mayor y su estudiante de doctorado Didier Queloz descubrieron en el Observatorio de la Alta Provenza, no muy lejos de Marsella, otro planeta fuera de nuestro sistema solar. A cincuenta años luz de distancia, en la constelación de Pegaso, el planeta Dimidio<sup>[58]</sup>, tal como sería bautizado posteriormente, gira en torno a la estrella Helvetios, que es similar a nuestro Sol. Estos dos investigadores recibieron el Premio Nobel por ello.

Entretanto se han hallado indicios de miles de exoplanetas, tal como se denomina a los planetas de otros sistemas solares. Sin embargo, eso no es nada teniendo en cuenta el número de planetas que debe de haber ya solo en nuestra Vía Láctea. Desde un punto de vista estadístico, podrían ser cien mil

millones, tal vez incluso más, pero hasta el momento no se ha descubierto ninguna señal clara de vida. No obstante, es muy probable que no estemos solos. Mientras tanto, son cada vez más los colegas que se atreven a pronunciar esta afirmación y a pensar en voz alta sobre extraterrestres.

La vida inteligente podría detectarse a través de las ondas de radio. Hace solo diez años, algunos colegas de los Países Bajos todavía me miraban raro cuando, con uno de mis estudiantes de doctorado, comencé a examinar los datos del radiotelescopio LOFAR en busca de posibles señales extraterrestres<sup>[59]</sup>. Posteriormente él trabajaría como colaborador científico en Berkeley. Allí, el multimillonario ruso Yuri Milner puso a disposición de la universidad nada menos que cien millones de dólares para tales proyectos. Ya me gustaría disponer de una cantidad de dinero semejante para mi investigación. Con anterioridad, la astrofísica Jill Tarter, que fue homenajeada en la película *Contact*, fundó en California el instituto SETI con dinero procedente de donaciones. SETI es el acrónimo inglés para «búsqueda de inteligencia extraterrestre».

Todavía no hemos encontrado vida inteligente en el espacio, y aunque algunos colegas opinan que no es posible encontrarla siquiera en la Tierra, después de todo la búsqueda de extraterrestres ha proporcionado algunos avances técnicos útiles para la radioastronomía. En el SETI se precisan excelentes ordenadores y programas informáticos que sean capaces de evaluar con rapidez las ingentes cantidades de datos. Para tal fin, los astrónomos precisan de la ayuda de especialistas en ordenadores como, por ejemplo, Dan Werthimer, que puso en marcha el proyecto SETI en la Universidad de California en Berkeley. Procedía del famoso Homebrew Computer Club y del entorno del fundador de Microsoft, Bill Gates, así como del de los fundadores de Apple, Steve Jobs y Steve Wozniak. Los tres eran también miembros de este club y se hicieron inconmensurablemente ricos. El único que no se enriqueció fue Werthimer. Más tarde, nosotros utilizamos las rápidas placas de computadora de Werthimer para interpretar la avalancha de datos de nuestros telescopios.

Al fin y al cabo, debemos la primera imagen de un agujero negro no solo a los telescopios de ondas submilimétricas que se construyeron para radiografiar la sala de partos de las estrellas y las nubes moleculares, sino en parte también a aquella búsqueda de extraterrestres que muchos consideraban excéntrica.

No sabremos si existe realmente vida extraterrestre hasta que la encontremos. Para mí se trata de una cuestión científica seria. Si

descubriéramos algún tipo de vida extraterrestre, tampoco se desmoronarían las sociedades ni las religiones. Después de un periodo breve de agitación, el mundo volvería a sus quehaceres cotidianos. Lo que somos depende en primera instancia de nosotros mismos y no de unos extraterrestres. Todos los planetas que podrían albergar vida se encuentran a muchos años luz de distancia, tal vez a cientos o miles de años luz, de modo que una comunicación solo sería posible a través de varias generaciones. En lugar de esperar la salvación desde el espacio, deberíamos mantener en buen estado nuestro propio planeta y tratarnos los unos a los otros de una manera racional.

### 3

## Las estrellas muertas y los agujeros negros

### LA MUERTE EN EL CIELO: CÓMO MUERE UNA ESTRELLA

Las estrellas nacen, mueren y crean así espacio para vida nueva, pero también para los agujeros negros que se originan tras su muerte; porque en el espacio todo está interconectado y también en él fascina y asusta la muerte.

Hace algunos años estuve en un simposio en Estados Unidos, organizado como homenaje al astrónomo Miller Goss. Desde Socorro, un pueblecito perdido de Nuevo México, dirigió los dos radiointerferómetros más grandes y más exitosos del país: el Very Large Array (VLA), y el Very Long Baseline Array (VLBA). Y algo más importante aún: apoyó a muchos científicos jóvenes, entre ellos a mí. A su homenaje asistieron colegas procedentes de todo el mundo, y como colofón, él organizó una excursión a uno de sus lugares favoritos. Fuimos al famoso cañón del Chaco, donde los indios, en torno al año 1000, erigieron impresionantes construcciones de arcilla. En un extremo de estos pueblos hay un pequeño rincón amurallado. En él se sentaba en su día el observador del cielo, afirmó el barbudo guarda del parque histórico nacional.

Me imaginé a un indio anciano que se quedaba sentado e inmóvil todas las noches en aquel lugar persiguiendo el curso de los astros hasta que a la mañana despertaba en la oscuridad. Ese momento en que los primeros rayos de sol incidían sobre su cuerpo al alba debía de ser siempre sublime para él. El amanecer era un importante ritual cotidiano en la vida de aquellos seres humanos. Tal vez era un instante de alivio por la continuidad de la Tierra y de la naturaleza y un símbolo tácito de la progresión del tiempo. Tal vez era un instante de alegría porque proseguía la vida. La luz llega, el Sol calienta el suelo, los pájaros despiertan, y crece, escaso, el verde.



Para los indios, el cañón era un calendario. Sobre el canto afilado de una roca marcaron la salida del Sol y determinaron así con toda exactitud cada día del año, pues con la rotación de la Tierra alrededor del Sol, el punto de salida se desplazaba un poco hacia el sur en otoño, y en primavera lo hacía siempre hacia el norte.

Sin embargo, el anciano que miraba desde allí a las estrellas, mucho antes de la llegada de Cristóbal Colón al Nuevo Mundo, percibió algo distinto. Y es que hace apenas mil años sucedió algo inusual. Una pintura rupestre situada en las cercanías muestra tal vez aquel acontecimiento celeste de extraordinaria rareza. Un luminoso cuerpo celeste brillaba con tal intensidad que podía verse incluso a la luz del día.

En el verano del año 1054, la gente de todo el mundo miró al cielo con asombro. Algunos tal vez se temieron alguna catástrofe inminente. Los astrónomos de la dinastía Song, en la antigua China, registraron este espectáculo cósmico en sus crónicas. En sus escritos informaron acerca de una estrella «invitada» que brillaba en el firmamento con una luminosidad similar a la de Venus. Un médico árabe llegó a hablar incluso de una estrella nueva.

También en Europa se sorprendería la gente por un disco luminoso que dominaba el cielo después del mediodía. Sin embargo, no existen observaciones seguras. ¿Qué llamó la atención de los seres humanos con tanta intensidad que en todo el mundo dejaron constancia por escrito y en detalle acerca de ese fenómeno?

Fue una supernova, una gigantesca explosión estelar<sup>[60]</sup>. Ocurrió a una distancia de seis mil años luz en nuestra propia Vía Láctea. El dibujo en la roca del cañón sobre la cual tal vez se sentaba el indio anciano muestra una media luna pintada de rojo sobre el color ocre de la roca. A su lado puede verse una estrella grande. Es circular y tiene los rayos típicos, como los que le pintaría un niño o una niña. Es casi tan grande como la Luna. Así fue como los artistas indios de por aquel entonces representaron la supernova, nos contó el guarda. Pero nuestro grupo de astrónomos no quedó del todo convencido; los expertos debaten si el dibujo representa o no la famosa supernova de 1054<sup>[61]</sup>. Sin embargo, considero también improbable que un acontecimiento tan extraordinario pasara inadvertido por completo.

Podemos imaginarnos una estrella casi como un globo aerostático. El calor en su centro hace que se hinche. Cuando se agota el combustible, el gas se enfría, la presión desciende y el globo se desinfla. Así es como mueren las estrellas; colapsan cuando se ha agotado su combustible. El modo y el

momento en que mueren, metafóricamente hablando, depende de su masa. Las estrellas livianas —y estas son la gran mayoría— dejan de fulgurar y se extinguen después de una larga vida.

Nuestro Sol tiene una vida media. Cuando colapse, volverá a encender sus motores. En las cámaras del corazón de la estrella se han apilado las cenizas de la fusión nuclear; un núcleo caliente de helio. Bajo la elevada presión interna de la estrella en proceso de colapsar, la temperatura volverá a elevarse, se fusionará el helio para convertirse en carbono, liberará sus últimas reservas de energía y se hinchará el «recubrimiento exterior». Poco antes de su defunción, el Sol se inflará, crecerá hasta convertirse en una gigante roja, se tragará a Mercurio, a Venus y posiblemente también a la Tierra.

Con sus últimos estertores, las estrellas con una masa mayor que nuestro Sol expulsan al espacio gases y plasma. Se originan nebulosas planetarias que presentan maravillosas formas y colores cuando la estrella moribunda las ilumina desde el interior. Este espectáculo dura un abrir y cerrar de ojos cósmico y al cabo de unos pocos miles de años estas nebulosas planetarias se desvanecen. Su nombre es algo engañoso, porque estas formaciones no tienen nada que ver con los planetas, pero cuando fueron exploradas en el siglo XVIII con los telescopios de entonces, parecían planetas gaseosos muy lejanos.

Su interior alberga las cenizas comprimidas de la fusión nuclear, sobre las cuales carga todo el peso de una estrella extinta. Esa presión es tan grande que los átomos van apiñándose hasta que en algún momento no disponen ya de más espacio y se rozan los unos con los otros. La presión de los electrones impide el colapso subsiguiente de la estrella. Estas partículas, que orbitan alrededor de los núcleos atómicos individuales en el interior de la estrella, se denominan fermiones. Son solitarios y no pueden compartir cama con ningún otro fermión. Cuando el entorno se vuelve demasiado estrecho, oponen resistencia a la presión, a la fuerza gravitatoria, e impiden de este modo el desmoronamiento completo del núcleo calcinado.

Una vez repelidas las capas externas de la estrella, tan solo queda el pequeño núcleo de carbono, densamente comprimido y de un brillo intensísimo; es una enana blanca, tan grande como la Tierra, pero tan pesada como el Sol. Solo una cucharadita de la materia de la enana blanca, en la que se convertirá nuestro Sol dentro de algunos miles de millones de años, tiene el peso de un camión de nueve toneladas. La superficie de esta estrella muerta permanece muy caliente y continúa irradiando energía térmica al espacio

durante mucho tiempo, antes de acabar convirtiéndose en un frío cristal de carbono de una redondez perfecta, un gigantesco diamante en el espacio.

El físico hindú Subrahmanyan Chandrasekhar ha calculado qué efectos de la mecánica cuántica desempeñan un papel en este proceso. En 1930, con tan solo diecinueve años, viajó en barco a Inglaterra para proseguir en Cambridge la carrera de Física que había comenzado en la India. Durante la travesía disponía de mucho tiempo, así que calculó la masa máxima que puede alcanzar una enana blanca, y obtuvo un resultado de 1,44 masas solares.

Ahora bien, ¿qué sucedería si una estrella fuera mucho más grande y pesada que nuestro sol y aumentara la presión a niveles insoportables en el sentido literal de la expresión? Una estrella con un peso más de ocho veces mayor que el Sol enciende otros motores para evitar el colapso. Con una forma similar a una cebolla, se va incendiando una capa tras otra; el núcleo del sol gigantesco se calcina a sí mismo. Cada capa se va volviendo cada vez más caliente en dirección al centro y funde las cenizas de la capa circundante para formar núcleos atómicos cada vez más pesados, y en ese proceso se va liberando otra reserva de energía. El hidrógeno se convierte en helio; el helio, en carbono; el carbono y el helio, en oxígeno; el oxígeno, en silicio; y el silicio se convierte en hierro. Cada proceso de fusión transcurre más rápido que el anterior. Lleva un millón de años convertir el helio en carbono; sin embargo, la fusión de todo el silicio necesario para convertirse en hierro dura tan solo unos días.

¡Y luego se acabó todo! Desde un punto de vista energético, el hierro posee el núcleo atómico más compacto en la naturaleza. Si la presión es tan grande como para que el hierro se fusione para formar elementos nuevos, ese proceso ya no suministra energía nueva, sino que exige energía. De pronto ya no funciona el truco de elevar simplemente la presión y arrancar a los átomos cada vez más energía. Se desencadena de repente un enfriamiento atómico en lugar de un calentamiento; la presión disminuye en lugar de aumentar. La estrella vetusta se queda sin su último pilar de apoyo y colapsa hasta morir. En unos pocos minutos el núcleo implosiona: la estrella moribunda ya no puede ofrecer ninguna resistencia a la fuerza gravitatoria propia.

La presión interna en los restos de la estrella alcanza unos valores tan increíbles que incluso los átomos quedan densamente comprimidos, porque el núcleo de tales estrellas es más pesado que el valor límite superior calculado por Chandrasekhar para las enanas blancas. Sin embargo, existe un último proceso antes del colapso irrevocable y eterno. Los electrones, tan poco dados al contacto, se refugian en los núcleos atómicos y se fusionan con los

protones para formar neutrones: la envoltura atómica desaparece en el núcleo, y entonces el resto es diez mil veces más pequeño que el átomo anterior.

Si nos imaginamos un átomo con una corteza tan grande como el estadio Rhein Energie de mi equipo favorito de fútbol, el F. C. Colonia, entonces el núcleo atómico solo tendrá el tamaño de una moneda de cinco céntimos en el punto central de saque. Así pues, nuestra materia, compuesta de átomos, está normalmente bastante vacía. Cuando los átomos se convierten en neutrones puros, entonces la estrella se encoge hasta volverse una estrella de neutrones. Por tanto, el colapso es igual que comprimir todo un estadio para convertirlo en una moneda pequeña. Más de una vez y media la masa de todo el Sol se concentra en una estrella de neutrones con un diámetro de tan solo veinticuatro kilómetros. Esa densidad es increíblemente elevada. Cinco mililitros de materia estelar de neutrones pesarían dos mil quinientos millones de toneladas, es decir, ocho mil veces la masa de la catedral de Colonia en una sola cucharilla de té.

Durante mucho tiempo, hablar sobre las estrellas de neutrones sonaba a pura especulación. Y también lo era hasta que Jocelyn Bell y su director de tesis, Antony Hewish, descubrieron una extraña señal de radio el 28 de noviembre de 1967 en el Observatorio de Radioastronomía de Mullard, cerca de Cambridge, Reino Unido. A la Tierra llegaban muchos pulsos cortos en intervalos exactos. Era como si un reloj hiciera tictac en el espacio, por eso se denominó «púlsar» a estas estrellas. Sin embargo, a los dos investigadores les sorprendió al principio esa precisión y, medio en broma, bautizaron aquel objeto de radio como LGM (por *little green men*). Pronto quedó claro que habían descubierto un objeto extremadamente pequeño e inusualmente pesado que giraba sobre sí mismo a una velocidad vertiginosa. Se trataba, en efecto, de una estrella de neutrones, una estrella muerta tan pesada como un sol y tan grande como Ries de Nördlinger, un antiguo cráter de impacto provocado por un meteorito en Baviera. No toda estrella de neutrones se convierte en púlsar, pero todo púlsar es una estrella de neutrones. Como un faro cósmico, irradia al espacio su onda de radio en dos conos de luz, que llegan hasta nosotros de manera regular y provocan ráfagas rápidas de radio en el cielo. Dado que el púlsar es tan estable y pesado, funciona como un gigantesco giroscopio y es más preciso que cualquier reloj atómico. A causa de su extraordinaria estabilidad y constancia, los púlsares pueden utilizarse para realizar muchas pruebas sobre la teoría de la relatividad<sup>[62]</sup>. Un ejemplo famoso es el PSR J0737-3039, un sistema binario formado por dos púlsares en órbita mutua<sup>[63]</sup>. La precesión de la elipse orbital ya conocida de Mercurio, cuyo

desciframiento confesó Einstein en su momento que le produjo palpitaciones, es aquí diez mil veces mayor y está determinada con una precisión de cinco cifras significativas.

El nacimiento de las estrellas de neutrones es espectacular y ocurre en aquellas con más de ocho veces la masa del Sol. Un sol tan grande muere de una manera más impresionante que nuestra propia estrella. Su proceso de fusión se convierte en unos fuegos artificiales galácticos. Bajo la presión de su masa en proceso de colapso, el centro da a luz a la nueva estrella de neutrones, pero el resto de la estrella implosiona a una velocidad supersónica. Los electrones y los protones se fusionan abruptamente en el núcleo y liberan grandes cantidades de neutrinos que depositan una energía adicional en la envoltura de la estrella. Entonces, una catastrófica onda expansiva se propaga por toda la estrella hacia el exterior y acaba destrozándola definitivamente. Los astrónomos denominan «supernova» a una explosión galáctica de esa magnitud. Destella en el cosmos y ofrece un espectáculo impresionante. Y es justo un espectáculo así el que podrían haber admirado los indios del cañón del Chaco y muchos otros observadores del cielo por todo el mundo hace más de mil años.

Tratemos de imaginar una supernova: en fracciones de segundo se libera más energía en esa explosión galáctica que la que ha producido y producirá el Sol en toda su vida. De todas maneras, pasan algunas semanas hasta que toda la luz se abre camino a través de la envoltura en expansión de la estrella. Por este motivo una supernova puede observarse a veces durante meses. Con esas condiciones extremas de temperatura y de presión se forman nuevos elementos que son más pesados que el hierro. Así, son lanzados también al espacio el cobalto, el níquel, el cobre o el zinc en nubes gaseosas de escombros a millones de grados y al rojo vivo.

Estas ondas de choque interestelares recorren el espacio a decenas de miles de kilómetros por segundo y se expanden de forma esférica, por lo que son imponentes aceleradores de partículas cósmicas. Algunos núcleos atómicos se aceleran casi a la velocidad de la luz y vagan por la Vía Láctea siguiendo el turbulento campo magnético del espacio interestelar. Una parte infinitesimal alcanza la Tierra con gran energía y se convierte en parte de los rayos cósmicos.

En la actualidad seguimos viendo esos frentes de choque. Uno de mis antiguos estudiantes descubrió en el año 2009 una radiofuente nueva en nuestra galaxia vecina M82<sup>[64]</sup>. Vimos en efecto un brillante anillo de radio que se expandió durante meses a doce mil kilómetros por segundo<sup>[65]</sup>. Por su

velocidad y su tamaño pudimos deducir que esa estrella había explotado hacía un año. Habíamos descubierto la supernova 2008iz. Se hallaba detrás de una extensa nube de polvo, razón por la cual había permanecido oculta a todos los demás telescopios. Descubrir y presenciar en directo un drama cósmico semejante, algo que solo conocemos por las películas de ciencia ficción o por la sobria bibliografía especializada, es tremendamente emocionante.

Hoy en día podemos ver los restos de la brillante supernova del año 1054. Su legado fue la espectacular nebulosa del Cangrejo. Esta formación, ubicada en el brazo de Perseo de nuestra Vía Láctea, tiene el aspecto de una colorida nube de deflagración y demuestra que los testimonios transmitidos por la tradición no eran cuentos de hadas.

Según cálculos aproximados, se dan unas veinte supernovas por milenio en nuestra Vía Láctea. Una de ellas dejó asombrados a Tycho Brahe y a su hermana Sophie el 11 de noviembre de 1572. Como creían que ese suceso era el nacimiento de una estrella nueva, le dieron el nombre de «stella nova». En el año 1604, Johannes Kepler describió también una supernova. La ausencia de todo paralaje demostraba que esa luz no procedía de nuestra atmósfera, sino que debía de venir de más allá de la Luna. Esta supernova fue un clavo más en el ataúd de la visión aristotélica del mundo, que declaraba inmutable la esfera celeste de las estrellas fijas.

Los astrónomos siguen descubriendo supernovas constantemente; todas están en otras galaxias lejanas en el universo. Sin embargo, cada día podría aparecer también en nuestra propia Vía Láctea una supernova que podamos ver a simple vista. De hecho, ya va siendo hora de que aparezca alguna, pero podría tardar más de cien años.

No suponen ningún peligro para la humanidad, ni siquiera las supernovas que estuvieran muy cerca. En el fondo, el nacimiento de nuestro planeta y la vida en la Tierra se lo debemos a tales explosiones estelares, porque en su última fase una estrella produce elementos importantes para la vida en ciclos cada vez más rápidos. La supernova los expulsa a toda velocidad por el espacio y entonces se concentran en imponentes nubes de polvo, de las que pueden surgir generaciones posteriores de estrellas y planetas. En su momento, todos los elementos importantes de la Tierra llegaron de esta manera. Así pues, sin la muerte de estrellas nunca habría habido vida, ni tampoco el hermoso color rojo que se añadió al material del puente Golden Gate. Contiene óxido de hierro procedente del hierro esparcido por la explosión de una supernova. Les debemos mucho a las estrellas que mueren.

Hay estrellas que son demasiado pesadas incluso para ser estrellas de neutrones. Ocurre como con esa silla tan resistente de la sala de estar que está reservada para el tío Alfred, que sufre de obesidad mórbida. Desde que se sentó en una silla plegable de plástico, muy barata, y fue a parar al suelo, pusieron a su disposición una de madera maciza, por si las moscas. Sin embargo, hasta la silla más resistente tiene sus límites. Si el tío Alfred se trae a casa un elefante del circo y le permite que se siente en la silla de madera, entonces incluso esa silla se romperá.

En astrofísica, las enanas blancas son las sillas de plástico baratas y las estrellas de neutrones las sillas resistentes de madera. Son resistentes, pero no lo aguantan todo, pues entre las estrellas hay verdaderas elefantas. Esta visión se la debemos nada menos que al padre de la bomba atómica estadounidense, Robert Oppenheimer, así como a sus colegas y estudiantes. Poco antes de la Segunda Guerra Mundial demostraron que también las estrellas de neutrones poseen una masa máxima, tal como Chandrasekhar había probado que las enanas blancas no tienen una resistencia infinita<sup>[66]</sup>. Según los cálculos actuales, esta masa máxima de las estrellas de neutrones equivale a algo más del doble o el triple de la masa solar.

Las elefantas estelares son aquellas estrellas que pesan más de veinticinco veces la masa del Sol. Cuando explotan, la mayor parte de su masa vuela al espacio y en el núcleo se origina primero una enana blanca y luego una estrella de neutrones. En su interior se precipita cada vez más materia hacia el centro, de modo que incluso la estrella de neutrones colapsa en algún momento y entonces ya no hay nada más que detenga el desmoronamiento. Aún no conocemos ninguna fuerza que pueda ofrecer resistencia al peso de una estrella tan pesada; el colapso es inevitable. La estrella implosiona progresivamente y se va volviendo cada vez más y más pequeña, hasta que en algún momento toda la masa está concentrada en un único punto de una densidad infinita. Entonces se origina una de las estructuras más extrañas del universo, un agujero negro, aunque en tiempos de Oppenheimer todavía no se llamaba de esta manera.

El mismo Albert Einstein se sorprendió con esta idea. El astrónomo alemán Karl Schwarzschild ya había calculado la estructura del espacio-tiempo para una masa que se había reducido a un único punto, tan solo unos pocos meses después del desarrollo de la teoría de la relatividad, y las implicaciones de esos cálculos eran muy preocupantes.

Schwarzschild fue un pionero de la astrofísica moderna y era director del Observatorio Astrofísico de Potsdam cuando en 1914 estalló la Primera Guerra Mundial. De manera diferente a Eddington, pacifista y admirador de Einstein, este físico alemán procedente de la alta burguesía judía se alistó voluntariamente para servir a su país en la artillería alemana. Fue una decisión trágica, pues dos años después enfermó de gravedad en el frente y murió.

No obstante, Schwarzschild logró escribir en plena guerra dos artículos científicos de nivel internacional<sup>[67]</sup>. En uno de ellos calculó la curvatura del espacio-tiempo alrededor de una masa puntual. De este modo, Schwarzschild fue el primero en obtener un resultado preciso para un caso concreto en las ecuaciones de la teoría general de la relatividad, y se lo envió con orgullo al sorprendido Einstein<sup>[68]</sup>. «No me esperaba que la solución exacta del problema pudiera formularse de una manera tan sencilla», le respondió Einstein por carta, y presentó los resultados en el congreso siguiente de la Academia Prusiana de las Ciencias.

En la solución de Schwarzschild, toda la masa se concentra en un punto, pero el espacio parece extenderse infinitamente en una dirección desde ese lugar, por lo que su curvatura se vuelve infinitamente grande<sup>[69]</sup>. De repente, hay una cantidad infinita de espacio en una parte limitada del mismo. Las ecuaciones muestran una singularidad: son los puntos en los que las ecuaciones explotan, saltan al infinito, y donde ya no puede continuarse el cálculo. Nosotros, los físicos, aprendemos que las singularidades no son ninguna realidad, sino que muestran que en las ecuaciones todavía falta algo. De ahí que Einstein fuera claro: las masas puntuales no existen. Se trata de un jueguito puramente matemático, pero interesante al fin y al cabo.

Sin embargo, lo que intranquilizaba a Einstein y a otros científicos era que más allá de la singularidad central ocurría algo extraño en las ecuaciones y a una distancia de

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

Esta distancia se denomina en la actualidad «radio de Schwarzschild», donde  $M$  es la masa del objeto,  $c$  (299 792,458 km/s) y  $G$  ( $6,6743 \times 10^{-11}$  m<sup>3</sup>/kg/s<sup>2</sup>) son de nuevo la velocidad de la luz y la constante de gravitación universal.

Ahí fuera había algo que no cuadraba. Las ecuaciones se volvían locas. Una vez que se alcanzaba el radio de Schwarzschild, el tiempo parecía



detenerse. Sin embargo, al estar dentro del radio, ya no se viajaba en el espacio, sino en cierto modo en el tiempo.

En la vida cotidiana puedo sentarme tranquilamente en un banco del parque: estoy fijo en el espacio, pero el tiempo sigue avanzando sin parar. Dentro del radio de Schwarzschild permanezco fijado en el tiempo, pero se me retira el espacio bajo los pies y me arrastra inexorablemente hacia la singularidad central. Con cada intento de movimiento hacia afuera, solo consigo acercarme aún más al centro.

Es un concepto muy raro. Al parecer no hay ninguna posibilidad de volver a abandonar ese espacio nunca más, ni de traspasar desde dentro el radio de Schwarzschild. Todo lo que se encuentra en su interior ya no escapa de él, ni la materia, ni la luz, ni, por consiguiente, la información y la energía. Se tardó bastante tiempo en comprender lo que en realidad sucedía allí. Sin saberlo, Schwarzschild había descrito un agujero negro mientras se hallaba en una lóbrega trinchera durante la Primera Guerra Mundial.

Sin embargo, estaba claro de antemano que en algún momento algo iba a salir mal alrededor de una masa puntual. ¿Acaso no lo vimos ya en la teoría simple de Kepler y de Newton sobre el movimiento de los planetas? Cuanto más cerca del Sol estamos, más rápido nos movemos alrededor de él. Si el Sol fuera infinitamente pequeño, un planeta en una órbita angosta de tres kilómetros de radio tendría que girar a su alrededor a la velocidad de la luz, e incluso aún más rápido en una órbita más interior. ¡Pero eso no es posible en absoluto!

Incluso la fuerza de atracción se vuelve demasiado grande. Cuanto más masa haya en el mismo espacio, mayor es la fuerza gravitatoria y más difícil se hace desprenderse de ella. Si queremos escapar de la fuerza gravitatoria de la Tierra, hay que lanzar un cohete al espacio a 11,2 kilómetros por segundo. Sin embargo, en la superficie del Sol, mucho más pesado, necesitaríamos 617 kilómetros por segundo. Si este siguiera comprimiéndose, entonces se iría incrementando cada vez más la velocidad de escape necesaria en la superficie, hasta que en algún momento haría falta una velocidad superlumínica. Pero entonces la luz ya no sería capaz de escapar, ni siquiera en la teoría de Newton, y regresaría irremediabilmente a la estrella. Ahora bien, según la teoría de Einstein, ni siquiera en el borde de los agujeros negros se puede avanzar a la velocidad de la luz.

Ya en el año 1783, al reverendo John Michell, sin ninguna idea acerca de la teoría de la relatividad, le llamó la atención que pudiese existir algo así en la naturaleza, que un sol tuviera una fuerza de atracción enorme y la

velocidad de escape fuera mayor que la velocidad de la luz. Una «estrella oscura» así tendría que ser invisible, porque la luz no podría escapar de ella aunque existiera y estuviera localizable en unas coordenadas determinadas en el cosmos.

En la teoría de Einstein, el espacio alrededor de un agujero negro se asemeja a un río embravecido que termina en una cascada al borde del radio de Schwarzschild<sup>[70]</sup>. La luz es como una nadadora en ese río espacial. Bien lejos del borde aún puede nadar con agilidad contra la corriente. Más cerca de la cascada, la corriente aumenta, y la nadadora tiene que bracear cada vez más rápido. Sin embargo, en algún momento, ni siquiera una campeona mundial de natación podría escapar a la fuerte corriente, y se vería arrastrada por ella. Si llegara al borde del acantilado, sería demasiado tarde entonces. Nadie consigue remontar, nadando, una cascada. Exactamente eso es lo que sucede en el borde del radio de Schwarzschild. Es un punto de no retorno. La luz es absorbida con el espacio hacia lo más profundo.

En 1956, el físico Wolfgang Rindler acuñó el término «horizonte de sucesos» para esta frontera espeluznante. Este no se puede palpar ni sentir, es tan solo una distancia determinada en el espacio vacío, una definición matemática, y sin embargo, es un vértice en la geometría de las curvas.

Si calculamos el radio de Schwarzschild para el Sol, obtenemos un valor de tres kilómetros; para la Tierra, uno de 0,9 centímetros; y para un ser humano como yo, una cien mil millonésima parte de un núcleo atómico.

Einstein estaba convencido de que la zona interior del radio de Schwarzschild no era física, sino pura imaginación, pura matemática. Pensaba que la naturaleza impediría que pudieran originarse semejantes objetos. Por ello publicó en 1939 un artículo en el que pretendía demostrar con ayuda de su teoría de la relatividad que no existen tales estrellas oscuras. Concluyó en tono triunfal con la frase: «El resultado esencial de esta investigación es una comprensión clara acerca de por qué no existen las singularidades de Schwarzschild en la realidad física». No significaba nada más que los agujeros negros no existen<sup>[71]</sup>.

Sin embargo, el artículo de Einstein estaba equivocado, pues Oppenheimer y sus colegas demostraron casi a la vez que las estrellas pueden colapsar perfectamente en un único punto<sup>[72]</sup>. Cuando son lo bastante pesadas, el colapso ya no puede detenerse.

No obstante, volvieron a quedar demostradas las extrañas propiedades de la teoría de la relatividad. Lo que se vería de un colapso dependería en grado sumo del lugar donde se encontrara uno. Una observadora que siguiera

atentamente el suceso con el telescopio, vería cómo la estrella implosiona y desaparece en un agujero oscuro. Se originaría un horizonte de sucesos y todo aquello que se le acercase se volvería cada vez más débil y lento. Cada onda luminosa se estira hasta lo infinito y ya no puede medirse cuando se acerca al borde. El tiempo se convierte en una melaza espesa y parece detenerse. Si nos imaginamos las ondas luminosas como los secuenciadores del mecanismo de un reloj, estos se alargarían como el espacio. El reloj iría más lento y en algún momento se pararía.

En cambio, a un observador osado que permaneciera sentado en la superficie de la estrella en proceso de colapso, no le ocurriría nada especial, excepto, como es natural, que se precipitaría a una muerte segura. Caería al centro de la estrella con todas las demás partículas. Una vez que traspasara el horizonte de sucesos, no notaría nada inusual, ni siquiera lo percibiría. El agujero negro siempre se le aparecería como una gran mancha negra ante él, también en el interior del mismo. Incluso su tiempo seguiría transcurriendo de una manera normal, hasta que, en algún momento, en una fracción de milisegundo, se comprimiría en un solo punto en el centro de la estrella. Su luz caería con él. Ahora bien, en el caso de los agujeros negros estelares, la cosa se pone muy seria, pues dado que los pies del temerario observador estarían más cerca del centro de la masa que su cabeza, aquellos serán atraídos también con mayor intensidad que esta y, por consiguiente, sería estirado como un espagueti.

Los físicos y las físicas se regocijan al reflexionar sobre tales escenarios, si bien ese sentimiento no es compartido por todos. Por cierto, durante mucho tiempo se denominó a esos objetos «estrellas congeladas» porque el tiempo se detiene en sus bordes. Sin embargo, esto no es del todo cierto. La detención del tiempo solo es válida, en rigor, para el borde de un agujero negro eternamente idéntico. Al crecer tras devorar materia, también crece su horizonte de sucesos un poco y arrolla, por decirlo así, la materia entrante.

El concepto de «agujero negro» apareció por primera vez en 1964, en un artículo de la periodista Ann Ewing<sup>[73]</sup>, y fue retomado y asentado en 1967 por John Archibald Wheeler en una conferencia. Desde entonces, los agujeros negros fascinan a legos y a especialistas por igual. Las expresiones son importantes incluso en física, y de publicidad entienden algo los estadounidenses. Nadie compraría hoy en día un libro sobre la primera imagen de un «objeto en completo colapso gravitacional».

Los agujeros negros también pueden rotar. El matemático neozelandés Roy Kerr descubrió en 1963 una solución matemática para un objeto así, que

describe el espacio-tiempo en torno a un cuerpo de este tipo<sup>[74]</sup>. Cuando el material en rotación cae en un agujero negro, se mantiene el momento angular. El agujero negro hace que el espacio se ponga a rotar igual que un remolino hace girar el agua. Y exactamente igual que los remolinos atrapan a las barcas y las arrastran a las profundidades, también el espacio en rotación, a partir de una determinada distancia, pone a rotar a la materia e incluso a la luz con él. Por otra parte, es posible, en principio, extraer energía de rotación del agujero negro con ayuda de los campos magnéticos que caen en la zona del vórtice<sup>[75]</sup>. La singularidad en el interior de los agujeros negros en rotación es un anillo con propiedades disparatadas. Desde un punto de vista matemático, se puede dar vueltas alrededor de él, comenzar en un punto en el tiempo y regresar de nuevo al mismo momento.

Solo las estrellas muy grandes producen agujeros negros, pero no viven demasiado tiempo, tal vez solo algunos millones de años. Poco después de que se haya formado una estrella gigante, esta vuelve a explotar. Allí donde nacen estrellas jóvenes, se crean también agujeros negros estelares. Entretanto, en nuestra Vía Láctea hay aproximadamente unos cien millones de ellos; están a años luz de distancia y son demasiado pequeños como para que podamos disponer de imágenes de ellos. A veces se les ve en el cielo como fuentes brillantes de rayos X, exactamente en el momento en que absorben la materia de una estrella vecina que lo estaba orbitando. Hablamos entonces de una «estrella binaria de rayos X», pero en realidad se trata de una estrella y de un cadáver de estrella que orbitan entre sí. El agujero negro zombi va consumiendo poco a poco a su compañera.

#### EN EL CORAZÓN DE LA VÍA LÁCTEA

En el mes de junio de 2016 me encontraba en la impresionante montaña de Gamsberg, en Namibia, donde pretendíamos construir un nuevo radiotelescopio<sup>[76]</sup>. Allí seguía habiendo tan solo algunas cabañas pequeñas, nos faltaba el dinero, pero mirando a lo lejos me veía rodeado por un panorama sobrecogedor. Por debajo de mí, el desierto pedregoso y multicolor se extendía en todas las direcciones hasta el horizonte; por encima de mí, el Sol de poniente envolvía el limpio cielo en un rojo intenso. El juego de colores de la arena y del Sol iba desapareciendo lentamente y cosquilleaba

mis ojos. ¿Acaso existe algún instante en solitario más hermoso que ese? Mi mirada al cielo nunca es meramente neutra, se tiñe de fascinación.

En las noches claras y secas del sur de África —muy lejos de la población más cercana—, el cielo estrellado aparecía como si estuviera pintado por encima de mí en una cúpula extensa. El brillo de la Vía Láctea destacaba con todo su esplendor en contraste con la oscuridad del espacio como una banda luminosa: cien mil años luz en una única panorámica. Innumerables estrellas se entretajan en un velo brillante que se extiende por todo el cielo. Las manchas negras le otorgan una plasticidad que no he visto en ningún otro lugar del hemisferio norte de la Tierra. Son las nubes de polvo interestelares, los semilleros de las estrellas jóvenes, de los planetas y de los agujeros negros, y podía contemplarlas a simple vista. Casi en la vertical que tenía por encima descansaba el centro de la Vía Láctea. Allí, en algún lugar de su centro se escondía «mi» agujero negro. Bajo aquel claro cielo estrellado parecía que estaba al alcance de la mano, pero solo podía adivinar el lugar exacto en el que se hallaba, pues las nubes oscuras de polvo en nuestra galaxia me impedían mirar en su interior. Pese a su hermosura, la Vía Láctea nos lo pone difícil a la hora de abarcarla en su totalidad, ya que somos una parte de ella; no somos solamente espectadores, sino también los moradores de esta isla cósmica.

La Vía Láctea es, junto con la Luna, la formación más llamativa en el cielo nocturno. Brilla con tanta claridad que, según cuenta la leyenda, guio al apóstol Santiago en su balsa de piedra hasta Compostela. En la actualidad nos valemos del GPS, pero como mínimo los escarabajos peloteros siguen sirviéndose de la Vía Láctea para orientarse cuando hacen rodar las bolas de estiércol<sup>[77]</sup>. Sin embargo, es posible que esa banda blanca inspirara sentimientos e ideas a los primeros cazadores y recolectores.

La Vía Láctea recibió su nombre en la Antigüedad. En la mitología griega, Zeus acostó a su hijo Heracles sobre el pecho de su esposa, Hera, que estaba durmiendo, pero la diosa se despertó por la poderosa succión del niño y lo apartó de sí. En ese instante se esparció un poco de leche materna por la bóveda celeste; acababa de nacer la Vía Láctea. En griego se denomina *galaxías*, de donde procede nuestro término de «galaxia». La Vía Láctea está compuesta por centenares de miles de millones de estrellas. A otras vías lácteas en el espacio se las denomina «galaxias». El científico naturalista Alexander von Humboldt las llamaba «universos-isla», un término mucho más bonito en mi opinión.

Demócrito, el filósofo griego, postuló en el siglo v a. C. que la luz de la Vía Láctea solo podía proceder del destello concentrado de muchas estrellas individuales. Casi dos mil años después, cuando Galileo contempló con su telescopio la diversidad estelar de nuestra Vía Láctea, reconoció que Demócrito tenía razón. Immanuel Kant escribió en el siglo XVIII que la Vía Láctea debía de estar extendida como un disco y que sus estrellas debían de estar colocadas como en un plano.

Más o menos por esa misma época, el astrónomo francés Charles Messier se fue a la caza de cometas al centro de París, al Hôtel de Cluny (en la actualidad el Museo Nacional de la Edad Media). Descubrió muchas nebulosas extrañas en el cielo, que sin duda no eran cometas ni se movían. Messier no supo decir qué eran, pero las documentó y las numeró. Reunió ciento diez de esos fenómenos difusos en el catálogo que lleva su nombre.

Estos objetos del Catálogo Messier siguen siendo objetivos populares para los astrónomos aficionados y se abrevian con la «M» de Messier y su número en el catálogo. M1 es la nebulosa del Cangrejo resultante de la supernova del año 1054. El cúmulo de Hércules, o M13, es el cúmulo globular más claro en el cielo boreal situado a una distancia de veintidós mil años luz. Centenares de miles de estrellas antiguas orbitan ahí entre sí, en un diámetro de ciento cincuenta años luz. M42 es la nebulosa de Orión, en la que nacen estrellas.

Todos estos objetos son parte de nuestra Vía Láctea, que está llena de estructuras y de bellas formaciones. Sin embargo, no todos los que se incluyen en el Catálogo Messier son parte de nuestro universo-isla. M31 es la galaxia de Andrómeda, la vía láctea melliza que tenemos directamente a nuestro lado, a una distancia de 2,5 millones de años luz. Y M87, también denominada galaxia Virgo A, en la constelación de Virgo, es una galaxia elíptica monstruosa con algunos miles de millones de estrellas y un imponente agujero negro en el centro. Messier todavía no sabía todo esto. Lo único importante para él era confeccionar una lista útil para que nadie confundiera esas nebulosas con cometas.

Hacia finales del siglo XVIII, Wilhelm Herschel proporcionó una impresión de las verdaderas dimensiones de la Vía Láctea. Astrónomo aficionado, se ganaba la vida como músico y componía sinfonías y fugas, pero su verdadera pasión estaba dirigida a las estrellas que observaba en compañía de su hermana Caroline. Esta cantante era también una astrónoma de talento.

A pesar de ser un autodidacta, Herschel, de ascendencia alemana, se había labrado cierta fama como uno de los mejores constructores de telescopios

reflectores. Incluso elaboraba él mismo los espejos que alcanzaban los dos metros de diámetro. Herschel suministraba telescopios a investigadores y nobles de toda Europa y envió uno de estos instrumentos a China. Observaba y exploraba él mismo el cielo estrellado con su mayor construcción, un telescopio de doce metros que estaba suspendido en una construcción enorme de madera y que era movido por un sistema de poleas.

Herschel era hijo de un músico militar y se fue a vivir a Inglaterra cuando a su padre lo destinaron allí. Los hermanos, nacidos en Hannover, se pusieron a contar estrellas allí y ampliaron el catálogo de Charles Messier. Juntos descubrieron que algunas nebulosas descritas por el francés se componían en realidad de estrellas individuales. En 1785, los Herschel publicaron una imagen de la Vía Láctea con cincuenta mil estrellas. La forma supuestamente ovalada que posee se asemejaba ya un poco a la realidad, pero se debe más al método empleado que a los datos. En el caso de los Herschel, nuestro Sol se halla todavía cerca del centro de nuestra Vía Láctea. Un error, tal como sabemos hoy. No obstante, con su técnica superior de observación, ambos sentaron las bases para la comprensión de la estructura de las vías lácteas.

El neerlandés Jacobus Kapteyn, quien ya con veintisiete años era catedrático de Astronomía en Groninga, dio el siguiente paso a principios del siglo xx. Reconoció que todas las estrellas orbitaban alrededor de un centro común. Kapteyn publicó en 1922 su modelo dinámico de la Vía Láctea, pero también erró en un punto decisivo, afortunadamente, pues en su modelo nuestro sistema solar se hallaba todavía muy cerca del centro de la galaxia. Y según nuestros conocimientos actuales, estaríamos, por consiguiente, en las cercanías de un gigantesco agujero negro.

El astrónomo estadounidense Harlow Shapley corrigió ese error. Realizó sus investigaciones en el Observatorio Astronómico del Monte Wilson y trabajó con un telescopio gigante. Shapley dedujo el tamaño de la Vía Láctea midiendo cúmulos globulares y determinando su distancia a la Tierra.

Esto solo fue posible gracias a que la estadounidense Henrietta Swan Leavitt averiguó en el año 1912 cómo podía determinarse la distancia de las estrellas por la fluctuación regular y periódica de la luminosidad de unas concretas, las Cefeidas. Leavitt, al igual que Annie Jump Cannon, pertenecía a una generación de astrónomas apasionadas e incansables, cuyos logros no siempre fueron debidamente reconocidos. No obstante, dos cráteres de la Luna llevan los nombres de Cannon y Leavitt.

La determinación de la posición de los cúmulos globulares mostró a Shapley que no estaban centrados en relación con el Sol. Por tanto, los brazos

espirales de la galaxia no giran de ninguna de las maneras alrededor de nuestro sistema planetario. El centro de la Vía Láctea debía estar, por consiguiente, muchísimo más alejado de nosotros de lo que había deducido Kapteyn. Shapley estimó la posición de nuestro sistema planetario a unos sesenta y cinco mil años luz del centro. Con posterioridad corrigió esa distancia a unos treinta y cinco mil años luz. De esta manera, Shapley se convirtió en el Copérnico de nuestra galaxia. El canónigo prusiano-polaco había desplazado en su día a la Tierra del centro a una órbita exterior de nuestro sistema solar; Shapley desterraba ahora al Sol y a sus planetas desde el centro de rotación de nuestra Vía Láctea hasta sus bordes.

Shapley consideró que las dimensiones de la Vía Láctea eran considerablemente mayores de lo que se había supuesto hasta entonces. Según sus cálculos, el diámetro era de trescientos mil años luz. Todas las nebulosas de ahí fuera pertenecen a nuestra galaxia, esta fue su hipótesis. Por esa razón solo podía existir una galaxia, la nuestra. Supuso que el universo entero estaba compuesto únicamente por la Vía Láctea.

Esto llevó a Shapley a un debate legendario. El 26 de abril de 1920, en un acto celebrado en el Museo Nacional de Historia Natural de Estados Unidos, en Washington, se produjo el Gran Debate, tal como se denominaría con posterioridad a esta confrontación. Se enfrentaban cara a cara dos escuelas astronómicas: por un lado, Shapley defendía su galaxia gigante con el Sol fuera del centro; por el lado crítico, Heber Curtis representaba la teoría de los universos-isla. Partía de la base de que la Vía Láctea era solo una de muchas galaxias y que las nebulosas espirales formaban sistemas solares independientes. Sin embargo, nuestro sistema solar ocupaba en su imagen una posición central dentro de la galaxia.

Durante aquel congreso, ambos investigadores habían dado conferencias sobre sus respectivas teorías. Por la noche se enfrentaron en un debate abierto en el que no se regalaron absolutamente nada el uno al otro. Curtis, que en su carrera profesional había dirigido varios observatorios y emprendido casi una docena de expediciones para observar eclipses de sol, estaba convencido de que Shapley se había equivocado en sus mediciones. Ambos defendieron sus posiciones con vehemencia, pero esa noche no hubo ningún claro vencedor. Puede que Shapley tuviera al final a más espectadores de su parte. Pero, en el fondo, ambos tenían un poco de razón.

Entre el público se hallaba un investigador que escuchó con interés los argumentos de Shapley y de Curtis. Su nombre era Edwin Hubble. Este antiguo abogado encontró la solución a ese gran debate. Irónicamente la logró



en el Observatorio del Monte Wilson, en el que Shapley había realizado sus investigaciones.

Gracias a Hubble podemos responder con relativa exactitud a la pregunta de cuál es la distancia más larga que el ser humano llega a contemplar a simple vista: casi tres millones de años luz. Nuestros ojos cubren esa distancia hasta alcanzar un punto muy discreto en el cielo, la M31, la nebulosa de Andrómeda, la única galaxia vecina que podemos percibir en el cielo nocturno sin telescopios. Todas las otras estrellas que vemos pertenecen a nuestra Vía Láctea. Pero, además, la nebulosa de Andrómeda es también la clave de la disputa entre Shapley y Curtis. Y aún más que eso, de toda la estructura del universo.

Solo tres años después del legendario debate, Hubble descubrió que la nebulosa de Andrómeda es más que una simple nube de gas en la que nacen estrellas jóvenes<sup>[78]</sup>. En ella encontró una estrella con la que pudo medir la distancia a la Tierra. Se trataba de la luz intermitente, periódica y con pulsaciones de una variable cefeida, tal como ya había descrito Henrietta Swan Leavitt. Por ello, a partir de la curva de su luz podía determinarse la verdadera luminosidad de la estrella y, por consiguiente, su distancia a la Tierra.

La gran distancia resultante solo podía significar que la formación entera estaba situada fuera de nuestra Vía Láctea. Cuando Hubble incorporó los resultados de otras observaciones, supo que la nebulosa era, de hecho, una galaxia propia. Shapley estaba equivocado: nuestra Vía Láctea es solo una de muchas en el universo. Hubble se lo comunicó a Shapley por carta antes de la publicación de su trabajo. Sigue estando abierta la cuestión de si lo hizo por malicia o por un caballeroso sentido del deber. En todo caso, Shapley había criticado anteriormente a Hubble con acritud y le dio a entender que no se tenía especial interés por sus ideas. Sin embargo, Shapley admitió su error. Cuando leyó la carta y se la mostró a una de sus estudiantes, dijo: «Esta es la carta que ha destrozado mi universo».

«La historia de la astronomía es una historia de horizontes que retroceden», escribió Hubble en 1936 en su libro *El reino de las nebulosas*<sup>[79]</sup>. En el caso de nuestra Vía Láctea, sin embargo, después de sus descubrimientos y los de otros investigadores de la década de 1920, el horizonte no se había ensanchado ni mucho menos tal como corresponde a nuestro conocimiento actual. El cosmos seguiría creciendo, y seguía siendo una cuestión difusa dónde nos encontrábamos exactamente, pues el centro

estaba detrás del polvo en el disco de la Vía Láctea, oculto a los telescopios ópticos.

Esto no cambió hasta comienzos de los años treinta, cuando los radiotelescopios abrieron una nueva ventana al universo para la astronomía. Karl Guthe Jansky, el descubridor de las primeras ondas de radio cósmicas, midió en 1932 unas señales ruidosas que procedían inequívocamente del cosmos, y registró las más intensas cerca de la constelación de Sagitario. Hoy en día sabemos que en esa dirección está el centro galáctico, es decir, el centro de nuestra Vía Láctea.

También el neerlandés Jan Oort creía que el centro de la Vía Láctea se situaba en algún lugar por allí. Este astrónomo, que ha dado nombre a la nube de Oort que gira en torno al sistema solar y que es el hogar de los cometas, calculó una distancia de treinta mil años luz hasta el centro de la galaxia. Por tanto, se acercó al valor actual conocido de veintisiete mil años luz. Su compatriota Henk van de Hulst llevó la radioastronomía un paso más allá cuando, durante la ocupación alemana en la Segunda Guerra Mundial, se mantuvo en la clandestinidad en el Observatorio Astronómico de Utrecht. Había predicho con anterioridad que un hidrógeno atómico tan abundante en nuestra Vía Láctea tenía que emitir por fuerza líneas espectrales en el intervalo de las ondas de radio. Eso sucedería exactamente a una frecuencia de 1,4 GHz, es decir, más o menos en el rango de las frecuencias actuales de nuestros teléfonos móviles.

Esto representó una iluminación en el verdadero sentido de la expresión, pues las ondas de radio penetran incluso a través de los muros, por lo que las nubes de polvo de la Vía Láctea no deberían representar ningún obstáculo para ellas. La luz de radiofrecuencia brillaba ahora a través de las manchas oscuras de la Vía Láctea, y Van de Hulst y Oort pudieron medir su estructura e incluso descubrieron los brazos espirales. En realidad, estos son fáciles de ver cuando se flota por encima de una galaxia, pero nosotros nos encontramos *en* la galaxia y miramos desde un lado.

A mediados de los años cincuenta, se consiguió localizar por fin nuestra posición exacta en la Vía Láctea. Nos hallamos entre el brazo de Sagitario y el brazo de Perseo, en el denominado «brazo local». Allí nos movemos a una velocidad de doscientos cincuenta kilómetros por segundo alrededor del centro galáctico. Está bien no tener que ajustar nuestro ritmo temporal al año cósmico, porque una vuelta de nuestro sistema planetario en nuestro tiovivo galáctico tarda doscientos veinte millones de años en completarse.

Igual que los planetas giran alrededor del Sol, el Sol gira alrededor del centro de la Vía Láctea. En la actualidad medimos ese movimiento en unas pocas semanas: exactamente cuando miramos con nuestros radiotelescopios el agujero negro situado en el centro, tal como hacen con regularidad mis colegas Andreas Brunthaler y Mark J. Reid<sup>[80]</sup>. Este parece moverse a una velocidad elevada en el cielo, pero se trata de una ilusión, ya que somos nosotros quienes nos movemos con relación al centro de la Vía Láctea, igual que todas las estrellas a nuestro alrededor.

A largo plazo, eso tendrá también consecuencias para nuestra visión del cielo. En aproximadamente cien mil años, las siete estrellas del conocido asterismo del Carro Mayor, que pertenece a la constelación mucho más grande de la Osa Mayor, tendrán un aspecto diferente del actual. Entonces el vehículo trapezoidal con el pértigo tan marcado podría parecer como si se hubiera estrellado contra una pared.

La exploración de la Vía Láctea sigue siendo una gran empresa. La sonda espacial Gaia, de la Agencia Espacial Europea (ESA), no cesa de sacar a la luz detalles nuevos sobre su estructura y su evolución. Amina Helmi es una arqueóloga galáctica, profesora de la Universidad de Groninga y, por tanto, sucesora de sus grandes predecesores Kapteyn y Oort. En el año 2018 aireó un secreto que nuestra Vía Láctea había mantenido oculto desde tiempos inmemoriales. En ella siguen arremolinándose hoy en día los restos de toda una galaxia, Gaia-Encélado, a la que engulló hace diez mil millones de años. Presas galácticas de ese calibre condujeron a que nuestra Vía Láctea aumentara de tamaño y se abovedara en el centro formando el denominado «bulbo galáctico».

Sin embargo, la evolución no ha acabado con ese episodio. Muchas otras galaxias pequeñas orbitan nuestra Vía Láctea, y en algunos miles de millones de años nos fusionaremos con Andrómeda, la galaxia vecina de un tamaño similar al nuestro. A nuestra Vía Láctea le esperan todavía épocas convulsas.

## 4

# Galaxias, cuásares y la Gran Explosión

### GALAXIAS EN FUGA

En la primera clase con mis estudiantes de primero hacemos siempre un poco de gimnasia. Pido a cinco de ellos que se coloquen hombro con hombro en una línea perpendicular a la pared. El último se apoya en ella con la mano en ángulo. Todos los demás ponen la mano izquierda en el hombro derecho de su vecino. A una orden dada, todos a la vez y en el intervalo de un segundo, deben extender el brazo de modo que cada cual consiga una distancia de un brazo entre él y el vecino. ¿Qué sucede? Si todos extienden el brazo simultáneamente, entonces la estudiante que está tocando la pared dará un paso a un lado. Sin embargo, el estudiante que le sigue tendrá que dar dos pasos a un lado en ese mismo tiempo, pues de pronto se halla a dos brazos de distancia de la pared. Así, la estudiante que le sigue tendrá que dar en ese segundo tres pasos hacia el lado. ¿Y el estudiante bajito del final? Bueno, recibirá un buen empujón y saldrá volando lateralmente, porque cinco pasos en un segundo son demasiados. Por suerte, casi siempre acierto a sujetarlo a tiempo.

Este ejemplo pretende ilustrar lo que sucede cuando el espacio se expande. ¿Qué ocurre cuando siempre hay espacio entre dos estudiantes o entre dos galaxias? ¡Todos se mueven alejándose unos de otros! Y cuanto más distanciado se encuentre uno, con mayor velocidad se alejará. Esta es una observación simple, pero aplicada al cosmos ha transformado nuestra visión del mundo de una manera tan radical como Copérnico, Kepler y Newton.

Poco después de que Einstein publicara su teoría de la relatividad, descubrió que tenía un problema con el universo. El universo no era estable. La gravedad opera únicamente atrayendo. Y un universo lleno de materia

debería desinflarse igual que un globo aerostático del que se escapa el aire. Hoy en día lo denominamos la Gran Implosión o Big Crunch.

Por suerte, las ecuaciones permitían un truco: Einstein pudo insertar en ellas una constante libre. Se correspondía con una fuerza misteriosa que estaba dilatando el universo, una especie de antigravedad. Con esa «constante cosmológica», Einstein consiguió salvar al universo del colapso en su modelo, aunque no quedó muy satisfecho con ello.

Sin embargo, las cosas se pusieron peor. En 1922, el físico ruso Alexander Friedmann escribió a Einstein que, basándose en las ecuaciones de la teoría de la relatividad, podía describir un cosmos que se expandía, y eso sin emplear la misteriosa constante. El alemán rechazó esa idea. Para él, el universo tenía que ser eterno y estático porque para ello había buenos motivos por aquella época.

Entonces vino nada menos que un cura católico a sacudir de nuevo las más profundas convicciones de Einstein. No solo describió matemáticamente un universo en expansión, sino que afirmó incluso que los astrónomos ya habían encontrado indicios de tal comportamiento.

El sacerdote era el belga George Lemaître, un alumno jesuita que, impresionado por los horrores de la Primera Guerra Mundial, se ordenó sacerdote y se formó en matemáticas y física en la localidad belga de Lovaina. Posteriormente estudió, entre otros, con el famoso Eddington en Cambridge y en Boston, en el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT), donde llegó a doctorarse.

A Lemaître le llamaron en primer lugar la atención las curiosas propiedades de las nebulosas que el estadounidense Vesto Slipher había descubierto en el Observatorio Lowell, en Arizona. En 1917, había medido la velocidad de las galaxias empleando el efecto Doppler. Conocemos este efecto en la acústica: si pasa una ambulancia a nuestro lado con la sirena encendida, escucharemos un sonido más agudo mientras la ambulancia se dirige hacia nosotros. Una vez que nos sobrepasa y se aleja, lo escucharemos más grave. Lo que es válido para los sonidos, lo es también para la luz. Si las galaxias vuelan hacia nosotros, la luz se «comprime» y se vuelve más azul; si se alejan, la luz se «ensancha» y se vuelve más roja. Como es natural, en ambas direcciones se viaja siempre a la velocidad de la luz, sin embargo, en nuestra percepción cambia el color. Si medimos ahora con un espectrógrafo la huella de los átomos en la luz de las galaxias, entonces podremos medir hasta los cambios de color más pequeños y, por consiguiente, la velocidad de las galaxias en la dirección de observación.

El resultado: exceptuando a nuestra vecina, la galaxia Andrómeda, la luz presentaba la mayoría de las veces un desplazamiento hacia el rojo. ¡Casi todas las vías lácteas se están alejando de nosotros! Esto era más que extraño y no podía tratarse de ninguna casualidad. Imaginémoslo en un gran baile; el salón está lleno de parejas que se arremolinan en la pista. Así pues, ¿no debería acercarse a nosotros aproximadamente el mismo número de parejas que aquellas que se alejan? ¿Qué ocurre si constatamos que todas se apartan de nosotros? ¿Tan mal les caemos?

La respuesta de Lemaître: no se debe a nosotros, sino que todo el universo se está expandiendo y, con él, la luz. Al correlacionar las velocidades de las galaxias de Slipher con las distancias de las galaxias de Hubble, Lemaître constató que se alejaban a una velocidad mayor cuanto más distantes se hallaban de nosotros. Las galaxias más lejanas eran las que se movían a mayor velocidad, igual que el estudiante bajito del final de la fila del experimento en mi clase.

El alivio fue grande. Así pues, la agitada huida galáctica no era una propiedad repelente característica de nuestra Vía Láctea, sino que cualquier otro observador en cualquier otra vía láctea tendría que constatar exactamente lo mismo que nosotros. A diferencia de la pared en el aula de la universidad, nuestra Vía Láctea no está anclada en ningún lugar del universo, ni tampoco reposa en el centro del espacio, sino que se mueve por el bullicio del salón de baile cósmico como todas las demás galaxias. Todo el parque cósmico, incluido el salón de baile, se está expandiendo cada vez más y más.

Podemos imaginárnoslo de esta manera: la pista de baile es un globo gigantesco y las parejas bailan en su superficie. Si se inflara el globo, habría cada vez más superficie, y todos los bailarines se moverían distanciándose unos de otros. Solo se mantendrían juntas las parejas abrazadas, como ocurre con la Vía Láctea y Andrómeda. La atracción mutua es entonces más intensa que la fuerza que hace que el universo se expanda.

Lemaître publicó sus resultados en francés en el año 1927 citando los datos de alejamiento de Hubble. Dos años más tarde, este volvió a publicar en inglés esa misma correlación utilizando los mismos datos. Sin embargo, se dejó en el cajón a Slipher, cuyas mediciones utilizó, ni tampoco citó a Lemaître, con quien había hablado en persona. Los historiadores de la ciencia y sus contemporáneos dicen: «Hubble era muy selectivo al citar, y en sus publicaciones se olvidaba de mencionar los trabajos de sus colegas»<sup>[81]</sup>. Eso es hablar con cortesía. En ciencia, la única divisa válida está en las menciones

y en el reconocimiento de los colegas; un comportamiento como el de Hubble no es inusual, por desgracia, y es poco ético en grado sumo.

En ciencia ocurre a veces como en la *Ilíada*, la antigua epopeya de Homero: más importantes que tus hechos y que tu propia vida son las historias que se cuenten después sobre ti. Hubble se preocupó muy bien de reservarse un lugar en la historia: el famoso telescopio espacial lleva su nombre y la ley del cosmos en expansión se llamó durante mucho tiempo sin más ley de Hubble. Hubo que esperar hasta 2019, año que la Unión Astronómica Internacional le cambió el nombre por el de ley de Hubble-Lemaître.

La ley de Hubble-Lemaître ensanchó el horizonte del universo de una manera decisiva, pues con ella podían medirse ya las distancias de las galaxias más alejadas. Desde entonces, los miles de millones de años luz ya no representan ningún problema. Una vez encontrada la huella espectroscópica de los átomos en la luz de las vías lácteas, el desplazamiento hacia el rojo de la línea espectral es una medida de la distancia.

A Albert Einstein no le agradó nada este nuevo avance porque esa expansión significaba que, a la inversa, hace mucho tiempo el universo entero debió de estar comprimido en un solo punto. Una vez más, sus ecuaciones —como en el caso de los agujeros negros— daban lugar a una singularidad en el tiempo y el espacio. Por tanto, ¡el universo debió de tener un comienzo! Lemaître fue el primero en atreverse a formular esto y habló de un átomo primigenio del que se originó, como de un huevo, el universo joven hace miles de millones de años.

A Einstein tampoco le gustó esto. ¿No sonaba sospechosamente a las ilusiones de un sacerdote? ¿No manaba de las ideas bíblicas sobre la creación? Este católico fue objeto de una sospecha generalizada, los científicos permanecieron escépticos y algunos se burlaban de su modelo del Big Bang, la Gran Explosión. En realidad se empleó esa expresión en términos peyorativos, pero siguió utilizándose porque al final había una idea correcta detrás de ella. En Alemania se ha generalizado la expresión «explosión primigenia», una formulación más acertada, en mi opinión.

Durante una larga conversación, Lemaître intentó convencer a Einstein de que su universo estático no funcionaba. Sin embargo, pasaría mucho tiempo hasta que fue aceptada por completo la teoría de la explosión primigenia. Siendo todavía un joven científico, me topé con antiguos corifeos que rechazaban de plano esa idea. «Con la Gran Explosión, el Creador se revolvería en su tumba», se temían. La historia volvía a repetirse en

circunstancias diferentes. Si en el caso de Copérnico y de Galileo fue el Vaticano el que rechazó sus visiones del mundo, en el caso de Lemaître, el papa Pío XII, en 1951, fue uno de los primeros defensores del nuevo cosmos en expansión.

Se dice que una teoría antigua muere cuando mueren sus últimos detractores, y así fue también, en efecto, en este caso. Hoy en día, el modelo del universo dinámico y en expansión está aceptado por completo en la ciencia, si bien sigue sin resolverse el secreto de la explosión primigenia.

#### UNA LUZ NUEVA: LA RADIOASTRONOMÍA

Durante miles de años, los seres humanos solo pudimos contemplar el cielo con los ojos. A partir del siglo XVII, los telescopios ópticos echaron una mano. Y hace noventa años se empleó una técnica completamente nueva que revolucionaría la exploración del espacio en muy poco tiempo. Cuando Karl Guthe Jansky descubrió señales de radio cósmicas en 1932, el universo entero se percibió al instante de una manera por completo distinta, pues por primera vez se empleaba una luz de otro ámbito del espectro electromagnético en lugar de la luz visible. Muchos astrónomos pisaban un territorio del todo nuevo, al que debían habituarse primero; algunos arrugaron la nariz. Pasaría mucho tiempo antes de que se aceptara y estableciera esta nueva disciplina, la radioastronomía, así como sus instrumentos, los radiotelescopios. Las piezas que proporcionan las imágenes en los telescopios ópticos se componen en general de cristal revestido; en los radiotelescopios, de acero.

En la actualidad escaneamos el cielo en todo el espectro electromagnético y para ello empleamos telescopios de radio, de rayos infrarrojos, visibles, ultravioletas, de rayos X y de rayos gamma. Recibimos ondas de radio con oscilaciones de 0,01 GHz, que son tan grandes como una casa. O rayos gamma con oscilaciones de cien mil millones de gigahercios, que son cien millones de veces más pequeños que un átomo. Un gigahercio corresponde, a su vez, a mil millones de oscilaciones por segundo; es la radiación que utilizamos también en la WLAN. La luz visible, por ejemplo, oscila a quinientos mil gigahercios. Por tanto, podríamos comparar la luz irradiada por el universo con una música cósmica, en la que cada frecuencia emitida se corresponde con una nota en la escala musical de la luz. Nuestros



instrumentos actuales cubren un radioespectro de sesenta y tres octavas, lo que correspondería al teclado de un piano de casi doce metros de anchura. Hasta los comienzos de la radioastronomía escuchábamos tan solo la música de la luz del universo en una única octava, correspondiente a la luz visible. Los radiotelescopios fueron añadiendo las notas más graves y dieron al universo un sonido completamente nuevo. En lugar de estrellas enteras, de pronto brillaban en el cielo de las ondas de radio los agujeros negros y la luz de la Gran Explosión. Más tarde, los telescopios de rayos X y los de rayos gamma enseñaron a la astronomía también las notas agudas.

El éxito de esta astronomía nueva comenzó después de la Segunda Guerra Mundial. Ese momento no fue ninguna casualidad, ya que la guerra aérea había impulsado el desarrollo de la tecnología del radar. Así que nada menos que las batallas de la guerra produjeron la tecnología necesaria. A pesar de toda nuestra fascinación por la radioastronomía, no debemos olvidar nunca sus amargos orígenes. Después de la guerra, las antenas de radio, las antenas parabólicas y los transmisores adquirieron una gran presencia, y comenzó una carrera entre los astrónomos.

En los años siguientes dominaron la investigación los gigantescos platos de los radiotelescopios. En Inglaterra un grupo de antiguos miembros de la Royal Air Force, bajo la dirección de Bernard Lovell, comenzó a construir un telescopio gigante de setenta y seis metros de diámetro, el Observatorio Jodrell Bank. Debido a un error de cálculo, el proyecto estaba mal dimensionado para su finalidad, cayó en dificultades financieras y Lovell temió que lo metieran en la cárcel. Sin embargo, la conmoción por el Sputnik en el año 1957 salvó el telescopio, pues el grupo de Lovell era el único en toda Inglaterra que podía recibir e interpretar las señales de radio de este primer satélite ruso. Ahora bien, no lo consiguieron con el plato de la antena, sino con un simple alambre.

Los neerlandeses, por su parte, comenzaron a descubrir el cielo con esta nueva luz. Primero pusieron en marcha una antigua instalación alemana de radar; después construyeron un telescopio de veinticinco metros en Dwingeloo, con el que midieron la radiación de las ondas de radio de veintiún centímetros del hidrógeno, predicha por Henk van der Hulst.

Un plato de antena de radio de sesenta y cuatro metros de diámetro, que Australia construyó cerca de la pequeña localidad de Parkes, en Nueva Gales del Sur, hizo historia porque consiguió un momento espectacular al recibir las primeras imágenes de televisión del alunizaje de la misión Apolo 11.

En los años setenta, radioastrónomos alemanes construyeron el mayor radiotelescopio móvil del mundo (con un diámetro de cien metros) cerca del pueblecito de Effelsberg, en las proximidades de Bonn, la capital federal de aquel entonces. Como estudiante de doctorado en el Instituto Max Planck de Radioastronomía, al que pertenece este instrumento, hice allí mis primeras mediciones radioastronómicas.

Solo un radiotelescopio era aún más grande, el radiotelescopio de Arecibo, en Puerto Rico, con un plato de antena de trescientos metros, que fue construido en los años sesenta por el Departamento de Defensa de Estados Unidos y cedido más tarde a los astrónomos. Se hallaba en una depresión y era inmóvil, de ahí que solo pudiera observarse una pequeña parte del cielo con él. Este complejo se hizo famoso por la película de James Bond, *Golden-Eye: El regreso del agente 007*, en la cual aparecía lleno de agua.

En esa misma época, los estadounidenses construyeron un plato móvil de antena de radio de noventa metros de diámetro. Se encontraba en la localidad de Green Bank, en una zona rural de Virginia Occidental, donde hay una limitación estricta de la radiocomunicación. En la actualidad, esa localidad es muy popular entre las personas que temen la radiación de radio. En los años noventa, el telescopio se desmoronó una noche por fatiga del material. Un colega de Bonn había sacado la víspera la última fotografía del telescopio entero y a la mañana siguiente tomó otra del montón de chatarra en que se había convertido<sup>[82]</sup>. Los astrónomos no somos supersticiosos, cierto, pero desde entonces todo el mundo se pone un poco nervioso cuando ese colega saca la cámara.

Reconstruyeron el telescopio de Green Bank con un diámetro que es, en efecto, un metro más grande que el radiotelescopio de cien metros de Effelsberg. Nunca entendí del todo la justificación científica de ese metro adicional, pero estaba claro que esa técnica había llegado a un límite. Nadie quería ni podía construir telescopios aún más grandes.

No obstante, los astrónomos necesitábamos con urgencia instalaciones más grandes para producir imágenes más nítidas. La agudeza visual de un telescopio depende de la longitud de onda de la luz y del diámetro del plato: el telescopio podrá otear el espacio con mayor nitidez cuanto más grande sea. Sin embargo, la imagen también se vuelve más borrosa cuanto mayor es la longitud de onda. La radioastronomía trabaja con longitudes de onda mucho mayores que la astronomía en el rango visible, de ahí que el telescopio de cien metros de Effelsberg no otee con mayor nitidez que el ojo humano. Con él no puede detectarse ningún agujero negro. Quien quisiera imágenes nítidas,

tendría que diseñar instalaciones más grandes. La salvación llegó con la radiointerferometría, en la que varios telescopios están interconectados para disponer así del equivalente a un telescopio gigante.

La australiana Ruby Payne-Scott realizó las primeras mediciones radiointerferométricas exitosas después de la Segunda Guerra Mundial. Aunque solo disponía de una antena, utilizó la superficie del mar como espejo de radio adicional. En 1964, el británico Martin Ryle construyó en Inglaterra el telescopio One-Mile y obtuvo el Premio Nobel de Física en 1974 por la interconexión exitosa de tres platos de antena de radio para formar un gran telescopio. Otros radioastrónomos fueron refinando el principio de Ryle para obtener imágenes cada vez más nítidas. En los Países Bajos se construyó una red de catorce platos de antena de veinticinco metros, nada menos que en los terrenos del antiguo campo de concentración de Westerbork. Y en Nuevo México surgió el radiotelescopio VLA, compuesto por un total de veintisiete platos de antena que pueden repartirse, en diferentes configuraciones, a lo largo de treinta y seis kilómetros. Cada plato tiene un diámetro de veinticinco metros, de modo que los científicos pudieron emplear finalmente un telescopio que es prácticamente más grande que toda el área metropolitana de Boston. Durante muchas décadas fue el instrumento más productivo científicamente de la astronomía.

Los radiotelescopios se interconectaban entonces en todo el mundo; se pretendía construir instalaciones que fueran tan grandes como el globo terráqueo y que proporcionaran las imágenes astronómicas más nítidas. Esta técnica recibió el inmanejable nombre en inglés de *Very Long Baseline Interferometry* (VLBI), que los astrónomos llaman «vielbiei» para abreviar. Se denomina «interferometría de muy larga base» porque los telescopios están, en parte, muy separados. Con esta técnica surgieron telescopios mundiales, y precisamente con ella conseguimos por fin capturar la imagen del agujero negro.

#### LOS CUÁSARES, DE CAMINO A MONSTRUOS MASIVOS

Los astrónomos realizaron novedosos experimentos mediante la radioastronomía. Era como si de repente, además del tacto, del olfato, del gusto, de la vista y del oído, dispusieran de un sexto sentido. Pronto

comenzaron a escanear el cielo sistemáticamente en busca de radiofuentes. Enseguida encontraron miles de cuerpos celestes nuevos y ninguno de ellos sabía qué eran. Todos los astrónomos supusieron al principio que se trataba de estrellas. ¿Qué, si no?

En Australia, John Bolton captó una onda de radio desde la dirección del objeto en el Catálogo Messier M87, y afirmó que era parte de nuestra Vía Láctea, aunque tácitamente estaba convencido de que M87 ¡era una galaxia propia! Por temor al rechazo no se atrevió a comunicar a sus colegas que esa radiación nos llegaba desde una distancia de un montón de millones de años luz, pues si un objeto estaba tan alejado, ¿qué intensidad tendría esa onda de radio<sup>[83]</sup>? ¿Qué cuerpo celeste, qué galaxia, qué objeto misterioso en el cosmos podría producir semejante cantidad de radiación? Era una idea demasiado radical.

Diez años más tarde, el temor de Bolton había desaparecido y la existencia de las denominadas «radiogalaxias» ya había sido aceptada hacía mucho tiempo. Entre ellas se hallaban M87 y la galaxia Cygnus A, que se encuentra nada menos que a setecientos cincuenta millones de años luz de distancia de la Tierra, si no dudamos de la ley de Hubble-Lemaître. Entre los astrónomos se produjo una gran agitación, pues esa luz de radiofrecuencia que se estaba utilizando desde hacía unos pocos años permitía a la humanidad echar un vistazo en las profundidades más recónditas del espacio y al mismo tiempo también en el pasado del universo.

Investigadores de Cambridge confeccionaron un gran catálogo con todas las señales de radio. Su primera versión era todavía demasiado pequeña y la segunda versión contenía muchos errores; sin embargo, la tercera versión, denominada 3C, es la base de muchos estudios. A las nuevas estrellas y galaxias de radio se las numeraba como siempre, sin más, pero nadie tenía ni siquiera una vaga idea de lo que en realidad causaba exactamente esa onda de radio. Las imágenes de esos misteriosos cuerpos celestes seguían siendo borrosas en grado sumo y la determinación de su posición era inexacta en exceso. Se detectó que la radiación misma la generaban electrones casi tan rápidos como la luz, que son desviados en los campos magnéticos cósmicos. Conocemos este proceso por los aceleradores terrestres de partículas, denominados «sincrotrones», y por este motivo se denominó a esta onda de radio «radiación sincrotrón».

Algunas fuentes eran alargadas y tenían el aspecto de mancuernas; otras parecían ser pequeñas y punteadas como una estrella. Cuando se cambió la banda de frecuencias, se descubrió en la posición del objeto 3C 48 algo

similar a una estrella en la luz visible. Sin embargo, los análisis espectrográficos de esas supuestas estrellas arrojaron más preguntas que respuestas: el objeto 3C 48 mostraba unas líneas de emisión de longitudes de onda desconocidas. Aquel código de barras en la luz no podía asignarse a ningún elemento conocido. ¿Se había descubierto acaso un nuevo objeto en el espacio?

John Bolton y su coautor, Jesse Greenstein, reflexionaron si no podía tratarse tal vez de la luz desplazada al rojo del hidrógeno, pero incluso esto parecía demasiado extremo, porque entonces ese objeto tendría que hallarse a unos cuatro mil quinientos millones de años luz de distancia en el cosmos. «Yo ya tenía una reputación de extremista y temía pasarme de la raya», diría Greenstein tiempo después.

El argumento más potente contra la hipótesis de esa distancia increíblemente grande era que en tan solo unos pocos meses el punto de luz cambiaba su luminosidad de una manera espectacular. ¡Aquello no podía ser ninguna galaxia! ¿Cómo iban a ponerse de acuerdo miles de millones de estrellas que estaban separadas varios centenares de miles de años luz para variar conjuntamente el ciclo, de modo que su luz acumulada se volviera unas veces más brillante y otras más oscura en el intervalo de un mes y casi al mismo tiempo?

Imaginemos a los ocho mil millones de seres humanos en la Tierra aplaudiendo a la vez. No oiríamos nunca un impulso de sonido breve y claro, sino solo un murmullo suave y constante, pues el sonido se expandiría desde cualquier punto del planeta, pero nunca llegaría simultáneamente a un receptor.

De todas formas, a partir de la longitud de onda de la nota y de la velocidad del sonido, puedo calcular al menos el tamaño de la fuente. Cuanto más breve es la nota, más pequeña tiene que ser la distancia de la que proviene. Si escucho un aplauso de un segundo, entonces todas esas personas deben de estar sentadas en un estadio, pues eso es aproximadamente el tamaño de un solo segundo de sonido. También podría ser algo más pequeño, por supuesto. Justo eso mismo ocurre en el caso de las fuentes cambiantes de luz. Si varían en el periodo de un mes, entonces no pueden tener un tamaño más grande que un mes luz, lo cual es mucho menos que la distancia entre nosotros y la estrella más cercana. Y es que 3C 48 debía de ser una estrella, ¿o no?

Los astrónomos se ocuparon a continuación de la radiofuente más nítida y más próxima del catálogo, la 3C 273. Para determinar su posición exacta, los

radioastrónomos del Observatorio Parkes, en Australia, emplearon un truco con ayuda de la Luna. Su órbita cruzaba por casualidad la posición del cuásar en el cielo, y cuando el satélite terrestre se desplazó frente a la radiofuente, la señal desapareció durante un tiempo breve de la pantalla de la gran antena. Sucede lo mismo que en un eclipse de sol, solo que aquí la Luna no tapó al Sol, sino al misterioso objeto generador de la radiación.

Justo en el instante de la desaparición de la onda de radio, los astrónomos obtuvieron la primera coordenada del objeto: debía de estar en algún lugar del borde delantero de la Luna. Consiguieron la segunda cuando el borde posterior de la Luna volvió a liberar la onda de radio de 3C 273. Dado que se conocía el tamaño del diámetro de la Luna y dónde se encontraba con exactitud, pudo calcularse la posición precisa por la intersección de ambas coordenadas.

Dicho sea de paso, 3C 273 es ciertamente una de las radiofuentes más claras en el cielo, pero si la comparamos con las frecuencias de los teléfonos móviles es tan solo cinco veces más clara que la de un teléfono móvil LTE en la Luna que midiéramos desde la Tierra. Cuando se conoció la ubicación de 3C 273, Maarten Schmidt, un neerlandés que trabaja en el Instituto Tecnológico de California, en Pasadena, escaneó esa región con el telescopio del Monte Palomar. Encontró una estrella razonablemente brillante, tan brillante que hoy en día hasta un astrónomo aficionado puede dar con ella en la constelación de Virgo con un telescopio aceptable. Schmidt registró de inmediato el espectro de la estrella. Su código de barras volvía a ser muy extraño. Al cabo de seis semanas reconoció por fin un patrón y tuvo la certeza de que se trataba del espectro del hidrógeno de un objeto que se hallaba a la inconcebible distancia de dos mil millones de años luz. Sin embargo, la expansión del universo había espaciado tanto la luz que se había desplazado un 16 por ciento hacia el rojo y aparecía en un lugar en el que nadie se esperaba.

Los datos de Schmidt eran tan buenos que se atrevió a publicarlos. Sin duda, no sabía tampoco qué debía de ser aquella estrella, pero eso no le arredró. Como ese objeto se parecía a una estrella pero probablemente no lo era, lo denominó sin más «radiofuente cuasi-estelar» o QSR, a falta de un nombre mejor. En la jerga de los astrónomos pasó a llamarse «cuásar». «Fue como si de repente nos hubieran retirado la venda de los ojos, y reconociésemos que una estrella no es una estrella», diría Schmidt posteriormente<sup>[84]</sup>.

Hoy en día nos resulta difícil imaginar la agitación que provocó ese descubrimiento. Una vez más, el horizonte del universo visible se había extendido, el cosmos había estallado, literalmente.

Todo el universo parecía cambiar y evolucionar con el tiempo. La era de los cuásares tuvo lugar hace diez mil millones de años, el momento en que fueron más activos. Su número se incrementó con rapidez en los primeros cuatro mil millones de años de nuestro universo e iluminó todo el cosmos. En las siguientes eras del cosmos, los cuásares fueron apagándose uno tras otro.

Ahora bien, ¿qué era exactamente 3C 273? Las conclusiones derivadas de las observaciones fueron espectaculares. Si 3C 273 podía seguir viéndose todavía con tanta claridad en la Tierra pese a aquella impresionante distancia, entonces debía de brillar con cien veces más intensidad que una galaxia entera. Y si esa cuasiestrella destellaba en un intervalo de unas pocas semanas y meses, no podía ser, por tanto, más grande que un mes luz; probablemente tan grande como un único sistema solar.

Así pues, 3C 273 debía de ser un lugar muy inquietante, barruntaron los astrónomos. De ese objeto parte una energía inimaginable, y toda ella proviene de un punto relativamente pequeño en el universo. ¿Cómo puede generarse tantísima energía en una zona tan diminuta del espacio? Fueran lo que fuesen esos cuásares, al principio llevaron a la desesperación a los astrónomos más inteligentes. Nadie se había topado todavía con semejante gigantismo en la astrofísica.

Las reflexiones de algunos investigadores se dirigieron rápidamente a la mayor de todas las fuerzas en el espacio, la fuerza gravitatoria. Cuando algo brilla tanto es porque dispone de una masa de un tamaño inconcebible. Sir Arthur Eddington había desarrollado este argumento originariamente para las estrellas, porque también la luz ejerce presión. Si una estrella irradiara demasiada luz, explotaría, igual que un globo que se infla en exceso. Solo una fuerza gravitatoria masiva es capaz de mantener unido un cuerpo celeste tan gigantesco, teniendo en cuenta su propia luminosidad.

Si empleamos el argumento de Eddington para calcular la masa mínima que se precisa para mantener unido un cuásar, el resultado es un valor de casi mil millones de soles. Era para volverse loco. ¿La luz y la masa de mil millones de soles podían caber en un único sistema solar?

Seis años después del descubrimiento de los cuásares, el astrofísico inglés Donald Lynden-Bell tuvo una inspiración acerca de la manera de solucionar esas contradicciones. ¿Y si hubiera agujeros negros supermasivos en el centro de las galaxias? Nada de un pequeño agujero negro estelar nacido a partir de

una única supernova, sino mil millones de cadáveres de estrellas, fusionados en un gigantesco Moloch. Solo un objeto así podría liberar tanta energía sin despedazarse al mismo tiempo. Y además era lo suficientemente pequeño.

Ahora bien, ¿cómo puede irradiar un agujero negro? ¿No debería ser negro? Sí, el agujero negro en sí es oscuro, pero no el gas que es atraído por él y que está a punto de desaparecer en su interior. Este se apresura con una energía inconcebible hacia el agujero negro y se calienta por la energía gravitatoria, el momento angular y la fricción. Al mismo tiempo, los agujeros negros son de una eficiencia increíble, pues hacen que todo baile casi a la velocidad de la luz.

Imaginémonos una bola de metal del tamaño de un puño. Si la lanzamos a la pista de petanca, la bola caerá al suelo produciendo un sonido intenso y provocará un pequeño cráter. Si metemos esa misma bola en un cañón de artillería y la disparamos a un kilómetro por segundo, la bola atravesará muros. ¿Qué ocurriría si la dejáramos caer en la dirección de un agujero negro y alcanzase casi la velocidad de la luz? Sería trescientas mil veces más rápida que la bola del cañón artillero. Ahora bien, como la energía cinética aumenta con el cuadrado de la velocidad, la bola de petanca tendría ahora cien mil millones de veces más energía. Su energía total alcanzaría entonces un valor aproximado de diez mil millones de kilovatios hora. Con la energía de impacto de una única bola de ese tipo podrían abastecerse de energía tres millones de hogares en Alemania durante un año.

Eso suena a algo unimaginable, pero los agujeros negros son capaces de tal hazaña. Cuando el polvo y el gas entran en el campo gravitatorio de un agujero negro, se origina, igual que en el caso de las estrellas jóvenes, un disco turbulento de gas y de campos magnéticos, el denominado «disco de acreción». Y ese gigantesco remolino va a toda pastilla por el borde interior, tan solo un poco más lento que la velocidad de la luz en torno al agujero negro. El gas se calienta por la fricción magnética e irradia una luz deslumbrante. El agujero supuestamente oscuro fulgura igual que una brillante estrella azul. Una pequeña parte del plasma caliente que afluye sale disparado al espacio por los campos magnéticos en un gigantesco chorro candente, los denominados jets. Su aspecto se asemeja, en efecto, al chorro de propulsión de un avión. Solo unas pocas partículas afortunadas consiguen lo que se les niega a todas las demás: son capaces de librarse del agujero negro. Igual que en la corona solar, las partículas son aceleradas en los campos magnéticos y emiten la luminosa radiación sincrotrón. Es justo ese jet



caliente, emisor de radiación, magnetizado y concentrado lo que vemos de los cuásares con nuestros radiotelescopios.

La eficiencia de ese torbellino gravitacional y de su jet es enorme, es hasta cincuenta veces mayor que en la fusión nuclear de las estrellas. Por consiguiente, los agujeros negros son las centrales de energía más eficientes del universo. En lugar de mi bola de petanca, podría verter un litro de agua en un agujero negro para generar la energía necesaria para una ciudad de millones de habitantes. Tengo el agua, sí, pero por desgracia me falta el agujero negro correspondiente; en caso contrario, tendríamos resueltos de un plumazo todos nuestros problemas energéticos.

Los cuásares tienen una sed gigantesca y engullen cada segundo el equivalente a cuarenta y cinco veces toda el agua de la Tierra; eso se corresponde con la masa de un sol entero por año. Los agujeros negros no trabajan de una manera especialmente sostenible, pues ya no puede reciclarse el agua engullida por ellos en un cuásar. Lo que se fue, se fue. Un agujero negro es extremadamente egoísta. Con cada sorbo se vuelve cada vez más pesado, más grande, más atrayente, más amenazador.

De una manera indirecta, los astrónomos habían descubierto con 3C 273 el primer agujero negro. Sin embargo, ni de lejos todos los miembros de la comunidad científica compartían la hipótesis de la existencia de los agujeros negros y de los cuásares. Tendrían que pasar algunas décadas hasta que esa teoría se convirtiera en un paradigma. Algunos creían que los cuásares eran objetos estelares escupidos por las galaxias. Para los astrónomos actuales, esas teorías son estrafalarias, pero de hecho se debatieron. Y es que el camino por recorrer hasta la demostración definitiva aún sería muy largo.

## LA MEDICIÓN DE LA GRAN EXPLOSIÓN

Simultáneamente al descubrimiento de los cuásares comenzó a desarrollarse con rapidez nuestra comprensión del cosmos como un todo. En 1964, Arno Penzias y Robert Woodrow Wilson comenzaron a escuchar el cielo con una antena de telecomunicaciones en los Laboratorios Bell. La antena se asemejaba a un gigantesco estetoscopio. Al principio no les gustó nada lo que grabaron con ella, pues procedente de todas las direcciones recibían un ruido como de una interferencia débil, constante y perturbadora. Revisaron todos

los cables, ahuyentaron a las palomas y limpiaron sus excrementos de la antena; sin embargo, esa señal seguía siendo perceptible. Al final, extrajeron la conclusión de que existía un ruido de fondo cósmico de microondas<sup>[85]</sup>, porque la radiación provenía uniforme del espacio. Sus propiedades encajaban por completo con la radiación térmica de una lona negra opaca que abarcaba todo el cielo, con una temperatura aproximada de 3 grados en la escala absoluta Kelvin. Eso corresponde a -270 grados Celsius, solo tres grados por encima del cero absoluto, ¡en el que ya nada se mueve! Por ello se habla también de la radiación de fondo 3K o radiación de 3 grados. Se trataba de los restos de la bola de fuego de la Gran Explosión, y Penzias y Wilson recibirían posteriormente el Premio Nobel de Física por su descubrimiento.

En la fase temprana del universo, el espacio estaba lleno de gas extremadamente caliente y opaco. Los protones y los electrones viajaban en un caos terrible. Ahora bien, cuanto más se expandía el universo, más frío se volvía. Trescientos ochenta mil años después de la Gran Explosión, estaba aún a unos tres mil grados Kelvin, tan caliente como el acero al rojo vivo, pero lo suficientemente frío para que los protones, con su fuerza de atracción eléctrica, pudieran atrapar a los electrones y formar los primeros átomos. Entonces, el espacio se convirtió en un mar lleno de gas hidrógeno, que era transparente.

Los electrones libres, que antes habían absorbido toda la luz como pequeñas antenas, quedaron atrapados de pronto en los átomos; la lona fue retirada, la luz quedó libre y desde entonces nos llega su brillo sin obstáculos. Debido a la expansión del universo, nos hemos ido alejando cada vez más de una parte de esa luz. Las ondas luminosas que siguen llegándonos fueron separadas en un factor mili durante los trece mil ochocientos millones de años de la rapidísima y constante expansión cósmica, y entretanto se han enfriado. En lugar de las ondas correspondientes a tres mil grados Kelvin, en la actualidad recibimos solo una radiación superfría, de tres grados Kelvin. La radiación térmica se ha convertido en el hálito congelado de la Gran Explosión que llega hasta nosotros. Sin embargo, a través de él estamos mirando hacia atrás, hacia el tiempo primigenio cósmico, cuando el universo se parecía a una caldera de acero líquido al rojo vivo. Más atrás y más adentro hacia la Gran Explosión ya no se puede ver. El descubrimiento del fondo cósmico de microondas, inesperado para muchos, se convirtió en la prueba decisiva para el modelo de la Gran Explosión: tenemos ante nuestros ojos el comienzo del espacio y del tiempo.

En los años noventa, el satélite COBE midió la onda de radio cósmica con una precisión extrema y encontró pequeñísimas variaciones en el brillo. Proceden de las ondas del mar primigenio de hidrógeno, y fueron las precursoras de los primeros supercúmulos que en el transcurso de la historia del universo se agruparon para formar galaxias y cúmulos de galaxias. Con los satélites WMAP y Planck de la NASA y de la ESA, así como a través de muchos otros experimentos, esas semillas de las actuales vías lácteas han sido medidas en detalle y nos proporcionan visiones minuciosas de la historia y de la estructura del cosmos.

En los grandes y detallados exámenes del cielo de finales de la década de 1980, los astrónomos descubrieron que las galaxias no están repartidas en el universo de una manera homogénea, sino en estructuras afiligranadas, y aparecen en grandes agrupaciones. Así que las galaxias son más sociables y atractivas de lo que se piensa, y a menudo se superponen formando grandes cúmulos.

Las vías lácteas en estos cúmulos de galaxias no permanecen quietas, por supuesto, sino que se mueven unas alrededor de las otras por la influencia de la fuerza gravitatoria. A menudo pasan rozándose a una velocidad de más de mil kilómetros por segundo. Vistas durante miles de millones de años, las galaxias se mueven también como un banco de peces. A veces, dos o tres galaxias se atraviesan mutuamente, forman una galaxia nueva más grande y adoptan la forma de una esfera imponente o de un puro habano. Las denominamos «galaxias elípticas»; una de ellas es la M87. Sin embargo, sus estrellas no colisionan prácticamente nunca porque están muy separadas. Solo se influyen unas a otras mediante sus respectivos campos gravitatorios.

Las galaxias más masivas se hunden hacia el centro del cúmulo y aumentan de tamaño. Sus agujeros negros también se fusionan; de esta manera, las vías lácteas más grandes y más masivas suelen situarse en el centro de un cúmulo de galaxias y albergar los mayores agujeros negros del universo. Son los monstruos entre los gigantes. Así se originó también M87 en el centro del cúmulo de Virgo, el mayor centro galáctico de aglomeración en nuestro entorno. De todas las galaxias y agujeros negros en la categoría de los «pesos superpesados» del espacio, M87 es la más cercana a nosotros.

A Fritz Zwicky, un astrónomo suizo que investigaba en el Instituto Tecnológico de California, en Pasadena, le llamó la atención ya en 1933 el hecho de que estas galaxias se moviesen a una velocidad tan elevada. La fuerza gravitatoria de las estrellas no era tan intensa como para retener a las galaxias turbulentas; de hecho, tendrían que haberse separado en todas

direcciones. Sin embargo, no lo hacían, así que debía de existir alguna fuerza misteriosa que se lo impidiera y las retuviera. Si se tratara de la fuerza gravitatoria, entonces tendría que haber alguna materia oscura oculta, y además sería entre cinco y diez veces más frecuente que la materia normal que conocemos.

En los años setenta, la astrónoma Vera Rubin utilizó telescopios ópticos y el efecto Doppler para medir la velocidad del movimiento de las galaxias. Y estas parecían estar rotando un poco más rápido de lo que deberían. Esto lo confirmó también el neerlandés Albert Bosman, quien investigó este fenómeno con el nuevo radiointerferómetro en Westerbork. Vio gas, del cual no se había originado todavía ninguna estrella, que llegaba mucho más allá que la galaxia que puede verse con los telescopios ópticos. También allí todo giraba a demasiada velocidad. Las galaxias debían de estar llenas de esa materia oscura que las mantenía juntas. Sin ella, saldrían desperdigadas como cuencos de sopa en la mesa giratoria de un restaurante chino a la que hiciéramos girar con un impulso excesivo.

En la actualidad seguimos sin saber qué es la materia oscura. Algunos colegas consideran absurda esta teoría, y afirman que no existe en absoluto y que las leyes de la gravitación universal a escala galáctica son simplemente erróneas. No obstante, la mayoría de los astrónomos de hoy parten de la base de que la materia oscura se compone de una familia todavía desconocida de partículas elementales.

El asunto se volvió aún más confuso cuando en los años noventa se exploró sistemáticamente el cielo a la búsqueda de supernovas cuya luminosidad podía evaluarse sin problemas. Se constató que brillaban mucho menos de lo que cabía esperar a causa de la expansión del universo y de la ley de Hubble-Lemaître. ¿Estaban mucho más lejos? En ese caso, el universo debería de haberse expandido recientemente a una mayor velocidad de lo que se pensaba. Desde entonces, la energía oscura forma parte también de nuestra visión del mundo física y astronómica. Se trata de una energía desconocida y misteriosa que está separando el universo a una velocidad cada vez mayor. Esa fuerza oscura ya estaba oculta en las ecuaciones de Einstein como una constante cosmológica, pero este la rechazó en algún momento como su «mayor burrada».

Las simulaciones y las mediciones más modernas del cosmos confirman que al lado oscuro le pertenece alrededor del 85 por ciento de toda la materia existente en el cosmos. El otro 15 por ciento es materia normal, la denominada «materia bariónica», tal como la conocemos. Además, en

relación con el universo entero, la energía oscura contiene más del doble de energía que la materia oscura y normal juntas. Al fin y al cabo, la masa es igual a la energía, según la famosa ecuación de Einstein  $E = mc^2$ . Por consiguiente, solo el 5 por ciento de la energía total del universo se halla en la forma de la materia que conocemos en la Tierra, los átomos y elementos de la tabla periódica. La procedencia del imponente resto se halla en la oscuridad, en el sentido más literal de la expresión.

Los colegas suelen describir también este descubrimiento como otra revolución copernicana: el ser humano no está en el centro del universo, ni de la Vía Láctea, ni de nuestro sistema solar, y nosotros y todo nuestro mundo estamos hechos de un tipo de materia que es una rareza exótica en el espacio. Sin embargo, yo prefiero contemplar esto a la inversa: hemos aprendido que estamos tejidos con un hilo muy especial.

La materia oscura y la energía oscura no tienen nada que ver directamente con los agujeros negros, por muy misteriosas y enigmáticas que parezcan. Sin embargo, la materia oscura puede caer también sin problema en los agujeros negros y hacerlos crecer. Es probable que esto suceda en muy pequeña medida, ya que la materia oscura está repartida de forma muy diluida y espaciada en el centro de las galaxias. Por otro lado, la energía oscura solo puede reconocerse en las grandes escalas del universo y, en principio, no debería cambiar la estructura de los agujeros negros, de la misma manera que una brisa no puede realmente derribar el monte Everest a corto plazo, a pesar de que la masa total de aire de la Tierra es diez mil veces más pesada que esa montaña. De todos modos, la naturaleza desconocida de la energía oscura y de la materia oscura deja lagunas en nuestra comprensión de la física. Una nueva teoría del espacio y del tiempo que tenga en cuenta ambas podría transformar también las ecuaciones de los agujeros negros.

## **TERCERA PARTE**

### **El viaje a la imagen**

Mis experiencias en el camino hacia la primera imagen de un agujero negro

# 1

## El centro galáctico

### FASCINACIÓN POR LAS TOLVAS DE BASURA

Pasé mi infancia cerca del sur de la ciudad de Colonia, a diez minutos a pie de los edificios de la Facultad de Física de la universidad. Más tarde, asistí allí a mi primera clase e incluso fui profesor auxiliar por poco tiempo. Sin embargo, cuando era pequeño, mi mundo se hallaba frente a nuestra casa, en la acera, donde siempre había una pandilla de niños y niñas jugando. La calle seguía teniendo adoquines y el momento estelar de la semana era cuando los basureros, con sus monos de trabajo de color naranja, sacaban del patio trasero de la casa los contenedores grandes de la basura y los llevaban rodando con habilidad hasta el camión. Yo quería ser un basurero así y conducir un camión como aquel, capaz de levantar esos contenedores enormes y de tragarse la basura. Con solo accionar una palanca, los hombres movían una máquina tan potente como aquella, y eso me fascinaba. Mi futuro profesional estaba decidido ya: ¡cualquier oficio con máquinas impresionantes!

Más tarde me decidí por la física y en mi tesina quise ocuparme de los agujeros negros. Descubrí sorprendentes paralelismos con mi fascinación de la infancia: los agujeros negros son tolvas cósmicas de la basura e increíblemente atractivos, no solo para las estrellas grandes, sino también para los pequeños estudiantes. El profesor Peter Biermann fue mi director de tesina; solía manifestar un trato muy humano con los estudiantes, siempre tenía ideas locas y le encantaba debatirlas con nosotros. Además, conocía el mundo entero, viajaba mucho y sabía qué temas estaban en la vanguardia de la astronomía. Y algo aún más importante: gracias a sus numerosos viajes podíamos trabajar sin estorbo. Mis propios estudiantes de doctorado conocen

también esa sensación, porque yo también viajo mucho. No obstante, Biermann siguió siendo un físico de la vieja escuela y con un trozo de tiza sabía trasladar rápidamente a la pizarra todas las formulaciones importantes y calcularlas con logaritmos. Ya su padre, Ludwig Biermann, había sido director del Instituto Max Planck de Física y Astrofísica en Múnich y había publicado artículos importantes sobre el campo magnético del Sol. En la casa de los Biermann habían sido huéspedes celebridades como Werner Heisenberg y Otto Hahn, a quien el jovencito Biermann llamaba «tío Otto» por aquel entonces.

Sin embargo, el gusto por los agujeros negros no me acometió en las aulas de la universidad, sino al leer un trabajo de Charlie Townes y Reinhard Genzel en la revista *Spektrum der Wissenschaft*. En ese artículo, los autores sugerían que también en el centro de nuestra Vía Láctea podría hallarse un extraño agujero negro supermasivo, con una masa de alrededor de dos millones de soles<sup>[86]</sup>.

Quedé entusiasmado al instante, pues aquel artículo me dejaba claro que estaban teniendo lugar muchos sucesos emocionantes en la astrociencia. También me pareció fascinante la física de partículas, pero por aquella época no se producían avances significativos. Se planeaba construir grandes aceleradores, pero hasta que estuvieran listos y proveyeran resultados, aún tendrían que pasar algunas décadas. «Un agujero negro en el centro de nuestra galaxia», esta idea misteriosa me gustó al instante.

Además, la gravitatoria era la última fuerza no entendida. Se resistía firmemente a cualquier unificación con la física cuántica y las demás fuerzas de la naturaleza. La gravedad es la gran cortapisa en el camino hacia una fórmula universal. No tenía ni idea de cómo sería una fórmula semejante, pero no haría daño a nadie ponerse a buscarla. Tal vez podía añadir una piedrecita al edificio de la física. Cuando planeas construir una casa, ayuda mucho saber qué tipo de casa quieres construir. Y al planear una carrera profesional ocurre algo parecido; hay que saber adónde se quiere llegar. Pensé que si estaba sucediendo algo emocionante en alguna parte, sin duda alguna era en el borde de los agujeros negros.

Aquellos eran tiempos de aventuras. Entretanto me había mudado a Bonn, al Instituto Max Planck de Radioastronomía, y allí compartía con dos colaboradores un diminuto despacho. Uno de los escritorios incluso sobresalía un poco por el pasillo. Para mi tesina, Peter Biermann me formuló la pregunta teórica de si el disco de acreción de un cuásar no podría emitir vientos similares a los que conocemos de las estrellas. Asombrosamente, los discos de



materia que giran alrededor de agujeros negros supermasivos poseen unas propiedades similares a las de las estrellas calientes aplanadas. Entonces, la elevada presión de radiación de la luz debería retirar de un soplo las capas exteriores del disco. Semejantes vientos extremos los conocemos de las estrellas muy calientes, desde las cuales se arroja muchísimo material al espacio. En el caso de los agujeros negros, hay que tener en cuenta, además, que la luz es desviada y enfocada por la curvatura del espacio. Así que calculé cómo se mueve el gas en la luz de los cuásares y cómo los agujeros negros desvían la luz en su centro.

El tema era muy interesante, y ese efecto acabaría por ser encontrado, por supuesto, tiempo después; sin embargo, en ese momento solo era puro entretenimiento teórico. En 1992 comencé con mi tesis doctoral sobre ese mismo tema. Peter Strittmatter, director del Observatorio Steward, en Arizona, y buen colega de mi director de tesis, vino un día de visita para planear con la gente de Bonn un nuevo radiotelescopio de ondas submilimétricas allí. Le hablé con orgullo acerca de mi proyecto. Él escuchó con atención y cortesía, pero por dentro bostezaba. Mi tema no pareció cautivar tampoco a otras personas.

No obstante, 1992 fue un año excitante que dio un nuevo rumbo a mi vida. Nuestra hija divisaba la luz del día y en el centro de la Vía Láctea de repente se hizo visible un mundo nuevo.

## EL CORAZÓN OSCURO DE LA VÍA LÁCTEA

Apenas descubiertos los cuásares y desarrollada la idea de los agujeros negros, se siguió pensando más allá. Si a miles de millones de años luz de distancia, en los primeros tiempos tormentosos del cosmos, se encontraban ya gigantescos agujeros negros en el centro de las vías lácteas, entonces no podían haber desaparecido así como así. Y si existen algunas galaxias con agujeros negros, ¿por qué no debían albergarlos también todas las demás?

Los astrónomos se dieron cuenta enseguida de que pasaban cosas extrañas en el centro de las galaxias de nuestro entorno, a una distancia de tan solo cincuenta millones de años luz. Sus núcleos parecían irradiar mucha claridad, arrojaban radioplasma y en torno al centro se arremolinaba un gas caliente y brillante. Se tenía conocimiento de tales destacables galaxias desde los años

cuarenta y fueron bautizadas con el nombre de su descubridor, Seyfert. ¿Hacían también de las suyas en ellas los agujeros negros? En los años setenta y ochenta, los astrónomos reunieron toda una serie de galaxias sospechosas de albergar agujeros negros. A todas ellas se las denominó *active galactic nuclei*, «núcleos activos de galaxia», y también en este ámbito de la investigación la actividad iba viento en popa. Así pues, ¿se hallaba en el centro de nuestra propia Vía Láctea también un monstruo devorador de masa?

Fue justo esta hipótesis la que ya formularon en el año 1971 los astrofísicos británicos Donald Lynden-Bell y Martin Rees. Predijeron que un radiointerferómetro intercontinental, es decir, un experimento VLBI, podría descubrir en el centro semejantes radiofuentes compactas como un agujero negro.

Los radioastrónomos se pusieron de inmediato a la búsqueda, y tres años después, Bruce Balick y Robert Brown descubrieron un objeto como ese en el centro de nuestra Vía Láctea con la ayuda del radiointerferómetro de la localidad de Green Bank. Se adelantaron así por muy poco al equipo de Ron Ekers y Miller Goss, de la Universidad de Groninga, que habían combinado los datos de un interferómetro ubicado en el valle Owens, en California, con los del radiointerferómetro recién estrenado en el antiguo campo de concentración de Westerbork, en los Países Bajos, y confirmaron el descubrimiento de ese misterioso objeto emisor de radiación.

Esta nueva radiofuente se halla en medio de una zona conocida como Sagitario A, considerada el corazón de la Vía Láctea, el «centro galáctico». Sagitario A es simple y llanamente la primera y más brillante radiofuente situada en la constelación de Sagitario. La segunda radiofuente más brillante se llama Sagitario B. Algunos años después del descubrimiento de Balick y Brown, en los artículos seguía hablándose solo de la «radiofuente compacta en el centro galáctico», hasta que a Robert Brown le pareció que la cosa pasaba de castaño oscuro y abrevió aquello como «Sagitario A\*». El asterisco pretendía expresar tan solo que se trataba de un objeto muy excitante. Como los astrónomos somos muy poco dados a teclear mucho, la expresión siguió abreviándose y ya solo se habla de «Sgr A\*»<sup>[87]</sup>. Los periodistas científicos se llevan las manos a la cabeza con desesperación cuando piensan en esas denominaciones astronómicas, pero para nosotros, los astrónomos, es algo muy natural y del todo normal.

Pronto se hicieron también mediciones VLBI de Sgr A\* y se esperaba obtener imágenes más nítidas, pero los resultados fueron decepcionantes. Ese objeto tenía un aspecto soso, era una mancha casi redonda y ligeramente

aplanada. Nadie se había imaginado un agujero negro tan poco espectacular. En los siguientes años se emplearon frecuencias cada vez más altas que prometían imágenes mucho más claras, pero seguía viéndose tan solo una mancha, y para más inri, una más pequeña. Entonces se hizo la luz entre los radioastrónomos. La Vía Láctea es para las ondas de radio como un gigantesco cristal opalescente que difumina las estructuras finas. Solo se distingue una imagen borrosa de lo que sucede en su centro; el gas caliente y el polvo en el disco de la galaxia nos ocultan la vista. ¡Qué decepción!

Esto afectaba de una manera más intensa a la luz visible. Las nubes densas de gas y polvo en el disco de nuestra Vía Láctea no solo dispersan la luz visible, como ocurre con las frecuencias de radio, sino que la absorben por completo y blindan todas las miradas por detrás de esa «cortina». ¿Iba a guardar la Vía Láctea su secreto para siempre?

Justo estaba comenzando mi tesis doctoral, cuando de pronto se corrió ese velo. Expertos de toda Alemania se reunieron en Bonn en un minicongreso espontáneo e informaron sobre sus hallazgos más recientes, todavía inéditos, sobre nuestro centro galáctico. Me quedé electrizado.

En 1988, el grupo en torno al director de Bonn de por aquel entonces, Peter Mezger, y su colaborador, Robert Zylka, había realizado mediciones por primera vez de Sgr A\* en una longitud de onda de 1,3 milímetros. Justo esa frecuencia de ondas milimétricas sería la que emplearíamos para nuestra imagen. Ellos solo disponían de un único telescopio y no pudieron obtener imágenes nítidas, pero parecía que Sgr A\* irradiara con una intensidad sorprendente. Sin embargo, aún más sorprendente fue que en frecuencias más elevadas, en el infrarrojo lejano, la radiación se interrumpía dramáticamente y ya no era posible ver nada más. Así pues, ¿qué generaba esa radiación de ondas milimétricas? ¿Un gas ultracaliente en las proximidades del agujero negro o solo una nube de polvo caliente más alejada?

En los años noventa, los grupos del Instituto Max Planck en Bonn y del Observatorio Haystack del MIT en Boston habían realizado un trabajo pionero con el desarrollo de la VLBI en frecuencias milimétricas. Mi colega de Bonn, Thomas Krichbaum, acababa de efectuar las primeras mediciones VLBI de Sagitario A\* a cuarenta y tres gigahercios, es decir, en una longitud de onda de siete milímetros, y expuso sus flamantes resultados. Eran las imágenes más nítidas que jamás se habían tomado de ese objeto en las longitudes de onda más cortas. El efecto de cristal opalescente sobre la radiación disminuye a razón de la raíz cuadrada de la longitud de onda, siendo menor cuanto más cortas sean las ondas. Así, parecía que por fin podría

distinguirse algo más que una simple y aburrida mancha. En una dirección, la mancha se abultaba un poco. ¿Estábamos viendo ahí los contornos difusos de un pequeño chorro de plasma, tal como los conocemos de los grandes cuásares?

El momento culminante de aquel minicongreso fueron, sin embargo, los resultados espectaculares del grupo de Reinhard Genzel, del Instituto Max Planck de Física Extraterrestre en la localidad de Garching, cercana a Múnich. Junto con Andreas Eckart había enfocado una cámara de infrarrojo cercano hacia el centro galáctico. Empleamos tales cámaras como dispositivos de visión nocturna porque con ellas podemos ver la radiación térmica de seres humanos que, de otro modo, resulta invisible al ojo humano. Esta luz posee una longitud de onda mucho más larga que la luz que captan nuestros ojos, pero por este motivo atraviesa con mayor facilidad el velo de polvo de nuestra galaxia. De pronto, en la oscuridad del centro podía verse algo, una luz brillante. ¿Se trataba del brillo del agujero negro?

Esa mancha de luz estaba muy borrosa y desenfocada, pues la atmósfera de la Tierra distorsiona la luz de las estrellas. Cuando esta, después de su largo viaje por el espacio, atraviesa las capas de aire, comienza a parpadear. Estamos familiarizados con este efecto en esos días tórridos de verano, en los que el aire asciende sobre las recalentadas carreteras asfaltadas, parpadea y forma estrías que desfiguran el paisaje. Esa distorsión también tiene lugar, a gran escala, en la atmósfera. En la Tierra tenemos la impresión de que las estrellas titilan. Sin embargo, contempladas desde el cosmos, no destellan en absoluto. Y justo por este motivo los telescopios espaciales son muy importantes para la investigación. De todos modos, el efecto de distorsión en la Tierra para la luz infrarroja cercana no es tan grave como para la luz visible.

Genzel y Eckart habían ideado un truco para obtener imágenes nítidas incluso desde la Tierra. En lugar de una larga exposición, realizaron una película a cámara lenta del centro galáctico. De esta manera pudieron capturar la danza turbulenta de la mancha de luz. En cada imagen por separado, la estrella estaba como congelada, y con el ordenador pudieron corregir aquellos saltos superponiendo las muchas imágenes con habilidad. La mancha del infrarrojo cercano se fue volviendo cada vez más nítida y se disgregó en veinticinco estrellas individuales. Así pues, la luz no procedía del agujero negro. De todos modos, uno de aquellos débiles puntos luminosos se hallaba muy próximo a la radiofuente Sgr A\*. ¿Se trataba por fin de la contrapartida tan anhelada a la radiofuente? Estábamos todos emocionados.

Durante mucho tiempo los astrónomos habían estado a la caza del agujero negro en diferentes longitudes de onda, pero, de nuevo, lo que se había tenido por Sagitario A\* era tan solo una estrella. Algunos años más tarde sucedió lo mismo. Si Sagitario A\* era un agujero negro, realmente era muy oscuro en todas las longitudes de onda, excepto en la luz de radiofrecuencia.

Si bien muchos de los acontecimientos sobre los que se informaron ese día eran tan solo suposiciones, y no del todo ciertas, yo tenía la profunda sensación de que estaba sucediendo algo especial y que se estaba abriendo una puerta nueva a los agujeros negros. Entonces se les veía solo como a través de un espejo borroso, pero en algún momento iba a ser posible verlos directamente.

#### UNA PRIMERA SOSPECHA

Cuando vimos las nuevas imágenes VLBI del centro galáctico, el profesor Biermann nos preguntó a mi compañero Karl Mannheim, que posteriormente fue profesor en Wurzburg, y a mí, si no podríamos explicar el centro galáctico como el jet de un cuásar. «Para ello solo precisarán una o dos semanas», añadió con una juguetona sonrisa. Este tema parecía interesar ahora a mi director de tesis y viajero incansable, pero también a Peter Strittmatter, que en esa época vino de nuevo desde Arizona a Bonn, y me escuchaba de pronto con mucha atención.

Así que dejé aparcados los vientos de los discos de los cuásares y me volqué en Sagitario A\*. Las dos semanas se convirtieron en treinta años, y todavía no he acabado. Ya no volvería a trabajar en el tema originario de mi tesis doctoral.

¿Qué es Sagitario A\*? Esa era la gran cuestión. ¿Cómo irradiaba? ¿Era realmente un agujero negro, un cuásar en miniatura? Sin embargo, Sagitario A\* era tan solo una lucecita mortecina. Si colocáramos el cuásar 3C 273 en nuestra Vía Láctea, su núcleo de radio sería cuarenta mil millones de veces más brillante que aquello que estábamos midiendo allí. Ahora bien, ¿podíamos comparar en realidad ambos objetos entre sí?

Empleábamos un modelo sencillo que Roger Blandford, uno de los principales astrofísicos a escala internacional, había desarrollado en 1979 junto a su estudiante de doctorado en aquel momento, Arieh Königl, para

describir la onda de radio del jet de los cuásares. De todos modos, añadimos la posibilidad de regular el rendimiento de esos chorros de plasma. Retirábamos un pie del acelerador para dar gas a los modelos de cuásar, por decirlo de alguna manera.

Podemos imaginarnos los jets cósmicos como los chorros de los motores a reacción de los aviones: el gas caliente se acelera y sale disparado a una velocidad elevada por el motor. Cuanto más acelera el piloto, más energéticos, ruidosos e intensos son los motores. En nuestro modelo de cuásar, los campos magnéticos son el motor y la energía viene determinada por la cantidad de materia que cae en el agujero negro. Si tomáramos solo un 10 por ciento, por ejemplo, de la energía generada por la entrada de materia y la guardáramos en campos magnéticos y en el jet, podríamos explicar la intensa onda de radio en los cuásares. Como los agujeros negros son, en comparación, criaturas simples, no comprendíamos por qué en principio Sagitario A\* tenía que ser diferente de sus hermanos mucho más brillantes.

Los cuásares engullen aproximadamente un sol por año. Si nuestro agujero negro absorbiera diez millones de veces menos masa, esa energía bastaría, de largo, para generar la onda de radio de Sagitario A\*. Por tanto, nuestro centro galáctico sería un agujero negro a dieta, si bien esta comparación es muy indulgente, pues diez millones de veces menos equivaldría a engullir tres lunas al año. Un pequeño agujero negro estelar, como los centenares de millones que existen en nuestra Vía Láctea, casi se atragantaría<sup>[88]</sup>.

También pudimos explicar el tamaño de la radiofuente, pues gracias al bajo rendimiento, el radioplasma no era mayor de lo que permitían las mediciones de VLBI de Krichbaum. El chorro de radio encajaría en la órbita de la Tierra; sería minúsculo en comparación con los cuásares. No es de extrañar que no pueda verse bien a una distancia de veintisiete mil años luz.

Simultáneamente a las observaciones de la VLBI de Krichbaum, presentamos nuestro trabajo teórico en la revista especializada *Astronomy & Astrophysics*. Pero aún me seguía llamando la atención un detalle raro. En nuestro modelo, la radioemisión brillaba como un arcoíris; diferentes colores de radio irradiaban del centro a diferentes intervalos. El modelo predecía que cuanto más pequeña fuese la longitud de onda, más cerca estaría la emisión de radio del agujero negro. Con una longitud de onda de siete milímetros, con la que Krichbaum había realizado sus mediciones justo antes, el plasma se encontraba todavía a una unidad astronómica del agujero negro; sin embargo, en la frecuencia de la longitud de onda de un milímetro, o menos aún, el

plasma debía proceder directamente de las proximidades del horizonte de sucesos. Trasladado al arcoíris, sería la luz violeta de la emisión de radio del anillo más interno.

Por tanto, la radiación de ondas milimétricas hallada por Mezger y Zylka ¿procedía directamente del horizonte de sucesos? A su favor estaba el hecho de que esta parecía interrumpirse con longitudes de onda aún más cortas. ¿Ya no irradiaba el gas desde allí porque había desaparecido detrás del horizonte de sucesos?

Expresé mi sospecha a Krichbaum y le pregunté si era posible realizar un experimento VLBI con esas frecuencias para ver entonces el horizonte de sucesos. Me respondió con una sonrisa: «Sí, estamos planeando hacer eso, pero, por desgracia, la Tierra no es lo suficientemente grande».

En 1979, la Sociedad Max Planck para la Promoción de la Ciencia, junto con el Centro Nacional de la Investigación Científica, en Francia, y el Instituto Geográfico Nacional, en España, había fundado un instituto nuevo: el Instituto de Radioastronomía Milimétrica (IRAM), en Grenoble. Este operaba con dos nuevos telescopios de ondas milimétricas en Francia y en España, y el Instituto Max Planck de Bonn construyó un tercero en Arizona, junto con su universidad. Quizá se podían interconectar los platos de radio para un experimento VLBI, pero aun así seguirían siendo muy pocos telescopios para obtener imágenes. Además, según Krichbaum, el agujero negro del centro de la Vía Láctea (y también todos los demás) era demasiado pequeño. Incluso un telescopio tan grande como la Tierra no penetraría lo suficiente en esas longitudes de onda como para ver el horizonte de sucesos. «¡Lástima!», pensé, pero esa idea me tendría ocupado algún tiempo, y nunca me abandonaría del todo.

#### LA MAYORÍA SILENCIOSA

Mi tesis doctoral abarcaba cinco artículos especializados, y al cabo de dos años que pasaron muy rápido, en el verano de 1994, estaba ya terminada con el título: «Agujeros que pasan hambre y núcleos activos». Sí, «agujeros que pasan hambre», porque contrariamente a la creencia popular, los agujeros negros no son, en general, unos monstruos de desenfrenada voracidad, sino que solo se comen lo que les ponen en la mesa. Puede que sean gigantescos

en nuestra imaginación, pero comparados con toda una vía láctea, son tan solo unos polluelos. E igual que los polluelos en el nido, los agujeros negros tienen que esperar la comida de polvo y de estrellas con que los alimenta la galaxia madre. Si esto no sucede, vegetan, se vuelven silenciosos y oscuros, y dejan de crecer, como ocurre con Sagitario A\*. Sin embargo, no mueren.

En mi tesis doctoral desarrollamos y corroboramos la hipótesis de que la radiación compacta de los agujeros negros tiene su origen en el mismo principio en todas partes: la radiación de gas caliente que los campos magnéticos expulsan en forma de jet desde el borde más interno del disco de acreción. El chorro expulsado y el gas entrante de los discos de acreción están estrechamente acoplados, son objetos casi simbióticos. Debería existir una constante universal de acoplamiento entre el disco de acreción y lo que se expulsa en el chorro. Expresado de una manera sencilla: si entra poco, sale también poco<sup>[89]</sup>.

Los agujeros negros aparecen como dragones de fuego en las imágenes de radio. Algunos son potentes y con sus chorros producen llamas visibles a mucha distancia; otros son débiles, sin fuerza, y de sus fauces solo escapa una pequeña llamarada. Sin embargo, casi todos producen jets, tanto los extrovertidos glotones, los cuásares, como los eremitas que ayunan en nuestra Vía Láctea y en las galaxias vecinas. Sí, incluso la radiación de radio de los pequeños agujeros negros estelares puede explicarse con ese jet. Lo único importante es concentrarse en la radiación directamente en las fauces y no dejarse sorprender por las enormes llamaradas de fuego de los grandes jets de plasma. Hay que saber con exactitud dónde mirar.

Finalmente, mi tesis doctoral exponía que la misma física se aplica en el caso de los cuásares, de los agujeros negros estelares y del centro galáctico. O, para expresarlo de una manera más técnica, los agujeros negros poseen la propiedad de la invariancia de escala, por lo que, independientemente de si son grandes o pequeños, en un principio tienen siempre el mismo aspecto cerca del horizonte de sucesos. Es que los agujeros negros son tremendamente aburridos; no tienen pelo, ni neurosis, ni granos. Así pues, ¿por qué iban a tener un aspecto cada vez diferente, al menos cuando se les mira directamente a las fauces<sup>[90]</sup>?

La mayoría de los agujeros negros no llaman mucho la atención. Alguna vez los he denominado la «mayoría silenciosa», pues funcionan como la mayoría de los seres humanos: solo poquísimos salen de la norma y se convierten en superestrellas excéntricas, llevan una vida excitante y atraen todas las miradas. Fue así como en los años noventa, después de la gran



promoción de los cuásares, el foco de atención se apartó también de la cósmica población media de agujeros negros, incluso en los medios de comunicación. A la vanguardia se hallaba el telescopio espacial Hubble.

Este telescopio había costado algunos miles de millones de dólares, fue lanzado al espacio en 1990 y al principio solo había titulares negativos sobre él porque sus espejos habían sido alisados incorrectamente. Varios astronautas colocaron lentes correctivas al observatorio espacial en una espectacular operación de rescate. El telescopio pudo asomarse al corazón de nuestras galaxias vecinas con una nitidez desconocida por aquel entonces y sus mediciones confirmaron los emocionantes indicios de los telescopios terrestres: al igual que en otras galaxias, las estrellas se movían a velocidades inusualmente elevadas alrededor de sus respectivos centros galácticos. ¿Había también agujeros negros en el núcleo de esas galaxias?

Los investigadores los denominaron con cautela *massive dark objects* («objetos oscuros masivos»), pero la bien engrasada maquinaria de la prensa de la NASA nos colmaba con regularidad con comunicados de prensa que anunciaban que el telescopio Hubble había descubierto de nuevo —y siempre por primera vez— un agujero negro en alguna galaxia. Más tarde sería el descubrimiento de agua en Marte o de un planeta similar a la Tierra que la NASA encontraba cada año, supuestamente por primera vez. Ahora bien, el telescopio Hubble no había detectado el agujero negro, por supuesto, sino tan solo el gas y las estrellas a gran distancia en torno a él.

A finales de mayo de 1994 llegó uno de estos primeros comunicados exitosos de la NASA, y el estudio de radio de la cadena WDR me invitó al programa juvenil *Riff, der Wellenbrecher* para informar al respecto. Esta transmisión en vivo tenía lugar el mismo día de la lectura de mi tesis, de modo que nada más doctorarme como radioastrónomo tuve que acudir a toda prisa al estudio para llegar a tiempo al inicio del programa. La joven locutora estaba un poco nerviosa porque todavía no había realizado ninguna entrevista sobre física, y yo nunca había ofrecido nunca una entrevista en directo en la radio. Sin embargo, la conversación pasó volando, ambos nos sentimos aliviados después.

El motivo de la entrevista eran las observaciones que el telescopio Hubble había efectuado de M87. Esta galaxia era una de las «manchas de niebla» que Charles Messier había descubierto desde el Hôtel de Cluny, en París. Heber Curtis, defensor de la teoría de los universos-isla, vio allí un curioso y brillante rayo de luz que apuntaba desde el centro de la galaxia hacia afuera. En los años setenta y ochenta, los radiotelescopios descubrieron que ese rayo

era un jet de plasma casi tan rápido como la luz, igual que los encontrados también en los cuásares y en las radiogalaxias, si bien mucho más débil.

Durante la entrevista en la radio conté cómo el telescopio espacial Hubble había descubierto que en el centro de M87 se habían condensado y agrupado de manera inimaginable dos mil millones de masas solares, y que probablemente se trataba de un agujero negro. Por consiguiente, era mil veces más pesado que el agujero negro central de nuestra Vía Láctea. La locutora se quedó algo perpleja, incluso a mí me parecía esa cifra increíblemente grande. Bueno, a los estadounidenses les gusta exagerar sus resultados, es probable que eso esté ocurriendo aquí también, pensé; pero a pesar de todo se trataba con toda seguridad de algo muy grande.

Con esa masa tan enorme, el agujero negro en M87 sería mil veces más grande que Sagitario A\*, pero como esa galaxia está también dos mil veces más alejada, el horizonte de sucesos nos parecería por lo menos dos mil veces más pequeño que el del centro de nuestra Vía Láctea, y ya este era muy pequeño. «Es una lástima, en realidad —pensé—, pero no acertar por poco es no acertar», porque también M87 tenía un núcleo de radio brillante y compacto que habría podido observarse del mismo modo en longitudes de onda cortas.

Si se pretende ver agujeros negros, hay que iluminarlos. Entonces seguro que nos sería de utilidad entender de dónde procede la luz y cuál resulta la más adecuada. Sin embargo, de pronto se convirtió en un asunto controvertido la procedencia real de las radiaciones de radio de los agujeros que pasan hambre. Ramesh Narayan, astrofísico estadounidense que trabaja en la Universidad de Harvard, investigó el aspecto de los agujeros negros que no se dan demasiados atracones. Afirmó que, a diferencia de los cuásares, una gran parte de la energía no es irradiada en absoluto, sino que desaparece en el agujero negro de una manera casi imperceptible en el gas tremendamente caliente.

En este punto le doy la razón a Ramesh Narayan. En otro punto, no obstante, teníamos concepciones muy distintas. En su modelo, la emisión de radio en el centro galáctico provenía del gas en el disco de acreción, justo antes de desaparecer en el agujero. En nuestro modelo, la radiación provenía del material que aún podía escapar del borde del agujero negro en forma de jet. En las radioimágenes de M87 podía verse esto incluso directamente. Así pues, ¿por qué iba a funcionar de una manera del todo diferente en nuestro centro galáctico? Nuestro modelo debería valer para todos los agujeros negros.

Una disputa entre dos adversarios desiguales; allí, un conocido profesor de Harvard, y aquí, un joven doctorando. Por suerte, a los organizadores de los congresos nada les gusta más que un buen debate académico, así que siempre me han invitado una y otra vez a discutir este asunto. Ahora bien, ¿quién tenía razón? ¿Cómo podía zanjarse esa disputa? Una cosa estaba clara: se precisaban nuevos datos de radio, ¡sobre todo de otros gigantes que pasaban hambre!

Lamentablemente, solo se disponía de pocos o de datos de radio obsoletos. De ahí que yo comenzara poco a poco a emprender mis propias observaciones para poner a prueba mi modelo. Escribí solicitudes de observación al VLA en Nuevo México, al VLBA en Estados Unidos y a nuestro telescopio de aquí, en Effelsberg, y me puse a la caza de agujeros negros en otras galaxias. Este era un trabajo del todo diferente a mis cálculos teóricos, pero no menos emocionante.

Cuando me permitieron asomarme por primera vez al espacio con el gran telescopio de cien metros ubicado en Effelsberg, en la región de Eifel, y comenzó a moverse su gran plato blanco en la dirección de las coordenadas celestes introducidas con solo apretar un botón, la sensación fue sublime. Tres mil toneladas de acero obedeciendo a los movimientos de mis dedos. Con los ojos como platos, admiré ese espectáculo compuesto de técnica y de ciencia, y me sentí como el chiquillo a quien por fin le permiten viajar en el «camión de la basura» más grande del mundo. En ese instante me quedó del todo claro que no solo iba a sentarme en mi escritorio para desarrollar mis teorías, sino que quería comprobarlas experimentalmente y poner a prueba mis modelos.

Me mudé con mi familia a Estados Unidos, donde pasamos dos años maravillosos en la apacible y pequeña ciudad de Laurel, para rastrear y cazar agujeros negros con radiotelescopios y con el telescopio espacial Hubble en la Universidad de Maryland y en el Space Telescope Science Institute de Baltimore.

#### LA DANZA DE LAS ESTRELLAS EN TORNO AL AGUJERO NEGRO

En Europa, el grupo de Reinhard Genzel andaba persiguiendo a Sgr A\* con los telescopios del Observatorio Europeo Austral (ESO), en Chile, primero con uno de 3,6 metros, y más tarde con el VLT, un telescopio de ocho metros.

Sin embargo, este grupo no estuvo mucho tiempo solo. Se desplegó toda una saga, y en ella, dos equipos de investigadores competían por el dominio en el centro de la Vía Láctea.

En 1995, durante un congreso sobre el centro galáctico celebrado en la localidad chilena de La Serena, se produjo la primera confrontación<sup>[91]</sup>. Yo había dado una ponencia sobre Sagitario A\* y sobre el gran parecido de su radioemisión con los agujeros negros en otras galaxias. Sin embargo, fue el grupo de Genzel el que presentó los resultados realmente excitantes. Sus nítidas imágenes, tomadas durante varios años, mostraban que las estrellas del centro galáctico ¡se habían desplazado! Si eso era cierto, tuvieron que moverse a una velocidad vertiginosa.

Estamos habituados al hecho de que el cielo estrellado posea casi siempre el mismo aspecto, pero esto no es así en realidad, pues todas las estrellas se desplazan por la Vía Láctea a decenas de miles de kilómetros por hora en relación con las demás. Ahora bien, dado que están muy lejos, eso no se percibe en el transcurso de una vida.

Las estrellas en torno a Sagitario A\* habían cambiado sus posiciones en un intervalo de unos pocos años, y ello a pesar de que están muchísimo más lejos que los soles que percibimos a nuestro alrededor. Algo debía de estar manteniendo a esas estrellas al trote y arremolinándolas. Solo la fuerza gravitatoria de un agujero negro de unos 2,5 millones de masas solares podía estar provocando esa situación, según Genzel<sup>[92]</sup>.

El desplazamiento en las imágenes era mínimo tan solo. Poco después, Andrea Ghez presentó los resultados de su grupo<sup>[93]</sup>. Era una profesora joven de la Universidad de California en Los Ángeles y desde hacía poco tenía a su disposición el telescopio Keck, de diez metros, en el volcán de Mauna Kea, en Hawái. Su telescopio era más grande y sus observaciones prometían ser aún mejores, pero como había comenzado más tarde, no estaba todavía en condiciones de medir ningún desplazamiento. Para ello habría que esperar algunos años, pero estaba claro que con ella se había originado una verdadera competencia. Los dos grupos se examinaban respectivamente con recelo y se guardaban sus datos. Al final de la jornada subieron ambos al estrado y superpusieron las transparencias con sus imágenes. Las mediciones parecían coincidir. Fue algo muy tranquilizador para nosotros.

Aquel congreso fue emocionante también en otro sentido. Un día oímos un ruido fuerte y vimos cómo se tambaleaba el techo de la sala. La sensación fue como un golpe en la boca del estómago. Algunos colegas salieron corriendo porque temían que el edificio pudiera desmoronarse. Fue el primer

terremoto que experimentaba en mi vida. En los chilenos evocó recuerdos de anteriores temblores en los que habían muerto muchos seres humanos. Solo permanecieron sentados los californianos, que estaban curados de espanto. No quiero ni imaginarme lo que habría sucedido si se hubiera producido algún temblor más.

Tras el congreso yo tenía claro que iba a ocurrir algo emocionante en el mundo de la radioastronomía. Se había dado el disparo de salida para descubrimientos nuevos, pero también para una maratón que duraría más de dos décadas. La ciencia necesita un control mutuo. La competencia garantiza que ese control sea en verdad efectivo: acelera el desarrollo como una olla a presión y asegura que los grupos se examinen mutuamente, pero también genera una elevada presión física y psíquica. La competencia funciona si los grupos se hallan a un nivel similar. Para ello se requieren nervios de acero, buena salud, una financiación holgada y una infraestructura que funcione durante muchos años. Esos requisitos se cumplían en este caso e impulsaron con pasos de gigante nuestro entendimiento de las fuerzas oscuras en el centro de las galaxias. Si no era aquí, ¿dónde podíamos comprender si existen en efecto los agujeros negros y dónde podíamos detectarlos?

Tres años más tarde, Andrea Ghez presentó otras mediciones sobre los movimientos de las estrellas, y dos años después fue la primera astrónoma que, con su gran telescopio, descubrió que las estrellas se mueven en órbitas curvas<sup>[94]</sup>.

Pero ¿adónde se dirigían? Todas las estrellas parecían moverse alrededor de un punto. Sin embargo, justo en ese punto no había nada. Sagitario A\* seguía sin verse en las imágenes. Solo una comparación precisa de los datos del infrarrojo cercano con las mediciones de radio de Karl Menten, en Bonn, y de Marc Reid, del Observatorio Astrofísico Smithsonian, en Cambridge, demostró que el punto de anclaje de todos esos movimientos era exactamente la radiofuente Sagitario A\*<sup>[95]</sup>. Todo giraba a velocidades de varios millones de kilómetros por hora alrededor de la dudosa radiofuente, que permanecía inmóvil en el centro<sup>[96]</sup>. Ahora estaba claro que si allí había un agujero negro, ¡entonces tenía que estar oculto en algún lugar de la luz de radiofrecuencia de Sagitario A\*!

Andrea Ghez señaló también que una de las estrellas trazaba una órbita muy angosta en torno a Sagitario A\*, en un periodo de tan solo quince años. Nos comunicó que pronto iba a aproximarse mucho al posible agujero negro.

A continuación, de nuevo le llegó el turno a Reinhard Genzel, quien había instalado una nueva cámara infrarroja en el Very Large Telescope del

Observatorio Europeo Austral, situado en el desierto de Atacama. Esta región de Chile, polvorienta y despoblada, es una de las más inhóspitas que podemos imaginar. El Hotel ESO, de estilo futurista, en el que vive la mayoría de los astrónomos, tiene el aspecto de una base secreta de un villano; de hecho, sirvió como telón de fondo en la película de James Bond, *Quantum of Solace*. Con la nueva instrumentación, los astrónomos consiguieron de golpe las imágenes más nítidas hasta la fecha del centro de la Vía Láctea. Al mismo tiempo, emplearon una óptica adaptativa, en la que un espejo dúctil compensa en fracciones de segundo las perturbaciones causadas por la atmósfera. Los astrónomos midieron la estrella S2 y fueron recompensados por sus esfuerzos<sup>[97]</sup>. Una comparación con imágenes antiguas demostró que esa estrella se había acercado en unos pocos años a tan solo diecisiete horas luz de Sagitario A\*. Eso es exactamente tres veces la distancia de Plutón al Sol.

Esa estrella se movía en una órbita elíptica alrededor de la potente radiofuente, tal como Kepler había descrito las órbitas planetarias en torno al Sol. Y así como este y la Luna mueven las aguas de aquí para allá y generan las mareas en la Tierra, un agujero negro tira con violencia de los calientes océanos de gas de una estrella a su paso por él. Sin embargo, las fuerzas de marea de Sagitario A\* no bastan en este caso para despedazar a la estrella. Esto sucedería únicamente si S2 se aproximara a poco más de doce minutos luz del agujero negro, y aun así, la fuerza gravitatoria de Sagitario A\* resulta inflexible para la pequeña estrella. En su órbita alcanza la increíble velocidad de más de siete mil quinientos kilómetros por segundo, en un hora recorre treinta y ocho millones de kilómetros. Con ayuda de las antiguas leyes de Kepler y de Newton, puede calcularse entonces la masa de Sagitario A\* a partir de la velocidad y de la distancia de la estrella, que adquiere un valor de 3,7 millones de masas solares. El cálculo resultante era esta vez más elevado que en mediciones anteriores. El corazón se me desbocó de la alegría, pues también el horizonte de sucesos sería mayor y más fácil de ver, pero la imprecisión de las mediciones era todavía demasiado grande; podía desviarse en torno a 1,5 millones de masas solares por arriba o por abajo.

Habían transcurrido treinta años desde la predicción de Donald Lynden-Bell y de Martin Rees en los años setenta hasta estas mediciones. Cuando la comunidad de investigadores divisó la danza de esas estrellas en torno al supuesto agujero negro, comenzaron a creer poco a poco en lo que estaba sucediendo allá afuera, en el cosmos. Ese agujero negro adoptó un papel protagonista en la Vía Láctea, y los astrónomos se convirtieron en paparazzi

que difundían con entusiasmo en los medios de comunicación cualquier movimiento de Sagitario A\*.

El equipo de Andrea Ghez descubrió por aquella época una estrella que orbitaba todavía un poco más cerca del centro galáctico. Tardaba menos de doce años en dar una vuelta alrededor del centro de la Vía Láctea y viajaba a un 1 por ciento de la velocidad de la luz en su órbita<sup>[98]</sup>. El grupo de Genzel detectó de una manera del todo inesperada con su telescopio de infrarrojo cercano un destello débil justo en la ubicación de la radiofuente<sup>[99]</sup>. Ahora podíamos percibir a Sagitario A\* no solo en luz de radiofrecuencia, sino incluso en el casi visible infrarrojo cercano. Los telescopios de rayos X siderales comenzaron también a medir los destellos en el borde de la oscuridad<sup>[100]</sup>. En intervalos de minutos, la radiación se hacía más clara, y luego más oscura. Y esta solo podía provenir de una zona que tuviera una extensión de como máximo algunos minutos luz; así pues, no era mucho más grande que el horizonte de sucesos, como si el agujero negro estuviera envuelto en un nubarrón tronante que emitiera constantemente ráfagas de luz, eso es lo que me parecía ese espectáculo cósmico. Sin embargo, la agudeza de un único telescopio no es suficiente para determinar con exactitud lo que está sucediendo allí.

Así pues, el grupo de Genzel comenzó a construir uno de los monstruos tecnológicos más difíciles y complicados en el campo de los telescopios ópticos en el Instituto Max Planck de Física Extraterrestre ubicado en Garching, junto con otros colegas de Francia y de Alemania, y bajo la dirección del genial fabricante de instrumentos Frank Eisenhauer. Se llama GRAVITY y en lugar de emplear tan solo uno de los telescopios de ocho metros de Chile, debía interconectar a la vez los cuatro telescopios gigantes de la montaña, objetivo que se consiguió finalmente en el año 2016.

Durante una estancia en Múnich a finales de 2017, pude ver allí por primera vez con mis propios ojos cómo la estrella S2 avanzaba día tras día. ¡Un espectáculo increíblemente impresionante para un astrónomo! Los datos probaban que la masa de Sagitario A\* era en realidad de cuatro millones de masas solares. El error en la medición se hallaba ahora por debajo del 1 por ciento. En otras palabras: ahora conocemos la masa del agujero negro en el centro de nuestra Vía Láctea con mayor exactitud que nuestro propio peso.

Desde entonces, el equipo GRAVITY suministra imágenes con regularidad que llegan casi hasta el borde del agujero negro, haciendo visibles fascinantes erupciones de radiación en Sagitario A\*. El gas caliente de los destellos de luz parece alcanzar casi la velocidad de la luz y rotar como un

tió vivo vertiginoso alrededor de algo que cualquiera esperaría que se tratara de un agujero negro<sup>[101]</sup>.

Hace cuatrocientos años descubrimos que nuestros planetas orbitan alrededor del Sol, hace cien años descubrimos que el Sol orbita alrededor del centro de la Vía Láctea. Hace diez años vimos estrellas que, como planetas, orbitaban alrededor de Sagitario A\*. Y hoy vemos gas a veintisiete mil años luz de distancia que rota casi a la velocidad de la luz en torno a un agujero negro. Una y otra vez, la fuerza gravitatoria atrae a los cuerpos celestes y a las nebulosas bajo su hechizo y los fuerza a trazar sus órbitas elípticas siempre iguales. ¡Qué viaje más destacable a las profundidades del cosmos! No es de extrañar que Andrea Ghez y Reinhard Genzel recibieran el Premio Nobel de Física en 2020 por el descubrimiento de una masa compacta en el centro de nuestra galaxia.

Ahora bien, ese cuerpo celeste situado en el centro, ¿era realmente un agujero negro? Estábamos tan cerca de esa estructura misteriosa y, sin embargo, se nos denegaba la visión última a ese abismo aparentemente eterno. Para ello necesitábamos un telescopio aún mayor.

En Estados Unidos, a finales de los años noventa, me ofrecieron la posibilidad de involucrarme todavía más en el proyecto del telescopio espacial Hubble y de su posible sucesor. Sin embargo, yo deseaba dedicarme a la radioastronomía, y en 1997 regresé con mi familia al buen tuntún a nuestra tierra. Anton Zensus acababa de comenzar como nuevo director del Instituto Max Planck en Bonn, para dirigir el grupo dedicado al desarrollo y la aplicación de la técnica de VLBI, y me ofreció un puesto de manera espontánea. En él se combinaban los mayores telescopios del mundo.

En el año 1999 me encontré en Bonn con mis colegas Geoff Bower, Sera Markoff y Feng Yuan. Geoff Bower se había doctorado en Berkeley y era experto en VLBI. Investigamos las propiedades de radio del centro galáctico y más tarde pudimos demostrar, entre otras particularidades, que ese agujero negro apenas se alimentaba<sup>[102]</sup>. Sera Markoff era una teórica, se había doctorado en Arizona, y unificamos la radiación de agujeros negros grandes y pequeños en un solo modelo<sup>[103]</sup>. Con Feng Yuan, mi colega chino, relacionamos la idea del disco caliente de Ramesh Narayan con nuestro modelo del jet<sup>[104]</sup>. Comenzaba una larga y productiva colaboración, y yo tenía la sensación de que empezábamos a entender realmente los principios básicos de la astrofísica de los agujeros negros que pasan hambre, ya fueran grandes o pequeños.



## 2

# La idea de la imagen

«AMAZING GRACE»

A mediados de los años noventa iba tendiéndose lentamente la red sobre el forajido, pero todavía quedaban algunos flecos. Desde un punto de vista jurídico, hasta el momento solo nos habíamos basado en indicios para probar que los agujeros negros hacían de las suyas en el centro de las galaxias. Ahora bien, estos no bastaban de ninguna manera, algo que sucede muy a menudo en la ciencia. Se reúnen hechos durante mucho tiempo para formular una hipótesis, hasta que en algún momento los hechos ya no permiten ninguna otra conclusión o se refuta la suposición inicial. Por consiguiente, muchos astrónomos seguían anclados en su escepticismo, sobre todo los más mayores que ya habían pasado por alguna que otra campaña publicitaria. «Esas pruebas no son suficientes —opinaban—. Todavía estamos demasiado lejos». Constantemente aparecían artículos que afirmaban que los agujeros negros supermasivos eran imposibles. Lo que los astrónomos deseábamos con ganas era atrapar al perpetrador in fraganti, en una foto con las manos en la masa.

¡Por esta razón yo quería certezas! Quería ver los agujeros negros. ¡A toda costa!

Es probable que el anhelo de querer ver lo que está oculto sea una necesidad humana primitiva que está profundamente arraigada en nosotros. Como científico, solo creo en aquello que veo, pero primero tengo que creer que algún día veré.

Ese deseo de ver se apodera de mi alma siempre que canto el antiguo himno sagrado «Amazing Grace». Pocas canciones me conmueven tan hondo como esa, y justo en el pasaje siguiente se me saltan las lágrimas: «Was blind, but now I see» («estaba ciego, pero ahora veo»).

Ese instante en el que los ojos se abren, el momento en que alguien comprende una verdad de una forma muy directa, posee un valor increíble. Salir de la oscuridad a la luz y reconocer una verdad nueva es una de las experiencias más valiosas en la vida. A veces pienso que realmente es sobre todo ese momento de poder-ver-por-fin lo que me impulsa a vivir. Es esa esperanza la que me da fuerzas y me sirve de estímulo.

Probablemente lo que importa en la fe y en la ciencia es tener la esperanza de descubrir algo nuevo. Jesús expresó esta actitud así: «Bienaventurados los que no vieron y, sin embargo, creyeron»<sup>[105]</sup>. Siempre he entendido esa frase así: «Bienaventurados quienes aún no ven...».

En la vida cotidiana vemos a veces mejor con el corazón; sin embargo, en la ciencia necesitamos instrumentos, instrumentos grandes. Las imágenes más nítidas en la astronomía se siguen generando en la actualidad con la interferometría de muy larga base (la VLBI); es decir, justo con la tecnología que mi colega Krichbaum, en Bonn, yo y muchos otros radioastrónomos antes que nosotros llevamos empleando desde hace décadas.

A partir de los años sesenta los científicos interconectaron radiotelescopios individuales para formar un interferómetro con el fin de incrementar la nitidez de la imagen. Este método hizo visibles detalles que ningún telescopio individual podría reproducir jamás. Se creó uno enorme con un plato de antena virtual tan grande como la Tierra. Con él pueden superponerse y combinarse las ondas de radio en el ordenador.

Para la superposición exacta de las señales de radio hay que determinar la posición de las estaciones de medición individuales con una precisión milimétrica y medir el tiempo de llegada de las señales con relojes atómicos. Estos funcionan con una precisión de picosegundos, y en treinta mil años solo fallan en un segundo. Las ondas de radio entrantes se convierten en señales digitales y se graban en soportes de almacenamiento: antiguamente en cintas de vídeo; más tarde, en grandes cintas magnéticas y, entretanto, en cajas llenas de discos duros que almacenan la luz en bits y bytes. Cuantos más datos puedan conservarse, mayor será la cantidad de luz que pueda grabarse al mismo tiempo, y mejores serán los datos almacenados y protegidos. El telescopio virtual se acopla al ordenador, y cuando dispone de suficientes datos, se reconstruye una imagen a partir de ellos empleando algoritmos.

Las mediciones requieren una precisión extrema, pero también suministran imágenes de excelente nitidez. De ahí que no sean solo astrónomos quienes realizan mediciones del cielo con la interferometría intercontinental, también los geodestas captan y miden todo el mundo con

telescopios VLBI. A la inversa, nosotros necesitamos también los datos de los topógrafos, pues la Tierra no es lo suficientemente estable para nuestros fines; deforma el telescopio virtual, así que los geodestas miden esa deformación.

El Observatorio Wettzell, ubicado en el sistema montañoso de la selva de Baviera, junto con otras estaciones en todo el mundo, tiene la mirada puesta con regularidad en unos trescientos cuásares, que resultan adecuados para las mediciones geodésicas. Esa estación es uno de los nudos de comunicación más importantes en la red geodésica internacional, y los datos se correlacionan en Bonn con los mismos métodos que emplean los astrónomos; así pues, ambas disciplinas trabajan en estrecha colaboración.

Si observamos cuásares brillantes como 3C 273 y 3C 279 y los empleamos como fuentes de calibración, al utilizar VLBI podemos corregir incluso los relojes atómicos y medir con precisión la posición de los telescopios. Los geodestas demuestran así cómo varía la superficie terrestre: las distancias entre las placas continentales varían. Así, por ejemplo, América y Europa se separan cada año algunos centímetros. Hawái, con todos sus telescopios ubicados en el volcán de Mauna Kea, es el tren expreso entre los puntos de medición globales: avanza casi diez centímetros al año en dirección hacia Asia. Escandinavia se ha ido elevando desde el final de la Edad del Hielo debido al derretimiento de las masas de hielo. Incluso la catedral de Colonia oscila cada día por las mareas unos treinta y cinco centímetros arriba y abajo. Por suerte, esto ocurre de una manera uniforme en todas partes; de lo contrario, haría ya mucho tiempo que se nos habrían caído las torres encima. ¡Nuestro telescopio mundial se tambalea!

El eje terrestre oscila también, pues la Tierra se asemeja a un huevo cuyo eje de rotación está sujeto a variaciones diminutas debidas a las masas centrífugas externas. Los otros planetas tiran violentamente de nuestro planeta y hacen que los polos oscilen algunos centenares de metros. Los océanos, que se mueven de un lado a otro, colaboran también en este proceso, así como las masas de aire que se mueven en la atmósfera alrededor de la Tierra. Por ello, los polos se desplazan algunos metros cada año sin que sea posible predecir la desviación exacta. Muchas determinaciones de la posición pueden medirse en la actualidad a través de GPS, pero también los otros planetas dan sacudidas a los satélites. Solo la VLBI es capaz de medir nuestra posición absoluta en el espacio, y nosotros necesitamos las posiciones exactas de los telescopios.

La nitidez de la imagen<sup>[106]</sup> que se puede lograr con una red de VLBI se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Resolución de imagen} = \lambda/D$$

La resolución de imagen, es decir, su tamaño de píxeles expresado con una medida angular, es el cociente entre la longitud de onda de la radiación de radio,  $\lambda$  (lambda), y la distancia media ( $D$ ) de los telescopios. Cuanto más pequeña es la resolución, más pequeños son los objetos que pueden distinguirse. Con una longitud de onda de observación de 1,3 milímetros y un diámetro terrestre de 12 700 kilómetros, la mejor resolución es la de veinte microarcosegundos, es decir, aproximadamente tan grande como medio grano de mostaza situado en Nueva York que tratáramos de contemplar desde la ciudad de Colonia. Si calculamos el tamaño del horizonte de sucesos de Sagitario A\* en 2,5 millones de masas solares, tal como se supuso en su día, entonces obtenemos un diámetro de quince millones de kilómetros, que es diez veces más grande que el del Sol. Sin embargo, el del centro de la Vía Láctea parece aproximadamente del tamaño de una cuarta parte de un grano de mostaza: doce microarcosegundos, demasiado pequeño incluso para un telescopio global.

Y ese cálculo estimado era muy optimista, pensé, pues cuando un agujero negro rota al máximo, es decir, casi a la velocidad de la luz, el horizonte de sucesos se reduce a la mitad. Todo el mundo esperaría que cualquier agujero negro rotara un poco como cualquier estrella y planeta. Así pues, ¿no sería ese agujero negro visible aún más pequeño?

En todo esto pensaba durante una tarde nubosa de mediados de los años noventa que pasé en la biblioteca de nuestro centro de Bonn. Mientras leía, me topé de pronto con un artículo breve de James Bardeen. Este astrofísico estadounidense ya había reflexionado en el año 1973 sobre el aspecto que tendría un pequeño agujero negro que pasara frente a una estrella lejana. Por aquel entonces, eso era todavía un pasatiempo puramente académico y lo sigue siendo, pues para un evento cósmico de esa categoría sería necesario un telescopio con una agudeza mil veces mayor que nuestro radiotelescopio global. Sin embargo, yo podía imaginar una sombra similar a la del tránsito de Venus por delante de aquel sol distante.

No obstante, había algo que me desconcertaba. La figura al final del artículo mostraba un círculo que daba a entender el tamaño que tendría la mancha oscura que se originaría en la absorción de la luz en el horizonte de sucesos. Ese círculo era demasiado grande. ¿No se trataba de un agujero negro rotatorio? ¿No debía ser entonces mucho más pequeño, unas cinco veces más pequeño que el de la figura?

Cuanto más rápidamente gira un agujero negro, más cerca puede pasar la luz cerca de él. Igual que en un tiovivo, toma el impulso del espacio-tiempo y aún puede escapar así de él, mientras que sin ese impulso quedaría atrapado. Justo por este motivo, los agujeros negros rotatorios deberían aparecer más pequeños, pensaba yo, pero aquel parecía para el observador mucho más grande, mucho mayor que el horizonte de sucesos.

Y entonces lo entendí de repente: ¡los agujeros negros se agrandan ellos mismos! Son gigantescas lentes gravitacionales, pues con toda seguridad son capaces de una cosa: desviar la luz. Ni siquiera la rotación del agujero negro representa un problema, porque la luz tiene que pasar por ambos lados: por uno viaja con la rotación del agujero negro, pasando cerca del horizonte de sucesos y casi rozándolo; pero por el otro lado, tiene que viajar contra el espacio-tiempo y es atrapada desde muy lejos. Un agujero negro de ese tipo posee una extensa red de pesca cuando la luz trata de pasar por su lado.

Se me cayó la venda de los ojos. Si eso que había en la figura era cierto y válido también para «mi» agujero negro, entonces tendría que aparecer dos veces y media más grande de lo que yo mismo había supuesto hasta entonces para el mejor de los casos. Para la observación era indiferente si rotaba o no, solo contaba la masa, y esta la conocíamos muy bien.

Entonces, la Tierra sería lo suficientemente grande. *Amazing Grace!* Tal vez sí pueda ver «mi» agujero negro. Y no solo yo, ¡todo el mundo podrá verlo! Esa idea me alcanzó como un rayo. De pronto se originó en mi imaginación una imagen concreta desde la oscuridad del universo, la de un objetivo claro: ¡iba a mirarle el gaznate al agujero negro! Inquieto, me levanté de mi asiento y deambulé de un lado para otro.

#### EL AGUJERO NEGRO PROYECTA SU SOMBRA

Una idea que no se comparte es como una semilla que no se planta, así que comencé a difundir una y otra vez esta buena nueva en congresos: «Sí, podemos ver el agujero negro». Sin embargo, solo habría imagen si conseguía entusiasmar a los colegas de todas las partes del mundo para un proyecto de esta clase. Precisaba la voluntad de muchos que persiguieran un objetivo común, y primero tenía que convencerlos a todos.

Hasta ese momento todo había sido una teoría. Las teorías son buenas. Las teorías confirmadas experimentalmente son mejores. A su vez, los experimentos adquieren sentido solo cuando se pueden explicar y clasificar sus resultados con ayuda de una teoría. Los buenos experimentos mejoran las teorías y estimulan nuevas ideas, pero también cuestan mucho dinero y esfuerzo. Para reunir el presupuesto necesario, se precisan teorías creíbles que predigan lo que se verá: la ciencia es siempre un tango entre la teoría y el experimento, en el que avanzan una y otro alternativamente.

Así pues, ahora teníamos que ir ganando terreno con telescopios de frecuencias cada vez mayores, es decir, de longitudes de onda cada vez más cortas. ¿Hasta qué distancia es posible acercarse a un agujero negro? Según las mediciones de Bonn, con una longitud de onda de siete milímetros; pero en 1994 un grupo estadounidense del Observatorio Haystack cerca de Boston, que contaba, entre otros, con el joven radioastrónomo Shep Doeleman, realizó un primer experimento VLBI a una longitud de onda de tres milímetros<sup>[107]</sup>. Mi colega de Bonn, Thomas Krichbaum, consiguió incluso la primera medición VLBI a 230 GHz, es decir, a una longitud de onda de 1,3 milímetros con los telescopios del IRAM en España y en Francia<sup>[108]</sup>. Sin embargo, seguía sin poder decirse qué aspecto tenía ese objeto. El efecto de cristal opalescente de nuestra galaxia seguía velando el tamaño verdadero, la calidad de los datos era mala, había muy pocos telescopios, y la sensibilidad de las mediciones era muy limitada.

En 1996 organicé una campaña de observación coordinada para medir por primera vez la luminosidad de Sagitario A\* con diferentes telescopios a la vez y en diferentes longitudes de onda. Participaban colegas en Japón, en España y en Estados Unidos. No pudimos obtener imágenes, pero la interpretación de nuestros datos confirmaba que la radiación de ondas milimétricas debía proceder realmente del horizonte de sucesos. En nuestro artículo predijimos de manera explícita que con un experimento VLBI tendríamos que poder ver el horizonte de sucesos frente a esa radiación de fondo<sup>[109]</sup>, pero todavía existía entre los investigadores de todo el mundo la necesidad manifiesta de debate.

Donde mejor se discute algo con los demás es en los congresos. Así que en 1998 organicé con mi colega de Arizona Angela Cotera uno sobre el centro galáctico<sup>[110]</sup>. Llegaron a Tucson expertos de todo el mundo. Elegimos expresamente un hotel en el desierto para que nadie se escapara de noche y disponer así de mucho tiempo para hablar entre nosotros.

Las pausas para tomar el café y la cena juntos suelen ser más importantes que las conferencias en los congresos. «No vengo por las ponencias, vengo por las copas», me dijo una vez en broma un colega experimentado. El ser humano es un ser social, y al comer y beber juntos, aprendemos de los demás y de nosotros muchísimo, algo que no figura en ninguna revista especializada.

Tal como estaba previsto, se desencadenaron animados enfrentamientos verbales. Ciertamente no disponíamos de espadas láser, pero casi todos teníamos por aquella época un puntero láser, pues acababan de hacerse asequibles para todo el mundo. Así que en ocasiones bailaban tres o cuatro puntos rojos al mismo tiempo sobre la pantalla. Todo esto se desarrollaba frente a nuestro invitado de honor, Charlie Townes, que estaba sentado en primera fila y cuyo artículo divulgativo sobre el agujero negro en el centro de la Vía Láctea había devorado yo en mi época de estudiante.

¿Se dio cuenta alguien de esta ironía? Townes no era una persona cualquiera. Allí estábamos nosotros batiéndonos en duelo con punteros láser baratos, y allí estaba sentado el hombre que ya en 1964, dos años antes de que yo naciera, había recibido el Premio Nobel por la invención del láser. Sin embargo, a diferencia de nosotros, ¡Charlie Townes seguía empleando los dedos y un puntero tradicional! Nuestra alegría infantil por su láser parecía divertirlo en grado sumo. Quien se detuviera unos instantes a reflexionar, podría comprender en ese momento con asombro cómo, en el intervalo de una vida humana, una investigación básica había originado un objeto de uso cotidiano.

En el debate, Krichbaum y yo enfatizamos que podríamos alcanzar el agujero negro y ver las estructuras empleando frecuencias altas con la VLBI. Mi colega Shep Doeleman, en cambio, se mostró cauto y argumentó que las frecuencias altas podrían provenir más bien de una nube de polvo y no de ese agujero negro. Townes se despertó del todo. «¿Hay un agujero ahí, en el centro de la cosa?», preguntó<sup>[111]</sup>. «Eso es —respondí—, con una resolución mayor podríamos ver, en el verdadero sentido de la expresión, un agujero negro en la zona de emisión». Como es obvio, no habíamos encontrado todavía una designación correcta para esa «cosa».

De alguna manera, mi mensaje sobre la posibilidad de ver un agujero negro carecía todavía de capacidad de persuasión. Teníamos que insistir más. Al ser humano le gusta concebir lo inimaginable, para tener una idea acerca de lo que le espera. Hasta entonces, yo solo había mostrado ecuaciones, gráficas y un agujero negro esquemático. Era hora de mostrar exactamente lo que iba a verse, una fotografía simulada. Para ello habría que calcular la

desviación de la luz en torno a un agujero negro y revelar el aspecto que tiene cuando está rodeado por una nebulosa translúcida y ardiente, tal como sería el caso con los modelos de los discos de acreción de Narayan o con nuestro modelo de jet.

Unos meses después obtuve una beca de la Fundación Alemana de Investigación para ir a Arizona como profesor invitado durante algunos meses sabáticos durante 1999. Acababa de nacer nuestro hijo menor, y aprovechamos el permiso por maternidad de mi esposa. Llegamos a Tucson con nuestros tres hijos pequeños, Jana, Lukas y Niklas, y solo una de las ocho maletas facturadas. Cuando no tienes nada durante algunos días, te alegras por las pequeñas cosas de la vida, especialmente los niños y las niñas.

Mi anfitrión me puso en contacto con Eric Agol, quien por aquel tiempo trabajaba como investigador postdoctoral en la Universidad Johns Hopkins, en Baltimore. Había desarrollado un programa de ordenador con el que podía calcularse de una manera elegante la desviación de la luz en la teoría general de la relatividad, mejor que con el programa de mi tesina. Juntos calculamos qué aspecto podría tener un agujero negro en las circunstancias más diversas y si podría verse con la VLBI. Esperamos con mucha tensión los resultados. Y, en efecto, vimos en cada uno de nuestros modelos un anillo claro y una mancha oscura en el centro que siempre era del mismo tamaño.

Ese llamativo anillo de luz proviene de todas partes. Ello se debe a las propiedades particulares de los agujeros negros. Debido a la curvatura del espacio, la luz viaja cerca del agujero negro trazando casi un círculo cerrado, si pasa por un lado suyo exactamente a la distancia correcta. Esta órbita cerrada de luz se denomina «órbita de fotones», porque las partículas de la luz giran alrededor del Sol como planetas, pero solo a una distancia precisa. En el caso de un agujero negro no rotatorio, la órbita de fotones está un 50 por ciento más alejada del centro de masa que el horizonte de sucesos, pero debido al efecto lupa de la fuerza gravitatoria nos parece que es dos veces y media mayor que este.

Si una bombilla estuviera colgada exactamente al borde de la órbita de fotones por encima del agujero negro, la mitad de su luz caería entonces dentro del agujero negro; la otra mitad escaparía, y una pequeñísima fracción de la luz viajaría en círculo, esta es la luz que se emite en paralelo al horizonte de sucesos. Cuanto más se acerque la bombilla a él, más rayos de la bombilla serán ingeridos y cada vez menos luz saldrá al exterior. Además, la luz se «ensancha», se desplaza hacia el rojo y pierde energía. Al borde del horizonte de sucesos, la luz de la bombilla desaparece por completo. El espacio entre la



órbita de los fotones y el horizonte de sucesos es, por decirlo así, la zona de penumbra de un agujero negro; todo lo que cae en ella se vuelve rápidamente más oscuro.

En las cercanías de la órbita de fotones, la luz puede trazar movimientos muy disparatados. Cuando éramos niños, a veces nos construíamos con rollos de cartón y espejos un periscopio de espionaje supersecreto con el que podíamos mirar a la vuelta de la esquina. Un agujero negro es la última generación de periscopios de espionaje supersecretos, ¡pues puede mirar en varias curvas y en todas direcciones simultáneamente!

Si tuviéramos ojos láser como Superman, la trayectoria del rayo indicaría adónde estamos mirando en todo momento. Si, por ejemplo, miráramos al borde izquierdo del agujero negro, el rayo de visión se doblaría hacia la derecha por la esquina. Si apuntáramos tan solo un poco hacia la derecha, la luz se doblaría con mayor intensidad y regresaría de nuevo, veríamos lo que hay frente al agujero negro. Si apuntáramos un poco más hacia la derecha, la luz se movería primero en círculo y luego miraríamos directamente en el interior del agujero negro. Si mirásemos a la derecha, en el borde del agujero, veríamos lo que se encuentra a la izquierda, detrás, a la derecha o delante del agujero negro. Si mirásemos por encima de él, la luz se doblaría hacia abajo, y veríamos todo lo que hay encima, debajo o frente al agujero negro. Cerca de la órbita de los fotones, la luz puede trazar un cuarto de circunferencia, una semicircunferencia o también una circunferencia completa, a veces incluso muchos cuasicírculos angostos con una forma espiral<sup>[112]</sup>.

Si espiáramos demasiado cerca de un agujero negro, el rayo de visión acabaría en el horizonte de sucesos y nosotros miraríamos en la oscuridad. La verdadera naturaleza de un agujero negro se halla en la oscuridad, en el sentido literal de la expresión, solo su entorno irradia una luz brillante.

Si viajáramos dando vueltas alrededor del agujero negro, reconoceríamos desde todos los lados siempre el mismo anillo de luz, mientras el agujero negro se hallara envuelto por todas partes por una transparente nebulosa radiante. Los rayos de luz de esa nebulosa son desviados y enfocados de tal manera que forman una fina cubierta esférica llena de luz en torno al agujero negro. Desde todas las direcciones nos llamaría la atención un anillo que oculta en el centro una mancha oscura. La oscuridad se debe a que los rayos de visión acaban en el agujero negro. De hecho, la mancha no es del todo negra, porque los rayos de visión también deben pasar a través de la nebulosa brillante situada en el primer plano.

No obstante, el anillo en torno a la mancha no siempre aparece exactamente igual. Si en una simulación por ordenador hacemos que el gas rote casi a la velocidad de la luz, tal como esperamos que suceda en el caso de un agujero negro, solo generamos un semianillo. Por el lado en el que el gas se mueve hacia nosotros, la luz se amplifica; por el otro lado, se debilita. Si, además, el agujero negro también rota, entonces el anillo se reduce un tanto por ciento e incluso recibe una pequeña «abolladura», apenas perceptible.

Veinte años más tarde aprendí que las matemáticas de las órbitas de luz ya las había calculado el matemático alemán David Hilbert, en el año 1916<sup>[113]</sup>, solo unos pocos meses después de que Einstein y Schwarzschild hubieran colocado los cimientos para los agujeros negros sin saber si estos existían ni lo que eran en realidad. El trabajo de Hilbert cayó en el olvido probablemente porque estaba demasiado adelantado a su tiempo.

También en los años setenta y noventa hubo algunos cálculos sobre el aspecto que tendrían los agujeros negros, pero al no tener ninguna posibilidad de verlos, apenas se tuvieron en cuenta<sup>[114]</sup>. No fueron redescubiertos, y poco a poco, hasta después de la publicación de nuestro artículo. Desde el año 2014, la película *Interstellar* acuñó la imagen que tenemos de los agujeros negros, pero con un modelo que no se corresponde con M87 ni con el centro galáctico. En ella, el agujero negro no está rodeado por una nebulosa caliente y brillante o por un jet, sino por un disco delgado y opaco con un agujero en el centro. En este sentido, no es del todo sorprendente que se vea allí un agujero en el disco, si se pone uno delante. Una mancha oscura sería allí visible incluso si no hubiera ningún agujero negro. Pero lo oscuro solo adquiere significado porque en realidad debería estar lleno de luz.

Cuando mis dos colegas y yo escribimos el artículo sobre la predicción de la imagen de un agujero negro, debatimos también cómo debíamos denominar a la «cosa», a la mancha negra del centro. Los términos concisos son importantes para hacer el relato de la ciencia. ¿Qué sería del Big Bang sin su explosión? Todo el mundo la entiende aunque nadie pueda oírla en realidad. Con frecuencia, los términos gráficos transmiten también mensajes abstractos.

Así pues, organizamos una teleconferencia entre nosotros. No podíamos llamarlo «agujero negro», eso era la masa en el centro y la curvatura del espacio-tiempo. «Hoyo», «mancha», «grano», todas estas palabras no encajaban tampoco. Entonces se nos ocurrió de repente la idea de llamarlo la «sombra» del agujero negro<sup>[115]</sup>. Y es que no podemos ver ninguno directamente, sino solo su sombra, la luz que falta. El agujero negro se esconde detrás de ella y no revela todos sus secretos. En realidad, un agujero

negro es tan solo una sombra de sí mismo. Esta tampoco es tan nítida ni tan oscura como una silueta, porque es tridimensional, e incluso en esa oscuridad todavía puede verse algo de luz: la del gas frente al agujero negro.

Como es natural, nosotros queríamos presentar en nuestra publicación imágenes de radio simuladas de una manera impactante. ¿Cómo ilustrar algo que no podemos ver? Estaba claro que la imagen de la sombra de un agujero negro solo se compondría de datos de radiotelescopios: no se trataría de ninguna fotografía en el sentido clásico, pues nuestros datos no procedían de la zona de ondas visibles para el ojo humano. ¿De qué color es una luz así? Habíamos calculado luminosidades, pero no colores. En el fondo, podríamos haber empleado una imagen de curvas de nivel o una imagen con gradaciones de gris. También esto habría ilustrado los datos con sentido, pero habría sido una representación anodina.

Hacia el cambio de milenio fueron apareciendo cada vez más y más fotografías en color en las publicaciones de astrofísica, pero por ese servicio en los estudios había que pagar una cantidad extra en las revistas especializadas. Sin embargo, nos mereció la pena, pues yo tenía claro que la configuración de una imagen semejante tendría un impacto decisivo en el público. Por aquel entonces los radioastrónomos solían emplear a fondo la paleta virtual de colores y preferían los colores del arcoíris para representaciones gráficas de los objetos celestes; ahora bien, un agujero negro no es ningún «paraíso» después de todo.

Me pareció mucho más apropiada una gama de colores llamada *Heat*, que representaba el hierro al rojo vivo. La sombra estaba ahora rodeada por un anillo de fuego, y recordaba de alguna manera a la corona caliente de un eclipse de sol. Para un monstruo tan candente que encierra un agujero negro, me pareció una elección de color muy acertada, pero fue un acto de libertad artística.

En enero del año 2000 publicamos el estudio en la revista especializada *The Astrophysical Journal*<sup>[116]</sup>. Con el título de «Viewing the Shadow of the Black Hole at the Galactic Center» describimos cómo podría ser posible ver un agujero negro. Se trataba de una «carta» que, según las especificaciones de la revista, debía limitarse a cuatro páginas; por ello, algunas simulaciones aparecieron un tiempo después, en la publicación del congreso<sup>[117]</sup>. Lo anuncié con orgullo en un comunicado de prensa: «¡Pronto podremos ver el agujero negro!»<sup>[118]</sup>. En realidad tendrían que pasar todavía veinte años.

## 3

# Nace un telescopio mundial

### A LA BÚSQUEDA DE TELESCOPIOS Y DE DINERO

La astronomía sin telescopios es como una orquesta sinfónica sin instrumentos. Para obtener una imagen sencilla con un interferómetro global se precisan por lo menos cinco telescopios ubicados en diferentes lugares, diez serían mejor, pero ¿dónde conseguirlos sin robarlos? Al comienzo del milenio no había suficientes telescopios de este tipo, y los existentes estaban amenazados de cierre por falta de dinero. Además, se demoraba la construcción de unos nuevos, planeados desde hacía mucho tiempo. Para nuestro ambicioso proyecto, las cosas estaban más que complicadas<sup>[119]</sup>.

El peso pesado que dominaría este campo de trabajo iba a ser el telescopio ALMA, en Chile, un proyecto global que costó mil millones de euros y que fue construido por tres «regiones» conjuntamente: Europa, Norteamérica y Japón. Como vimos, este telescopio gigante se compone de sesenta y seis antenas individuales de hasta doce metros de diámetro, una red que, en conjunto, tendría la sensibilidad de medición de un telescopio de ochenta metros y la nitidez de imagen de un telescopio de dieciséis kilómetros. Ya al redactar nuestro artículo sobre la «sombra» estaba claro que ALMA sería el punto de inflexión en semejante experimento global. De ahí que en nuestra lista de deseos<sup>[120]</sup>, VLBI con ALMA ocupara los puestos más altos; incluso los científicos del observatorio hablarían pronto de ello<sup>[121]</sup>. Sin embargo, este proyecto se demoró también hasta 2011 y la capacidad de VLBI entró en un proceso de racionalización: «No tenemos dinero para llevar a cabo vuestro proyecto, pero nos ocuparemos de que no se vuelva un imposible», fue el anuncio más esperanzador que recibí.

En el discurso inaugural de mi cátedra en el año 2003 en la Universidad Radboud de Nimega, hablé sobre mi sueño de la imagen del agujero negro y expliqué que cuanto más aprendiéramos del universo, mejor reconoceríamos también nuestros propios límites. Un periódico neerlandés sacó el titular de que yo iba «a dar una sacudida a las puertas del infierno». Me gustó esa frase.

En el año 2004 nos acercamos un poco más a las puertas del infierno. Gracias al VLBA, Geoff Bower, que trabajaba en colaboración conmigo, y cuatro colegas más, conseguimos las mejores mediciones de VLBI del centro galáctico realizadas hasta la fecha en longitudes de onda milimétricas largas<sup>[122]</sup>. El VLBA es una red de diez radiotelescopios estadounidenses, un telescopio continental. Los datos eran por fin tan precisos que pudimos eliminar las zonas borrosas en la imagen provocadas por el gas caliente de la Vía Láctea. Por primera vez veíamos el verdadero tamaño de la fuente, que, exactamente como predecía nuestro modelo, se volvía más pequeña en longitudes de onda más cortas, de modo que debería poder alcanzarse en efecto el horizonte de sucesos con las longitudes de onda más cortas posibles. Por consiguiente, quedaba rotundamente claro que en realidad eran las ondas milimétricas las que iban a iluminar el agujero negro desde la menor distancia. «Tras treinta años, la nebulosa se ha disipado por fin con la ayuda de los radiotelescopios», me citaba la Agencia Alemana de Prensa.

Ese mismo año, los radioastrónomos del Observatorio de Green Bank, situado en el estado federado de Virginia Occidental, celebraban su aniversario<sup>[123]</sup>. En él fue donde se encontró el primer rastro de Sagitario A\* en 1974, hacía exactamente cuarenta años. En una ceremonia solemne se descubrió una placa conmemorativa de aquel descubrimiento. Organicé de forma espontánea una velada especial, donde debatí con Shep Doleman y Geoff Bower frente a la comunidad de investigadores reunidos acerca de la sombra de Sagitario A\*, y sobre cómo podríamos medirla técnicamente. Al final solicité una votación: ¿había llegado el momento propicio para una empresa de ese calibre o eran todavía demasiado grandes las incertidumbres? La reacción del público fue inequívoca: una clara mayoría de los expertos reunidos creía en la imagen del agujero negro, una imagen que todavía teníamos que lograr.

Poco después de aquel taller, invité a Doleman y a Bower a una serie de teleconferencias<sup>[124]</sup> para sacar adelante, juntos, el experimento. Era necesaria una colaboración global, pensaba yo, una como las que organizan también los físicos de partículas. En una colaboración así no cuenta el individuo, sino que el trabajo es planificado, realizado y publicado conjuntamente con muchos

otros investigadores. El experimento, la evaluación de los datos y la modelización quedan integrados en un proyecto.

Habíamos formulado con claridad nuestro objetivo científico; en un experimento bien encauzado pretendíamos demostrar o refutar nuestra hipótesis. Igual que los físicos de partículas buscaban los bosones de Higgs, nosotros buscábamos la sombra del agujero negro. Una de dos: o existía esa sombra, o no existía. Solo queríamos investigar un objeto celeste, pero para ello necesitábamos a todo el mundo. Ahora bien, reunir al mundo entero iba a llevarnos todavía un tiempo.

Idílicamente ubicado en los bosques cercanos a Boston, el Observatorio Haystack, del MIT, era un centro líder en VLBI y comenzaba a desarrollar un nuevo equipo informático que debería permitir almacenar simultáneamente una cantidad muchísimo mayor de datos. Shep Doeleman lideraba el proyecto en el observatorio. Se había doctorado en el MIT y nos conocimos fugazmente durante su breve estancia como investigador postdoctoral en Bonn. Tras su regreso a Estados Unidos volvió a trabajar en el Observatorio Haystack. Con cuatro telescopios en Hawái, Arizona y California, Doeleman tenía a su disposición al menos una pequeña red. Al igual que yo, quería llevar a cabo los primeros experimentos de prueba.

En aquel ínterin trabajé con el radiotelescopio LOFAR, primero en calidad de científico del proyecto y más tarde como presidente de la junta directiva. Observé de primera mano cómo funcionan los grandes experimentos de la física y las cooperaciones internacionales. Además, continué mi trabajo sobre el centro galáctico y participé en algunos experimentos con VLBI, pero en los Países Bajos me faltaba un acceso a telescopios de ondas milimétricas. Tuve que esperar a ALMA.

Al principio, el grupo de Doeleman continuó con los cuatro telescopios en las tres ubicaciones disponibles. En el año 2006 orientaron simultáneamente todos sus platos al centro galáctico. Primero fracasaron, pero en 2007 consiguieron la medición en la frecuencia de longitudes de onda de 1,3 milímetros; un año después, el grupo presentó, orgulloso, sus resultados<sup>[125]</sup>. No había ninguna imagen todavía, pero los astrónomos implicados pudieron determinar el tamaño de Sagitario A\* empleando las longitudes de onda más cortas con una precisión mayor que el experimento de Krichbaum realizado diez años antes. ¡Sagitario A\* era, en efecto, exactamente tan grande como cabía esperar para aquella sombra con su anillo luminoso! Entonces la emoción era inmensa, y yo me alegré sinceramente porque se había reconfirmado la teoría. ¡Solo que la sombra seguía sin poder verse!

Doeleman hizo mucha publicidad en Estados Unidos; yo intenté hacer lo mismo en la otra orilla del Atlántico. Para conseguir mucho patrocinio se requiere un apoyo amplísimo. En 2007, los astrónomos europeos elaboraron por primera vez un plan estratégico conjunto para el futuro de la astronomía, con lo cual quedó registrado nuestro experimento en busca de la sombra<sup>[126]</sup>. Nuestra idea era así reconocida de manera oficial como uno de los principales objetivos científicos en Europa para la siguiente década, y esto mismo iba a suceder en Estados Unidos un tiempo después. Allí se creó un programa estratégico a diez años vista, el *Astronomy and Astrophysics Decadal Survey*, con el revelador título de: «Nuevos mundos, nuevos horizontes en astronomía y astrofísica, 2010».

Poco antes de la *Astronomy and Astrophysics Decadal Survey*, Doeleman organizó un taller durante la reunión anual de la Sociedad Astronómica Estadounidense (AAS), en Long Beach, California, a la que fui invitado. El objetivo era destacar el amplio apoyo internacional a su plan estratégico.

Durante una pausa para el café me senté con Doeleman y con Dan Marrone, que por aquel entonces se encontraba en Chicago y que posteriormente iría a Arizona. A lo largo de los últimos años fui cada vez más consciente de lo indispensable que es una buena promoción para estos proyectos, incluso en la ciencia. Sin embargo, ni siquiera teníamos un nombre con gancho para el nuestro. Aparte de algunas ratas de biblioteca, nadie sabe muy bien qué pensar con la designación *Submillimeter-VLBI-Array*. «¡Hay que darle la vuelta a esto! Necesitamos un nombre atractivo», dije al grupo, y propuse la expresión *Event Horizon Array*. Después de un animado debate, nos pusimos de acuerdo en llamarlo *Event Horizon Telescope*, EHT para abreviar. Había nacido un nombre, un símbolo, una marca, en una de las famosas pausas para tomar café, durante las cuales a veces hay más movimiento y se realizan mejores progresos que en las largas jornadas de conferencias y ponencias.

Más tarde, algunos participantes en el encuentro incluyeron nuestro proyecto en un capítulo del plan estratégico<sup>[127]</sup>. En él figuraba el EHT por primera vez y de manera oficial con su nuevo nombre.

En Estados Unidos el dinero corría con un poco más de abundancia, y los radioastrónomos de Bonn continuaban participando en los experimentos VLBI con los telescopios IRAM en España y en Francia, así como con el nuevo telescopio APEX, en Chile. En 2011 llegó también el momento de los Países Bajos. Un hermoso día de principios de verano recibí una llamada sorprendente de Jos Engelen, antiguo jefe científico en el CERN y ahora jefe

de la Organización para la Investigación Científica de los Países Bajos. Nos conocíamos ya por mis trabajos en la física de las astropartículas: «Toma asiento un momento», comenzó diciendo él. Sorprendido, yo me levanté. «Querido Heino, te llamo porque quería comunicarte en persona que este año has ganado el premio Spinoza por tus trabajos con LOFAR y la visualización de los agujeros negros», dijo él con un tono solemne. De acuerdo, sí, eso sonaba realmente muy bien, pero ¿qué era el premio Spinoza? Como extranjero, tenía una penosa laguna de conocimientos. «¡Es casi el Premio Nobel neerlandés!», me explicó, por fortuna sin que yo se lo preguntara. Me disponía a comentar brevemente si era algo como un mundial nacional neerlandés, pero reprimí ese comentario. «Está mucho mejor dotado que el Premio Nobel —prosiguió—, vas a recibir dos millones y medio de euros». En ese momento tuve que tomar asiento. «Puedes invertir el dinero del premio como quieras, no en privado, claro está, sino solo con fines de investigación», añadió él. De inmediato supe en qué iba a invertir el dinero.

#### NACE EL TELESCOPIO DEL HORIZONTE DE SUCESOS

Algunos meses después viajé con la maleta literalmente repleta de dinero a la primera reunión estratégica del Telescopio del Horizonte de Sucesos en Tucson, Arizona. Habían terminado por fin el gran telescopio ALMA en Chile, y allí se reunieron los representantes más importantes de los observatorios y de las instituciones decisivas dedicadas a la investigación. Volví a ver a muchos colegas conocidos.

Discutimos en detalle los últimos resultados científicos, con ejemplos para la teoría. Entretanto, las llamadas supercomputadoras habían realizado considerables progresos en sus posibilidades de cálculo. Así como predicen los movimientos de las masas de aire que circundan la Tierra, estas calculadoras gigantes simulan cómo se mueve el gas alrededor de un agujero negro. Estas simulaciones se conocen como *General Relativistic Magnetohydrodynamics* (GRMHD). Suena a algo complicado, y lo son, pues abarcan modelos de una complejidad muy elevada que simulan corrientes de plasma magnetizadas en espacio-tiempos curvos y giratorios. Otros programas calculan cómo se generan, se desvían y se absorben los rayos de luz y de radio en los gases calientes en torno a los agujeros negros. Estos



cálculos computerizados son muchísimo más completos que todo lo que habíamos calculado en el año 2000. Estas megacomputadoras suministran imágenes maravillosas y emocionantes, y gracias a su potencia de cálculo todos los colegas encontraron sombras de agujeros negros y confirmaron así nuestra hipótesis. Se originó una verdadera «industria de las sombras», y en casi todos los modelos podían verse sombras y anillos de luz, así que en teoría había acuerdo.

Una científica joven, Monika Moscibrodzka, me impresionó con su competencia y su actitud. Se había doctorado en el Centro Nicolaus Copernicus de Varsovia con Bożena Czerny, una conocida teórica de los discos de acreción, y había aprendido a manejar sus herramientas con Charles Gammie, uno de los principales expertos en simulaciones numéricas en Estados Unidos. Consiguió realizar algunos de los mejores «pronósticos del tiempo» para Sagitario A\*<sup>[128]</sup>. Hasta entonces, este campo de investigación estaba dominado exclusivamente por hombres, pero Monika quiso imponerse. Le ofrecí un puesto en Nimega y le pedí que creara un grupo para simulaciones numéricas. Arar en ese terreno es una actividad muy dura, pues para programar, ejecutar y analizar simulaciones se precisa una cantidad extraordinaria de tiempo y de energía, y requiere de tenacidad para pasar muchísimas horas en solitario frente a la pantalla del ordenador. Cada publicación cuesta mucho sudor y lágrimas. Es como si se reprodujeran en el ordenador detalle a detalle, función a función, los datos que recopilamos con el telescopio. Monika Moscibrodzka lograría tiempo después actualizar nuestros antiguos modelos de jet de los años noventa a los nuevos tiempos<sup>[129]</sup> y generar una predicción asombrosamente exacta de la futura imagen del EHT<sup>[130]</sup>.

El hecho de que se hubiera agrandado la masa de Sagitario A\* y de que el agujero negro de M87 hubiera aumentado de tamaño en los últimos años fueron otros avances muy debatidos durante el congreso. En lugar de los dos mil millones calculados con anterioridad, M87 debía de pesar ahora tres mil millones de masas solares. Otro grupo afirmaba incluso que ese agujero negro era seis mil millones de veces más pesado que el Sol. ¿Si eso fuera cierto, la sombra tendría que ser tan grande que podríamos verla! ¿Teníamos ahora dos candidatos a nuestra disposición? El agujero negro en M87 seguiría siendo algo más pequeño que Sagitario A\*, cierto, pero estaba situado en el firmamento septentrional y podía verse mejor desde el hemisferio norte, donde se encuentra la mayoría de los telescopios. Además, en este caso la Vía Láctea no interfiere en la observación, de modo que no emborronaría una

imagen del agujero negro en M87; así pues, teníamos un problema menos. ¡Ay, ay, ay! Demasiado bonito para ser verdad. Fui prudente. ¿No eran las ganas en este caso las progenitoras del pensamiento? Los resultados de la masa de los agujeros negros en otras galaxias solían mostrar errores sistemáticos, pero seguro que valía la pena intentarlo.

Durante la reunión estratégica en Tucson, los científicos debatían en la sala de conferencias, pero en la habitación contigua había directores de observatorios y de instituciones importantes hablando sobre política científica. Yo estaba metido en ese ajo, y al final acordamos una manera de proceder conjunta. Se sentaron las bases para un procedimiento global.

Ahora la cosa iba en serio y había que reunir más dinero. Ni los telescopios, ni los grandes observatorios, el ESO y el Observatorio Nacional de Radioastronomía (NRAO), podían financiar, ejecutar con método científico y evaluar adecuadamente por sí solos el proyecto EHT. Necesitaban sus recursos y colaboradores para mantener los telescopios en funcionamiento. La pelota estaba en nuestro terreno y teníamos que actuar, sí, pero ¿qué hacer?

A veces el azar te echa una mano. En el viaje de vuelta de una reunión de LOFAR en Dwingeloo en el año 2012, coincidí con mi colega Michael Kramer en el tren. Habíamos hecho el doctorado al mismo tiempo, pero no nos habíamos conocido. Entretanto, él se había convertido en el tercer director del Instituto Max Planck de Radioastronomía en Bonn y había puesto a prueba a fondo y con éxito la teoría de la relatividad de Einstein con ayuda de los púlsares. Enseguida congeniamos y conectamos en una longitud de onda común. Cinco años antes fuimos los primeros astrónomos en recibir una gran financiación del Consejo Europeo de Investigación (ERC). Con él yo había impulsado las pioneras mediciones de partículas cósmicas con LOFAR; y él había montado una red similar a VLBI para la medición de ondas gravitatorias con ayuda de púlsares, y los dos andábamos fascinados por la gravedad. Nuestros proyectos y su financiación habían expirado ya, y ambos nos encontrábamos en la casilla de salida de algo nuevo.

Yo le hablé del EHT, él me describió cómo podía medirse con una precisión increíble el espacio-tiempo con ayuda de un púlsar alrededor de un agujero negro. Decidimos presentar una solicitud conjunta al ERC y competir con los mejores grupos europeos de investigación en todas las especialidades, a pesar de que las probabilidades de éxito para conseguir la imponente cantidad de quince millones de euros eran tan solo del 1,5 por ciento<sup>[131]</sup>. Al grupo se unió una tercera persona, Luciano Rezzolla, un italiano que había

trabajado primero con ondas gravitatorias y agujeros negros que se fusionaban en el Instituto Albert Einstein en Potsdam, y que posteriormente daba clases como catedrático en la Universidad de Frankfurt.

Nos tomamos nuestro tiempo para conocernos bien, y pronto fuimos a por todas. Los tres trabajamos durante medio año en la solicitud y bautizamos el proyecto como BlackHoleCam<sup>[132]</sup>. Todos los telescopios necesitan una cámara, incluido el EHT, al que nosotros pretendíamos equipar con una. En el Telescopio del Horizonte de Sucesos, la cámara era tanto los grabadores de datos como el software de análisis.

Entonces ocurrió un pequeño milagro en los primeros meses de espera. Un elemento de la solicitud de financiación consistía en buscar un púlsar en el centro galáctico con ayuda de ALMA, una empresa extraordinariamente arriesgada y especulativa. Hacía décadas que los astrónomos andaban al acecho de púlsares en el centro de nuestra Vía Láctea. Se suponía que había millares de ellos allí, pero hasta la fecha no se había detectado ni uno solo. Y tuvo que ser, por descontado, en los meses en que nuestra solicitud estaba siendo examinada por los expertos cuando apareció por primera vez un púlsar reciente en el centro galáctico. Fuimos los primeros en descubrirlo y en medirlo con el telescopio de cien metros ubicado en Effelsberg<sup>[133]</sup>. En el mes de septiembre de 2013, la revista *Nature* publicó nuestro trabajo, y nos convertimos en el centro de atención. El resultado mostraba que era posible encontrar púlsares cerca del gran agujero negro de nuestra Vía Láctea. La naturaleza nos había hecho un gran favor, pues ese descubrimiento no iba a ser desfavorable en modo alguno para el dictamen de nuestra solicitud. ¿Cuántos púlsares más había allí escondidos?

Para nuestra sorpresa, hasta la fecha no se ha encontrado ningún otro púlsar en el centro galáctico. El porqué sigue siendo uno de los grandes misterios de nuestra Vía Láctea. También resultó igual de enigmático para nosotros por qué ese púlsar se había hecho notar justo en esos meses en que lo necesitábamos, pero no fueron imaginaciones nuestras. Otros astrónomos confirmaron nuestras mediciones. ¿No dije ya que en ciencia a veces hay que tener mucha suerte?

El procedimiento de selección se asemejaba a un concurso de talentos, en el que nuestra solicitud tenía que ir pasando de una fase a otra, al final de cada una de las cuales había un jurado implacable que ponía el pulgar hacia arriba o hacia abajo. Conseguimos llegar a la final y nos invitaron a ir a Bruselas para comparecer en persona ante el jurado. Ya no queríamos fracasar más. Durante días ensayamos nuestra actuación, nos preparamos para todas las

preguntas posibles y, cuando llegó el momento, nos dirigimos a la sede del ERC en la capital europea.

Los tres llegamos de muy buen humor a la antesala del comité de selección. En ella se encontraba ya el equipo que debía defender su solicitud antes que nosotros. Catedráticos de la mundialmente famosa Universidad de Oxford estaban allí sentados, absortos en sus pensamientos o caminando de un lado a otro hechos un manojo de nervios.

Al cabo de veinte minutos regresó de su entrevista otro grupo. Todos sus participantes estaban con la moral por los suelos. «¡Preguntan a fondo sobre el plan de financiación!», se lamentó uno. Poco a poco se nos fue cayendo el alma a los pies. Ahí estaban reunidos algunos de los mejores y más experimentados científicos de Europa, y todos se sentían como alumnos de instituto antes de los exámenes orales al final de la secundaria. Cuando entramos en la sala para realizar nuestra presentación, vimos frente a nosotros a una comisión de veinte miembros sentados en forma de U. Igual que gladiadores romanos, avanzamos por la arena con la muerte científica a la vista. Ahora bien, ¿dónde estaban los clarines?

Nuestra ponencia no habría podido ir mejor. Coordinados a la perfección, Michael, Luciano y yo nos íbamos pasando la pelota, y acabamos con un aterrizaje de precisión en el segundo exacto del tiempo asignado. Entonces comenzaron las preguntas, para las cuales nos mostramos bien compenetrados y que resolvimos armoniosamente en equipo. La única astrónoma de la comisión, Catherine Cesarsky, había sido directora de la ESO y conocía muy bien la materia. «¿Cuál es su relación con el Telescopio del Horizonte de Sucesos?», preguntó señalando exactamente el punto débil de nuestra solicitud, la estructura organizativa todavía poco clara del EHT. ¿Qué ocurría si tenía lugar una riña y se desintegraba todo? «Queremos ser una parte del proyecto y colaborar en su construcción para que los recursos se complementen —respondimos nosotros—, pero para eso se necesita financiación con la que negociar bien. Y, en caso de emergencia, también podemos llevar a cabo el experimento en solitario». Catherine Cesarsky sonrió; al parecer habíamos dado la respuesta correcta a una de las preguntas más importantes. Teníamos a la comisión de nuestra parte.

El tiempo estaba a punto de agotarse. «Tengo una pregunta más —pidió la palabra otro miembro de la comisión—. No comprendo esos dos empleos de la tabla de su presupuesto para el trabajo de relaciones públicas, ¿puede explicárnoslo usted?». Mi corazón se detuvo: ¿está preguntando por números! Mi cabeza era un agujero negro mientras mi boca balbuceaba algunas frases

generales. La entrevista terminó; nos fuimos todos inseguros de vuelta a casa. ¿Había sido un éxito la presentación? ¿Había funcionado? ¿O se nos había ido todo al traste en los últimos cinco minutos?

Dos semanas más tarde recibimos la carta del presidente del ERC. Suelo recibir cartas como esa, por lo que sé que solo hay que leer las cuatro primeras palabras y entonces sabes lo que hay que saber: «Es un grato placer...», ponía en esta. ¡Habían aceptado nuestra solicitud! Me levanté y me puse a caminar por mi despacho en silencio y feliz. De todos modos, la comisión nos había recortado un millón de euros por mis balbuceos en los últimos cinco minutos... Nunca había perdido tanto dinero en tan poco tiempo. A pesar de todo, ¡lo habíamos conseguido! De pronto éramos los primeros en disponer de tantísimo dinero contante y sonante para el EHT, catorce millones de euros. ¿Funcionaría ahora la cooperación con los norteamericanos?

Ese mismo día escribí un correo electrónico a Doeleman y le anuncié que iba a reunirme con él en Boston. Reservé un billete de avión, y a los tres días estaba sentado en una oficina con él y con Colin Lonsdale, el director del Observatorio Haystack, que actuó como intermediario con su carácter equilibrado y apacible. Durante dos días debatimos los pasos siguientes y acordamos la firma de una declaración de intenciones para trabajar conjuntamente en el Telescopio del Horizonte de Sucesos.

Shep Doeleman estaba redactando, junto con Dimitrios Psaltis, un teórico de Arizona experto en gravitación, y con otros colegas estadounidenses, una gran solicitud para la Fundación Nacional para la Ciencia (NSF), el patrocinador más importante de proyectos científicos en Estados Unidos. Escribimos una carta de apoyo y nos comprometimos a colaborar con el equipo de Doeleman. También fue aprobada esa solicitud, de modo que desde la sede central de la NSF en Virginia, se asignaron ocho millones de dólares al proyecto del EHT. En conjunto, ahora teníamos el dinero suficiente y nos pusimos a trabajar en la planificación concreta del nuevo experimento.

La reunión de Boston no era suficiente. En Europa teníamos que formar nuestro propio grupo. Logré reclutar a Remo Tilanus, un astrónomo experimentado, como gestor del proyecto; durante muchos años se había responsabilizado del Telescopio James Clerk Maxwell (JCMT), en Hawái, de la parte correspondiente a los Países Bajos, y donde se había involucrado de manera decisiva en los experimentos VLBI.

Al mismo tiempo aparecieron por sorpresa frente a la puerta de mi domicilio de Nimega cinco jóvenes estudiantes de máster, interesados en el

EHT y a quienes pude ofrecer unas plazas de doctorado; era un grupo fantástico el que comenzaba a formarse por aquel entonces. Me sobrevino la sensación de que me habían caído del cielo, pero muchos procedían de los alrededores de Nimega. A pesar de todo, al final teníamos a personas de siete nacionalidades distintas en nuestro equipo<sup>[134]</sup>.

«Vamos a conquistar el mundo, pero con simpatía», era el lema que inculqué a todos los miembros del grupo. Mis estudiantes y colaboradores gozan de muchas libertades, pues mi objetivo es que descubran por sí mismos lo que los impulsa. No quiero persuadirlos ni obligarlos a hacer nada. Cada cual debe encontrar finalmente su propio lugar, porque solo entonces se puede trabajar en algo con ganas y con toda el alma. Es importante que cada cual posea y persiga la meta que se corresponda con sus talentos reales, así como que esos talentos complementen el grupo, en lugar de competir unos contra otros.

Durante un taller que tuvo lugar en el Instituto Perimeter, una institución de investigación dedicada a la física teórica ubicada en Waterloo, Canadá, la diplomacia de trastienda alcanzó su punto álgido en noviembre de 2014, y los congresos se convirtieron para nosotros en algo casi secundario. En ese taller, varias docenas de astrónomos luchaban por su papel en el EHT. ¿Quién debía pertenecer a la junta directiva? ¿Cómo iba a ser la estructura organizativa? Había que romper ese nudo en la última tarde. Las negociaciones se prolongaron hasta bien entrada la noche; fue una lucha sin puños, a pesar de que alguno que otro sí descargó el puño sobre la mesa. Hacia la medianoche habíamos llegado finalmente a un acuerdo de cómo debía ser el EHT en el futuro. Lo sellamos con un apretón de manos y acordamos dejarlo así; pero a la mañana siguiente algunos intentaron renegociar.

Solo después de cincuenta teleconferencias, en el verano de 2016, el EHT pasó a ser una plataforma colaborativa temporal. Los acuerdos se firmaron definitivamente un año después; aunque para entonces ya habíamos realizado nuestro experimento. Esa plataforma colaborativa constaba de trece socios institucionales: cuatro de Europa, cuatro de Estados Unidos, tres de Asia, uno de México y otro de Canadá. Todos tenían el mismo peso representativo en una junta directiva como órgano superior.

Un equipo de tres personas compuesto por un director, un gestor y un científico del proyecto asumiría la administración del día a día, mientras que un consejo científico de once miembros electos, denominado Science Council, decidiría y supervisaría el programa científico.

Shep Doeleman se convirtió en el director del proyecto; Dimitrios Psaltis, en el científico; y Remo Tilanus, en el gestor del proyecto. Yo fui elegido presidente del consejo científico y mi colega de tantísimos años, Geoff Bower, vicepresidente. Este, entretanto, se había mudado a Hawái y había entrado al servicio de los astrónomos taiwaneses. La dirección de la junta directiva la asumieron Anton Zensus, director del grupo VLBI de Bonn, y Colin Lonsdale, del Observatorio Haystack.

Así estaba repartido el poder, pero no había ni una sola mujer en los puestos de dirección o en la junta directiva. Considero esto una tara de nacimiento del EHT, de la que no podemos sentirnos orgullosos. Solo en el Science Council había dos mujeres, una de ellas era Sera Markoff, que entretanto daba clases en Amsterdam.

#### DE EXPEDICIÓN A ARIZONA

Paralelamente a las intensas y lentas negociaciones, llevábamos mucho tiempo ocupados con los demás preparativos y con las primeras expediciones. El telescopio ALMA estaba preparado por fin para las primeras mediciones VLBI, que debían llevarse a cabo en el mes de enero de 2015<sup>[135]</sup>. Ahora teníamos que demostrar que éramos capaces de dominar tanto técnica como organizativamente un experimento a lo grande. Todos los telescopios iban a estar dotados con el mismo equipamiento VLBI de última generación. El 1 de septiembre de 2014 comenzaron a llegar los primeros fondos del Consejo Europeo de Investigación. Ese mismo día, Remo Tilanus realizó los pedidos necesarios para el equipamiento VLBI, de modo que los componentes delicados y de especial importancia llegaran a tiempo para los telescopios. El suministro de los llamados grabadores de datos Mark 6 se encargó a una empresa de Boston. Los técnicos en Groninga construyeron ellos mismos y con poca antelación los filtros electrónicos con ayuda de Bonn y con los planos de construcción procedentes de Haystack.

Centenares de los discos duros más modernos iban a enviarse a las estaciones del telescopio a través del Observatorio Haystack. El pedido se retrasó, y tras una fuerte ventisca en el invierno de 2015, los Estados de Nueva Inglaterra quedaron sepultados de un día para otro bajo un grueso manto de nieve y hielo; no funcionaba nada. Un colega resbaló en el hielo y

sufrió una fractura grave. Ya no podíamos adquirir en Estados Unidos el elevado número de discos duros que precisábamos, y todavía no se había dado la orden de pago para el dinero estadounidense. Remo Tilanus se vio obligado a improvisar. En cinco días consiguió realizar un pedido de discos duros al por mayor a través del sistema de la Universidad Radboud de Nimega, los encargó en los Países Bajos, los mandó en avión a Boston y desde allí los distribuyó por todo el mundo.

Hasta la fecha nadie sabe cómo lo consiguió. Aquí nos encontramos con los milagros de la globalización y con las acciones heroicas particulares de un gestor de proyectos de las que casi nadie se da cuenta. Al final, todas las piezas requeridas y solicitadas llegaron a las estaciones de los telescopios a tiempo, y los técnicos locales las instalaron y probaron *in situ*.

Todo estaba preparado, y nuestra primera gran expedición conjunta se desplegó a finales de marzo de 2015 en todos los países. Queríamos interconectar en todo el mundo el mayor número posible de telescopios. Viajé a Estados Unidos, al telescopio submilimétrico (SMT) en Arizona, a la cumbre del monte Graham. Conduje a través del pintoresco paisaje del sudoeste estadounidense, pasé al lado de roquedales escarpados, de cactus, de pequeños asentamientos de cabañas de madera móviles, de la inmensa tienda de recuerdos *The Thing* y de una cárcel en el desierto que advertía con amplios carteles de unos presos fugados. Di un pequeño rodeo por la pequeña localidad de Safford, que se encuentra cerca de la carretera de la montaña, y me abastecí de provisiones suficientes para la siguiente semana. Para el viaje a la galaxia tienes que traerte todo lo necesario, excepto una toalla.

De vuelta a los pies de la montaña recibí en el campamento base unas instrucciones de seguridad y una radio. Entonces comenzó la aventura de la ascensión en coche a lo largo de la carretera estatal 366 de Arizona. En el aeropuerto tuve que alquilar un vehículo con tracción en las cuatro ruedas y me dieron una enorme Ford RAM Pickup de color rojo para mí solo; esto te da una sensación muy americana, incluido el elevadísimo consumo de combustible. El ascenso iba desde los mil metros de altitud de la meseta hasta los tres mil doscientos metros de altura del monte Graham; el telescopio se encontraba en una pequeña meseta montañosa. Por el camino vi carteles del Campamento Bíblico de la Iglesia de Cristo de Arizona y de la zona de acampada Shannon. El paisaje, que al principio parecía el de una película del Oeste, cambió: cumbres cubiertas de nieve y bosques de abetos como en los Pirineos flanqueaban ahora mi ruta.



Terminó la carretera asfaltada, por detrás de una barrera continuaba el camino lleno de baches hasta que un árbol caído me bloqueó el paso. No di con el camino correcto en el cruce, me sentía cansado y esos últimos metros en las alturas son particularmente empinados y estrechos, de modo que ese tramo solo es transitable por un vehículo en subida o en bajada. Con el aparato de radio me informé de si estaba despejado el camino: «¿Hay algún vehículo descendiendo por el camino de acceso?», pregunté, pero no obtuve respuesta, así que me anuncié: «Un vehículo se dispone a ascender», y pisé el acelerador. El todoterreno se bamboleaba de un lado para otro mientras se abría paso hacia arriba a través de curvas muy cerradas. El camino continuaba montaña arriba por una pista increíble de gravilla que no quise ni imaginarme lloviendo. De pronto, alcancé el ancho aparcamiento que no puede faltar en ningún lugar de Estados Unidos, frente al telescopio, un poco más abajo de la cima.

La construcción, de ciento treinta y cinco toneladas, es impresionante. En la base se encuentran los dormitorios y la cocina. La parte superior, giratoria, alberga el telescopio y los instrumentos. La fachada delantera y el techo pueden abrirse. Si no lo obstaculiza ninguno de los árboles que están protegidos allí, el plato de antena de diez metros muestra una vista clara del cielo. Por lo demás, el telescopio está bien protegido en el complejo de edificios. En el nivel que hay justo debajo del plato de la antena se encuentra una pequeña barandilla y la sala de control, a la que se accede por una escalera. Estas dos últimas giran hacia dentro en relación con la parte externa del edificio cuando el telescopio cambia de posición. Esto siempre produce confusión, porque durante las observaciones la escalera se mueve con el telescopio cuando se apunta a una posición nueva en el cielo. Cada vez que salgo de la cocina o del dormitorio, tengo que ponerme a buscar la escalera para subir, porque siempre está en un lugar diferente. ¡Es para volverse loco!

El plato en sí está compuesto por una estructura de plástico reforzado con fibra de carbono, y recubierto por una fina capa de aluminio. Esta es la razón por la que el telescopio destella como un espejo gigante y nunca debe apuntar en la dirección del Sol, pues, de lo contrario, mutaría en un espejo ustorio y se calcinaría. Uno de los primeros telescopios submilimétricos fundió su receptor de esta manera.

El monte Graham es ideal para las observaciones del cielo, pues la concentración de vapor de agua, que altera las mediciones, es mucho menor en su cima. Algunas personas deben aclimatarse primero al aire enrarecido porque tienen bastante dificultad para respirar. También yo percibía ligeros

dolores de cabeza, pero por suerte podía subir bien las escaleras del observatorio; y el entrenamiento de fútbol y de voleibol merecen mucho la pena allí en lo alto. Debido a la escasa humedad del aire se me secaban la garganta y la piel, lo cual hacía que me despertase siempre por las noches; es el destino de quienes nos dedicamos a la astronomía. Hasta mis provisiones notaban la presión negativa: la bolsa de patatas fritas se había inflado de pronto al máximo y la bola de mi desodorante salió disparada con un estallido cuando lo abrí. No me alcanzó por los pelos. El desodorante se derramó por el cuarto de baño. Deseé que no hiciese demasiado calor en los siguientes días, porque si sudaba lo iba a pasar mal.

Afuera, en la cima del monte Graham, me rodeaba el perfume del bosque de abetos. Un claro proporcionaba el panorama sublime de las poco pobladas llanuras y valles allá abajo y el cielo limpio en lo alto. Como radioastrónomo que trabaja con frecuencias submilimétricas, mi deseo es el de un cielo sin nubes, para que las ondas alcancen los platos de nuestras antenas con los mínimos obstáculos en la atmósfera. Las ondas de radio normales penetran fácilmente a través de las nubes, pero las ondas cortas que queremos observar, en cambio, son absorbidas por el vapor de agua presente en el aire y en las nubes.

El monte Graham se halla en buenas manos astronómicas. A doscientos metros al este del SMT, un gran bloque gris sobresale por entre las copas de los árboles. Se trata del Gran Telescopio Binocular, un gigantesco telescopio óptico con dos espejos de 8,4 metros. Algunos institutos alemanes de investigación participan en una cuarta parte en este telescopio. Los espejos con tecnología de panal son una especialidad del Mirror Lab, en Arizona. «Puedes pedirnos cualquier espejo que quieras —me dijo Peter Strittmatter, antiguo director del Observatorio Steward, antes de subir a la montaña—, siempre y cuando mida exactamente 8,4 metros». Strittmatter era muy bueno vendiendo telescopios.

Al oeste del SMT hay un observatorio, pequeño y poco llamativo, pero no obstante muy especial. Alberga el Telescopio de Tecnología Avanzada del Vaticano. Esta construcción alargada recuerda un poco una iglesia: una nave extensa rematada por una cúpula plateada. Sin embargo, debajo no hay ningún altar, sino un telescopio óptico con un diámetro de 1,8 metros.

Los astrónomos del Vaticano siguen influyendo en nosotros, pues fueron quienes desarrollaron en el siglo XVI nuestro calendario actual. Este observatorio moderno fue fundado a finales del siglo XIX en Roma, pero

cuando se extendió el alumbrado nocturno por las calles, se trasladó a la vecina Castel Gandolfo y, posteriormente, pusieron una filial en Arizona.

Una noche que no teníamos observaciones hice una visita a nuestros vecinos. Tres jesuitas trabajaban entonces en ese puesto de observación católico; andaban al acecho de asteroides potencialmente peligrosos para la Tierra. Disfruté del ambiente tranquilo y amigable. El padre Richard Boyle estaba allí, en otro tiempo dirigía en el Vaticano un curso de verano para estudiantes de astronomía de todo el mundo en el que yo participé. En la actualidad, parece pasar todo su tiempo en el telescopio y vivir casi como un eremita en la montaña. El día a día en un observatorio tiene realmente algo de monástico y meditativo. Un astrónomo en observación orienta su vida hacia el cielo, y las estrellas y las galaxias marcan el ritmo. Nada te distrae de este objetivo. Disfruté de aquel tiempo en la montaña, en el que la vida era sencilla y estaba más cerca del cielo.

Nuestro equipo en Arizona se compone de un puñado de colegas del EHT. Entre ellos se encuentran Vincent Fish, del Observatorio Haystack, y Dan Marrone, de Arizona, a quien relevé allí arriba y que seguiría acompañándonos desde Tucson. No había suficientes camas en el observatorio para un equipo tan grande, así que no todos pudimos estar allí al mismo tiempo. Junto al telescopio submilimétrico me sentí desde el principio como en casa. Por supuesto que sé cómo es y cómo funciona un telescopio, pero trabajar con él es siempre algo muy distinto. En realidad, pasar de una radioemisión a una imagen que pueda mostrarse a otros astrónomos, físicos y al público es siempre un largo proceso. Sin embargo, es una vivencia grandiosa cuando el cosmos se revela él mismo.

El espejo parabólico del telescopio recoge en primer lugar las ondas de radio del espacio y las concentra. Para nuestra longitud de onda, tiene que estar ajustado en toda su magnitud a una precisión de menos de cuarenta micrómetros; aquí es todavía mejor. Mediante el espejo secundario, que está suspendido de cuatro puntales frente al telescopio, las ondas retornan a la cabina del receptor que hay tras el plato. Estas se introducen a través de una bocina metálica en la guía de ondas del receptor. La bocina asume en principio la función del amplificador de un antiguo gramófono. Las señales de alta frecuencia se mezclan entonces en el receptor a una frecuencia más baja y pasan a un cable. De este modo, las señales libres de radio se convierten en ondas eléctricas en un cable de cobre.

Entonces llega el momento de almacenar las ondas. Hoy en día puede almacenarse digitalmente incluso la luz, ¡un proceso de lo más asombroso!

Para ello hay que volver a filtrar en primer lugar las ondas y ajustar su frecuencia a una más baja, la de nuestro equipamiento. Un aparato del programa SETI de Dan Werthimer para buscar señales de radio extraterrestres convierte las ondas de radio filtradas varias veces en bits y bytes. La luz de las profundidades del espacio se corresponde ahora a una secuencia pixelada de torrecillas virtuales de cero, uno, dos o tres bloques de alto. La altura de las torrecillas solo representa de una manera tosca la oscilación de las ondas de radio, pero de todos modos tenemos muchas torrecillas y muchas oscilaciones.

Las cantidades de datos que grabamos son enormes en ese proceso: treinta y dos gigabits por segundo, que son treinta y dos mil millones de ceros y unos por segundo. Si dibujáramos sobre un papel nuestras torrecillas de datos con rayas de un grosor milimétrico, al cabo de poco más de dos segundos necesitaríamos una cinta de papel que diera una vuelta a toda la Tierra. Entretanto, las cintas de papel han sido sustituidas —afortunadamente— por discos duros. Así pues, también la revolución digital ha desempeñado un papel importante para el EHT.

Tras la medición, la «luz» en el disco duro se envía simplemente por servicio de paquetería a Boston y a Bonn, donde continúan procesando los datos. Solo después de largas operaciones se origina una imagen diminuta a partir de cantidades ingentes de datos, ¡se trata de una reducción de datos en toda regla! De hecho, en realidad solo dibujamos ruido: del cielo, del receptor y un poquitín del de la radiación del borde del agujero negro. Por suerte, una gran parte del ruido del cielo y del receptor se filtra después durante el procesamiento de los datos. La energía total de ruido que un telescopio de este tipo reúne de nuestra radiofuente cósmica en una noche es increíblemente pequeña. Corresponde a la energía de un pelo de un milímetro de longitud que cae al vacío sobre una placa de cristal y desde una altura de medio milímetro. Un impacto así apenas rayaría una placa de cristal, pero estamos en disposición de medirlo.

Para combinar posteriormente los datos a la perfección, cada telescopio necesita un reloj de precisión absoluta. Y los de este tipo se fabrican, como es natural, en Suiza; son relojes para físicos que, aunque no se traten de obras maestras de la mecánica, son relojes de precisión elevada para la era de la física cuántica. En la localidad de Neuchâtel, cercana a Berna, se encuentra una de las fábricas de semejantes instrumentos. En ella se han construido muchos relojes atómicos que son empleados en el sistema Galileo de navegación por satélite, la alternativa europea al sistema GPS. También

nosotros teníamos relojes atómicos fabricados en Neuchâtel: relojes de máser de hidrógeno con un precio unitario de cinco dígitos en euros.

Quien quiera trabajar como astrónomo con un telescopio no debería perder jamás las simpatías de una persona: el operador. Maneja el telescopio y está al timón como un capitán en su barco. Se lo conoce de memoria, por dentro y por fuera, y pilota el plato de la antena desde su sala de mando, en la que está sentado frente a una pared llena de pantallas. En el telescopio submilimétrico de la montaña había siempre dos operadores que se alternaban en turnos de doce horas. Eran de aquella zona y estaban acostumbrados a la vida solitaria en el monte Graham, que en el idioma de los indios apaches significa «gran montaña sedente».

Durante las mediciones, el operador también puede pasar el timón virtual a los astrónomos presentes, pero vuelve a asumir el control de inmediato si surgen problemas o si la fuerza de los vientos impiden que siga funcionando.

Para cada telescopio en los experimentos VLBI hay un horario estricto al que debemos ceñirnos y que está automatizado, ya que, en definitiva, todos los telescopios tienen que estar dirigidos a la misma radiofuente en el mismo instante, con absoluta precisión. Para evitar la confusión con los husos horarios, todas las indicaciones de tiempo se dan en tiempo universal coordinado; esto es, en el huso horario del Real Observatorio de Greenwich en Inglaterra, hoy en día convertido en museo.

En las mediciones no observamos solamente el centro galáctico o el núcleo de la galaxia M87. Entre uno y otro, los platos de radiación giran sin cesar hacia las fuentes de calibración para determinar la sensibilidad de medida de nuestros telescopios. Con frecuencia empleamos cuásares o galaxias conocidas. Entre ellas se encuentra, por ejemplo, la galaxia 3C 84, situada en el cúmulo de Perseo, a una distancia de doscientos cuarenta millones de años luz de la Vía Láctea, y que detectó Herschel en el cielo a finales del siglo XVIII. La galaxia 3C 84, conocida como N6C 1275 para la astronomía visible, es una radiofuente fiable y potente.

Con frecuencia se tiene la mirada puesta incluso en tres o cuatro fuentes distintas. Solo de esta manera podemos calibrar bien todo nuestro sistema, pues incluso los relojes atómicos son demasiado imprecisos para la VLBI. Los corregimos con ayuda de esas fuentes cósmicas y de este modo nos aseguramos de que todos ellos se muevan después al mismo compás.

Cambiar la dirección de enfoque del plato de la antena puede durar algunos minutos. Para ese tiempo, a los operadores en Arizona se les ocurrió una pequeña broma: cuando el telescopio se mueve, en la sala de control y en

la cocina suena la animada melodía «Classical Gas» de la película australiana *La luna en directo*<sup>[136]</sup>. Esta trata sobre el plato de antena de sesenta y cuatro metros ubicado en Parkes, que recibió las primeras imágenes televisivas del alunizaje del Apolo 11. Quien alguna vez haya observado estrellas o agujeros negros desde el monte Graham de Arizona no se librará ya nunca de esa melodía pegadiza.

Los turnos de medición eran estresantes a veces. A menudo había que reajustar el telescopio o los demás instrumentos. Las refracciones atmosféricas hacían aparecer la fuente —ligeramente desplazada— en otro lugar, y las fluctuaciones de temperatura cambiaban la dirección visual de la gigantesca construcción de una manera mínima, pero perceptible. Todo ello llevaba a errores que nosotros deseábamos reconocer y evitar. Ese apuntamiento debía ser corregido regularmente, junto con el enfoque del telescopio, durante las pausas empleando las fuentes de calibración más brillantes, casi todas las cuales son también agujeros negros. A veces, cuando hacía mal tiempo, tampoco encontrábamos de inmediato la fuente deseada o sí, pero la volvíamos a perder. Entonces, igual que en el avistamiento con prismáticos al atardecer, teníamos que recomenzar una y otra vez hasta que funcionaba.

De todos modos, la posición en el cielo de las radiofuentes cambia continuamente, ya que la Tierra continúa girando. Por tanto, nos veíamos obligados a seguir con el telescopio ese movimiento errante de la radiofuente. Además, las estrellas y los agujeros negros salen y se ponen más temprano en el cielo de España que en el de Arizona. Esto plantea dificultades para un experimento VLBI con varios telescopios distribuidos por todo el mundo, porque no pueden observar un objeto desde su ubicación en el momento exacto en todas partes. En ocasiones se solapaban los intervalos comunes de observación solo durante breves periodos.

De vez en cuando, el telescopio tampoco colaboraba. Un telescopio es solo un ser humano, decía siempre. El 21 de marzo de 2015 dimos el parte: «Hace buen tiempo». Así pues, podríamos retomar puntualmente nuestras observaciones. Apenas una hora después de repente surgieron algunos problemas técnicos. «El telescopio está funcionando mal. Los operadores tienen que desviarse del horario planeado para repararlo», escribimos en el informe.

En otras ocasiones, había que detener el telescopio porque los cables no eran lo suficientemente largos para otra rotación. Estos aparatos suelen estar diseñados para una rotación y media; solo pueden moverse en la misma

dirección y perseguir un objeto celeste durante un tiempo determinado. Alcanzado ese máximo, el operador daba una vuelta completa a toda la instalación para desenredar el lío de cables. Entonces sonaba durante algunos minutos el runrún de *La luna en directo*. Yo esperaba mosqueado hasta que podíamos proseguir; nos habíamos perdido por lo menos una serie de mediciones y teníamos que saltar directamente al punto siguiente del plan.

Al final de esa semana me fui del monte Graham con sentimientos encontrados. Funcionaron muchas cosas, aprendimos mucho, el tiempo meteorológico fue regular. Descendí la montaña cansado pero, a pesar de todo, contento. Unos meses después nos enteramos de que algunos de los módulos no estaban todavía adaptados de manera óptima y que la calidad de los datos no era buena.

En la primavera de 2016 tuvo lugar el segundo gran ensayo general. En ese ínterin se había sometido a algunos telescopios a actualizaciones técnicas. Especialmente importante fue la circunstancia de que por primera vez pudimos integrar en nuestra red el telescopio ALMA de Chile con fines de prueba. Si demostrábamos que todo iba bien con este, podríamos iniciar una medición en 2017, que ya no sería ningún ensayo general más, sino el auténtico estreno de nuestro importante proyecto.

Antes de que pudiéramos comenzar el ensayo de 2016, estalló una bomba científica a comienzos de año. La colaboración entre el Observatorio LIGO y el interferómetro Virgo anunció una rueda de prensa para el 11 de febrero de 2016. Nos esperábamos una noticia sensacional. Aunque el secreto ya se había filtrado en círculos especializados, estábamos como hechizados frente a las grandes pantallas del aula magna de nuestra universidad y seguíamos con mucha gente el impresionante anuncio<sup>[137]</sup>. Por primera vez se había logrado medir de forma directa las ondas gravitatorias que se originan en la fusión de dos agujeros negros. Al mismo tiempo se midió un temblor increíblemente débil del espacio aquí, en la Tierra. Los agujeros negros fusionados eran treinta veces más pesados que nuestro Sol, pero aun así seguían siendo doscientas mil veces más livianos que el agujero negro en el centro de la Vía Láctea. «Por primera vez hemos podido “oír” a los agujeros negros —dije yo entusiasmado—, ¡ahora vamos a ver uno!».

Lo que me asombra es la inmensa suerte que tuvieron mis colegas. Antes de sus mediciones no era seguro que pudieran existir agujeros negros de ese tamaño que se fusionasen. La señal de las ondas gravitatorias era mucho más intensa de lo esperado y además el descubrimiento se realizó al final de una prueba. Si los colegas la hubieran desconectado solo algunas horas antes, no

habrían recibido los datos correspondientes<sup>[138]</sup>. Después no volvieron a encontrar una señal tan intensa. «No tendremos tanta suerte nosotros —pensé con envidia—. Cuando hagamos nuestro gran experimento el año que viene, seguro que hará mal tiempo, se estropearán los telescopios, y el agujero negro en M87 será mucho más pequeño de lo pensado». Me estaba preparando para una larga prueba de paciencia.

Dos meses más tarde recorrí de nuevo la estrecha carretera cuesta arriba que lleva hasta el telescopio submilimétrico de Arizona. Esta vez también formaban parte de nuestro equipo mi estudiante de doctorado Michael Janßen y la estudiante de máster Sara Issaoun<sup>[139]</sup>. Él proviene de la apacible localidad de Kalkar, en el curso bajo del Rin, y acababa de escribir un extraordinario proyecto de fin de máster conmigo. Ella procede de una familia bereber de Argelia; su padre y su madre son ingenieros y emigraron durante unas revueltas a las regiones francófonas de Canadá, cuando ella era pequeña. Posteriormente, los padres se mudaron a la región de Arnhem, donde trabajan en una empresa de alta tecnología.

Sara retomó su carrera de Astrofísica en la Universidad McGill de Canadá y durante la pausa intersemestral vino a mi despacho y me preguntó si tenía algunas tareas para ella. Le pasé los datos de las mediciones de Arizona de 2015 y me quedé sorprendido al ver lo que hizo con ellos. Al cabo de poco tiempo mejoró las curvas de calibración o las elaboró de nuevo en su totalidad. Encontró errores incluso en el software del telescopio, y me di cuenta de que Sara era una astrofísica con un talento inusual. En 2016 la llevé conmigo al telescopio de Arizona y al cabo de tres días casi se quedó sin trabajo por hacer. Michael, por su parte, había automatizado el funcionamiento del software, mientras que Sara, la colaboradora más reciente, asumió el control del telescopio prácticamente por completo. Entretanto mejoró aún más mis antiguas mediciones de calibración del año 2015. Ya no soltaría el mando del telescopio en los siguientes años. Y eso que ni siquiera había comenzado su tesis doctoral. En última instancia, todo el equipo del EHT sacó provecho de la situación, pues Michael y Sara asumieron posteriormente la responsabilidad de los procedimientos de calibración para todos los observatorios, y ambos obtuvieron una mención honorífica por su colaboración.

Desde un punto de vista técnico, los resultados de las mediciones de prueba fueron un éxito y condujeron a la anhelada luz verde de ALMA; sin embargo, nunca fueron evaluados en detalle, ni publicados científicamente. Ambas mediciones pusieron a prueba el EHT y a nuestro equipo. Si



queríamos tener éxito, el variopinto montón de científicos y de técnicos procedentes de todos los continentes y países tenían que aprender a trabajar juntos. Y ahora sabíamos que si todo iba bien, entonces podíamos conseguirlo para el año siguiente, y solo con muchísima suerte.

## 4 De expedición

### EL GRAN EXPERIMENTO

Ahora se iniciaba la cuenta atrás para nuestro gran experimento. La semilla estaba plantada, la plantita había crecido hasta convertirse en una planta imponente. Había llegado el momento de la cosecha.

Todo el equipo del EHT había estado esperando febrilmente el mes de abril de 2017. Después de años de preparativos, de peleas científico-políticas, y de solucionar problemas técnicos teníamos nuestro sueño al alcance de la mano. A comienzos de mes, ocho observatorios del EHT estaban dirigidos a los mismos objetivos en el cielo: dos estaban ubicados en Chile, dos en Hawái, uno en España, otro en México, uno en Arizona, y otro en el Polo Sur<sup>[140]</sup>. Además, Sera Markoff y un gran grupo de astrónomos habían organizado toda una armada de telescopios en tierra y en órbita que observarían en paralelo a nosotros. Desde un telescopio de infrarrojo cercano hasta uno de rayos gamma, todo estaba preparado para cubrir el espectro entero de la luz, de modo que no nos perdiéramos ninguna radiación.

Sería una expedición de condiciones extremas. En Chile, los astrónomos tienen que apañárselas con el aire enrarecido y seco a una altitud de más de cinco mil metros, y en la ubicación de la región antártica hay que hacer frente a temperaturas gélidas y a la soledad. Allí, la temperatura media anual es de casi  $-50$  grados. Nuestro plan de penetrar en el espacio recordaba un poco a las épocas antiguas de la astronomía, cuando los investigadores viajaban alrededor del mundo para explorar el cielo desde el mejor puesto de observación posible y acercarse un poco más a los secretos del cosmos. Por aquel entonces, igual que hoy en día, el fracaso y el triunfo convivían estrechamente. Lo mismo que le ocurrió a Guillaume Le Gentil, quien durante

años en el siglo XVIII persiguió sin éxito por la India el tránsito de Venus, nuestra imagen de un agujero negro podía acabar sin problemas como una hoja de papel en blanco. Fracasáramos si el tiempo meteorológico y la técnica no colaboraban.

Durante la primavera, muchos de mis colegas se hallaban en las últimas fases de la planificación. Se envió el equipamiento, se escribieron innumerables mensajes, se realizaron videoconferencias y se organizó un ensayo general. Para poder comunicarnos con facilidad entre nosotros, creamos un grupo de chat, al que cada vez se apuntaban más miembros. El 5 de marzo de 2017 dio señales de vida el astrónomo alemán Daniel Michalik desde el telescopio del Polo Sur, donde iba a pasar varios meses de invierno en el hielo de la Antártida. En realidad, Michalik trabaja para la ESA, había participado ya en el programa Gaia y durante aquellos meses iba a llevar a cabo mediciones del EHT junto con un colega. Vivían tan cerca del Polo Sur, que podían ver la marca de la ubicación del polo desde la ventana de la cocina. La conexión era muy mala y la primera señal de vida de los dos desde el Polo Sur fue una cita de Pink Floyd, de la canción «Comfortably Numb»: «Hello? Is there anybody out there? Just nod if you can hear me. Is there anyone home?». («¿Hola? ¿Hay alguien ahí? Asiente si puedes oírme. ¿Hay alguien en casa?»). Estamos contentos de tener a alguien de los nuestros allá abajo.

La mayoría de los colegas partieron hacia los telescopios a finales de marzo de 2017. A lo largo de varios días, los investigadores de todo el mundo fueron llegando a las estaciones para el gran momento<sup>[141]</sup>.

En aquellos días pudo verse el milagro de que el telescopio EHT se convirtiese en una cooperación internacional. Cada vez que aparecía una nueva cara en nuestro grupo de chat, era saludada por los demás miembros del equipo. La alegría se mezclaba con la excitación, la tensión aumentaba. Cada cual tenía sus tareas, en las que debía concentrarse; de lo contrario, no saldría bien el proyecto.

En ningún otro momento fue tan claramente visible la idea del entendimiento internacional como en la medición de 2017; hoy en día, cuando veo las imágenes de los diferentes equipos en los telescopios, me alegra que, como quien no quiere la cosa, se consiguiera reunir a tantas personas distintas. Einstein y Eddington, pacifistas los dos, habrían disfrutado con eso. Y, de hecho, las cosas transcurrieron durante todo el tiempo con bastante tranquilidad. Aunque ese no siempre fue el caso ni antes, ni después.

El 3 de abril me subí en un avión en Düsseldorf que me llevaría a Málaga. Desde allí se iba en un autobús a Granada, a la filial española del IRAM. La ciudad se estaba preparando para las procesiones de Semana Santa, aunque en las calles se respiraba una atmósfera especial poco antes de la Pascua. La primavera ya había asomado, la temperatura se hallaba en una agradable cifra superior a la veintena. Me habría gustado quedarme más tiempo en Granada y asistir a los actos festivos, pero no disponía de tiempo para dejarme llevar por las impresiones de Andalucía. Veía el objetivo de mi viaje desde el horizonte de Granada, donde se elevan, al sudeste, los picos blancos de Sierra Nevada. Desde esta ciudad te puedes ir por la mañana al mar y esquiar por la tarde en la montaña.

El telescopio IRAM se encuentra un poco por debajo de la cima del pico de Veleta. Con sus 3396 metros de altura, es la cuarta montaña más alta de España y la tercera de la península Ibérica. Ya los moros miraban la cima en la Edad Media desde la famosa fortaleza de la Alhambra. Este camino en cuesta fascina a los ciclistas, pues es la subida por carretera más elevada de Europa. El viaje al telescopio en Arizona fue algo especial, pero llegar en el mes de abril al telescopio IRAM, de treinta metros, fue completamente distinto.

A nuestro pequeño grupo se unió de nuevo Thomas Krichbaum, desde Bonn, quien ya había realizado observaciones con frecuencia en el lugar. Viajamos juntos en un Volkswagen Bulli en dirección a la sierra. En el camino hacia el telescopio ganamos una altura de dos mil metros en treinta kilómetros. Las vistas de Granada son espectaculares desde allí. Para aclimatarnos al aire de altura, nuestro conductor se detuvo algunos minutos, una buena oportunidad para él de tomar una taza de café y para mí de disfrutar del magnífico panorama.

Arriba, en la montaña, divisamos el majestuoso telescopio. Una vez llegados, a la salida del teleférico caminamos por la nieve pasando junto a una escuela de esquí para dirigirnos a un vehículo oruga de color rojo en el que destacaban unos adhesivos grandes del IRAM de color blanco. Pusimos nuestras maletas en un compartimento negro de metal y subimos a la cabina. La oruga nos condujo a través de la nieve, los últimos metros cuesta arriba, hasta el telescopio bajo un sol radiante. En las pistas quedaba la última nieve primaveral encharcada y gelatinosa; por encima de nosotros se desplegaba un cielo azul. Todo era muy prometedor.

Resulta impresionante comprobar cómo en los lugares más remotos de la Tierra se construyen estaciones de investigación de hormigón y acero de

muchas toneladas de peso. ¡Qué esfuerzos ingentes asumen los seres humanos para investigar y ampliar sus horizontes! El telescopio IRAM es un monumento a la curiosidad y tiene su trono a 2920 metros de altura; es casi tan alto como la montaña más alta de Alemania, el Zugspitze.

Este telescopio fue construido en los años setenta a instancias del director del Instituto Max Planck de Bonn de por aquel entonces<sup>[142]</sup>, cuando se instalaron los primeros telesquies. Este director había sido un esquiador apasionado, y se rumorea que eso influyó en la elección de la ubicación.

Hoy en día pululan los telesquies y los esquiadores, pero ninguna otra construcción es tan grande como esta. La instalación es mucho mayor que el edificio giratorio con los muros abatibles de Arizona. La pantalla del telescopio IRAM, blanca como la nieve, tiene el aspecto de lo que cualquiera se imagina cuando piensa en un radiotelescopio clásico. Con sus treinta metros de diámetro, el plato está montado sobre una construcción esférica a la que se puede acceder a través de una puerta de garaje. Debido a que se encuentra en el exterior, el reflector se puede caldear por completo para librarlo de la nieve y del hielo.

Justo al lado del telescopio se alza un edificio de hormigón de tres plantas, desde cuyas ventanas se tienen unas vistas sobrecogedoras de Sierra Nevada. Fue allí donde vivimos y trabajamos. A veces, cuando las nubes estaban muy bajas, la mirada vagaba por encima de ellas como si estuvieras en un avión. Sin embargo, una y otra vez desaparecía también todo el telescopio en la niebla, de modo que desde la sala de control no podía verse siquiera su punta. Cuando llegamos, no había por ninguna parte ni el asomo de una nube o de un jirón de niebla.

El equipo del EHT en el pico de Veleta se componía de cinco personas<sup>[143]</sup>. Por los pelos no vi a Helge Rottmann, experto técnico de Bonn, con quien hice mi doctorado. Se había ocupado en primer lugar de la técnica en el «Pico» y a continuación había viajado a Chile, al telescopio Atacama Pathfinder Experiment (APEX).

En comparación con Arizona, el telescopio IRAM, de treinta metros, es un hotel de cuatro estrellas, si bien con el estilo de los años setenta. Esta amplia construcción ofrecía mucho más espacio que el telescopio situado en el monte Graham de Arizona, y la escalera estaba siempre en el mismo lugar. Había una cocina comunitaria, y podíamos servirnos a nuestro antojo de la nevera y de la despensa, siempre llenas. Sin embargo, no necesitábamos hacer mucho, ya que los equipos de cocina por turnos guisaban para nosotros especialidades andaluzas. Las mujeres de esos equipos mantenían una

competición en toda regla por ofrecer la comida más sabrosa. Al instante se servían sopas, albóndigas con pimientos asados y deliciosos postres. En todo momento había una enorme pata de jamón serrano de la que podías ir cortando algunas lonchas finas con un largo cuchillo jamonero. Además, había queso español y uvas frescas. Así no era de extrañar el buen ambiente que imperaba entre los técnicos, los encargados de la limpieza y los astrónomos. Si no tienes cuidado, engordas un montón allí arriba y acabas sintiéndote como aquella bolsa de patatas fritas hinchada en el monte Graham de Arizona.

Tenían incluso una pequeña mascota, y es que aquel buen abastecimiento culinario no se le había pasado por alto a un zorro que vagaba por esa zona de las montañas. Me contaron que un día consiguió robar la pata de jamón serrano. Desde entonces aparecía una y otra vez por el telescopio y miraba si había algunas sobras para él a pesar de que había una prohibición estricta de alimentarlo. No obstante, seguía yendo regularmente. ¿En serio había alguien que cumpliera esa prohibición?

Allí no había ninguna red WLAN, porque la radiación podría afectar a la delicada electrónica de medición. Los adictos a los teléfonos móviles como yo teníamos un problema.

En la montaña suele haber una docena escasa de personas para operar el telescopio. Entonces, además de nosotros, había otros dos equipos investigadores con quienes compartimos nuestro tiempo de observación. Una hora de observación cuesta unos quinientos euros. En el caso ideal se emplea la instalación las veinticuatro horas del día. Si hace muy mal tiempo, aquí o en cualquier otro lugar del mundo, entonces otro grupo utiliza el telescopio.

A partir del 4 de abril de 2017 dispusimos de un margen de tiempo de diez días para la medición. Junto con Thomas Krichbaum, Vincent Fish había elaborado en un trabajo muy minucioso un programa de observación para todos los días, todos los telescopios y todas las fuentes. En esa ventana de tiempo, el clima tendría que ser muy bueno en todos los telescopios del mundo durante cinco noches para poder cumplir con nuestro programa. La experiencia me enseñó que algo así sucede en muy raras ocasiones. Para una mejor coordinación, mi colaborador Daan van Rossum había programado en Nimega un sistema de seguimiento y control en línea para el EHT. En él convergían los datos de todos los telescopios, de modo que todo el mundo podía ver el estado de los demás. Gertie Geertsema, astrofísica graduada en el Servicio Meteorológico Neerlandés, puso a nuestra disposición en esa plataforma las predicciones del modelo meteorológico global del Centro

Europeo de Previsiones Meteorológicas a Plazo Medio para todos los telescopios. Un primer vistazo a la predicción reveló algo sorprendente. En los siguientes tres días imperaría casi en todas partes un tiempo magnífico, sin nubes. No me quedé muy tranquilo con esos datos meteorológicos. ¿Sabían acaso los neerlandeses predecir correctamente el tiempo en las montañas?

En Boston, Shep Doeleman había instalado una central analógica de comunicaciones, en la que deberían converger todas las informaciones de los telescopios. También había un equipo de filmación preparado para grabar material para un documental<sup>[144]</sup>.

Decidiríamos si realmente llevábamos a cabo o no la observación en una videoconferencia que mantendríamos cuatro horas antes del comienzo programado. En los últimos años todo había transcurrido siempre de una manera algo caótica. ¿Cómo sería en esa ocasión? Coordinar ocho telescopios y a docenas de científicos expertos es tan fácil como pasar delante de una tienda de chuches con una clase de preescolares de la gran ciudad, neuróticos y muy mimados, durante la Cuaresma. Nadie hace caso de las órdenes.

El 4 de abril se sometió a todos los telescopios EHT a una prueba. En una red VLBI a menudo falla la técnica. Los telescopios solo pasan a ser jugadores del equipo si primero los convertimos en eso. Sin embargo, al igual que sucede con los ordenadores, la mayoría de las veces es el operador, es decir, el ser humano, el eslabón débil de la cadena. Los errores más insignificantes impiden el éxito: dos cables que se confunden, datos marcados incorrectamente o un comando equivocado que se introduce sin querer. Todos estábamos en tensión. Los técnicos volvieron a examinar sus aparatos. «Franjas entre el JCMT y el SMA», escribió Remo Tilanus con agitación desde Hawái en nuestro grupo de chat. Le puso cuatro signos de admiración a la frase. «Tuvimos que apagar y volver a conectar una caja tonta, oscura», añadió. Encontrar «franjas» significaba que al menos esos dos telescopios, el telescopio James Clerk Maxwell y el telescopio submilimétrico en el volcán Mauna Kea de Hawái, estaban funcionando bien juntos. Parecía muy prometedor para el día siguiente. Me fui a la cama a recargar las pilas. Al mirar el pronóstico meteorológico supe que al día siguiente la cosa iría en serio. Thomas Krichbaum andaba todavía liado por la sala de control. «¿No te vas a acostar?», le pregunté. «¡Qué va, voy a mirar otra vez si está todo bien», respondió absorto en sus pensamientos.

La tensión aumentó al día siguiente. Una y otra vez surgían problemas en alguna parte del mundo con los registradores de datos Mark 6, a los que les gustaba quedarse colgados de vez en cuando. Expertos de Boston trataban de

ayudar en línea. En nuestro telescopio todo parecía funcionar bien. Thomas Krichbaum informó en el grupo de chat: «Los Mark 6 del Pico están reiniciados y en marcha». Durante la cena tuvo lugar la videoconferencia decisiva. El milagro había ocurrido: en los telescopios de todo el mundo, el tiempo meteorológico era excelente ¡y todo funcionaba!

«Iniciamos la sesión de VLBI, esto no es un simulacro», escribió Doeleman a todos. La medición iba a comenzar exactamente a las 22.31 horas según el tiempo universal coordinado (UTC); en la España peninsular eso es media hora después de la medianoche. Debido a que estábamos ubicados más al este, donde no solo se pone antes el Sol, sino también los agujeros negros, formamos parte del primer grupo de telescopios con permiso para comenzar. El reloj corría.

Como es natural, toda nuestra tripulación llevaba ya mucho rato antes del inicio en la sala de control del telescopio. Nadie quería perderse ese momento. Ahí estaba el panel de control de color plata y verde cardenillo que controlaba los movimientos del plato de treinta metros. Estaba provisto de todo tipo de interruptores gruesos y producía una impresión como de otro tiempo, tal vez de una película de James Bond de los años setenta. Dos relojes marcaban la hora local y la hora sideral, y un gran botón rojo detenía todo movimiento de la instalación en caso de emergencia. Solo las cuatro pantallas de los ordenadores que estaban sobre el panel de control dejaban entrever que la técnica se hallaba entretanto en un nivel completamente distinto.

Los colegas se iban poniendo nerviosos, y lo mismo me pasaba a mí. Todo debería, no, todo debía funcionar bien. Revisamos los instrumentos una y otra vez. ¿Estaban nuestros discos duros programados correctamente y sabían a qué hora tenían que ponerse a grabar? ¿Estaba listo el plan de observación y era de veras el bueno? ¿Suministraba datos el receptor del telescopio? ¿Estaba debidamente ajustado el foco? Una y otra vez miraba los datos sobre la humedad del aire en la atmósfera, que se mostraban en la sala de control. Apenas podía creerme lo buenos que eran. Por seguridad y para calmar los nervios salía una y otra vez fuera, me detenía delante de la puerta y miraba al despejado cielo estrellado. No había nubes a la vista.

Thomas Krichbaum asumió el control y se sentó frente a las pantallas en el sillón de mando del observador. Aprovechó ese ínterin para tomar las primeras mediciones de calibración. Me senté a su lado. Fue igual que por aquel entonces, cuando de estudiante me sentaba a su lado y él me explicaba cómo se manejaba un radiotelescopio. Hay cosas que no cambian ni siquiera después de veinticinco años. Me divierte pensar en eso. Él dirigió el rayo de



visión del telescopio a una radiofuente cósmica. Vimos con claridad cómo la radiación primero aumentaba y a continuación disminuía. Alivio. La señal era intensa; nuestra alegría anticipada también.

La primera radiofuente en nuestra lista era OJ 287, un cuásar en la constelación de Cáncer a una distancia de tres mil quinientos millones de años luz que encierra uno de los agujeros negros más grandes conocidos. Algunos piensan que allí se encuentran incluso dos agujeros negros en órbita mutua<sup>[145]</sup>. OJ 287 era, en cierto modo, nuestro programa de calentamiento, y percibimos con toda claridad su radiación en la pantalla. En realidad solo veíamos dos campanas de Gauss en la pantalla, nada más. El primer «escaneo VLBI», tal como denominamos a nuestras mediciones, estaba previsto que durase siete minutos. Eran las 0.31 horas; por fin empezaba todo. El aviso en las pantallas cambió y señaló que el telescopio había entrado automáticamente en el modo VLBI de medición.

Corrí al cuarto de máquinas contigo. Allí estaban las grabadoras Mark 6 dentro de un armario de instrumentos tan altos como una persona y haciendo un ruido intenso. Los ventiladores zumbaban, las luces parpadeaban. Las lucecitas verdes de la parte delantera destellaban agitadamente y a buen ritmo; los datos fluían, las grabadoras habían arrancado. En la antecámara estaba la pantalla con la visualización del convertidor analógico-digital, que transforma las ondas de radio en ceros y unos, así como la visualización del reloj atómico. Todo funcionaba bien allí también. Me sentí aliviado.

Desde Chile se conectó Helge Rottmann al sistema. «En el Pico están registrando datos las cuatro grabadoras», dijo en nuestro grupo de chat. Ya lo sabíamos. El resto de la noche volví allí una y otra vez a echar un vistazo. Lo que quedase almacenado en aquellos discos duros decidiría sobre el éxito o el fracaso de la operación. Sin embargo, solo sabríamos exactamente lo que contenían al cabo de muchos meses, el tiempo que durará la evaluación de los datos.

Ahora comenzaba la monotonía de la observación. Thomas Krichbaum miraba cada movimiento del telescopio, y lo anotaba a mano en su cuaderno de bitácora. Es un observador de la vieja escuela. Cuando está sentado en la sala de control de un telescopio se encuentra en su elemento. «¿Sigues escribiendo todo a mano?», le pregunté sorprendido. Ya lo hacía por aquel entonces en Effelsberg y me exigía que lo hiciera también yo. Sin embargo, yo escribí en secreto un programa que lo hacía automáticamente por mí. «Bueno, me mantiene despierto. A las cuatro de la madrugada empiezas a

hacer tonterías, y así tienes la mente más ocupada», respondió. Di un suspiro y él agarró el lápiz.

Durante las observaciones en la red del EHT los ocho telescopios nunca miden simultáneamente. Esto se debe a que las radiofuentes de nuestra lista de escaneado nunca pueden ser observadas desde todas las ubicaciones en el mismo momento. Por este motivo, al comenzar las mediciones se oyó el español en primer lugar. El ALMA y el APEX en Chile, el Gran Telescopio Milimétrico (LMT) en México, el SMT en Arizona —todas antiguas colonias españolas— y nosotros, con el telescopio IRAM en España, enfocamos a las 22.31 horas UTC en punto al mismo cuásar en el espacio. Las dos instalaciones en Hawái y el telescopio del Polo Sur tuvieron que esperar todavía.

Paulatinamente iba disminuyendo mi agitación. Estábamos en el camino correcto. Ahora la cuestión era cómo iban las cosas en las demás estaciones. Los mensajes que iban apareciendo poco a poco en nuestro grupo de chat eran motivo de esperanza. «En APEX va todo bien». Los colegas de México, que entretanto habían comenzado su turno, escribieron: «LMT grabando, comprobaciones de los escaneados OK». Doeleman informó desde Boston que también en Arizona estaba funcionando todo con normalidad. Pero ¿qué estaba ocurriendo con el importante telescopio ALMA? Durante un buen rato imperó la falta de noticias desde Chile. Y entonces llegó de allí la frase tranquilizadora: «ALMA ha registrado todos los escaneos hasta el momento».

Siempre se presentan problemas menores, pero eso es normal. México informó de dificultades en la observación de OJ 287. No podían ajustar correctamente el foco. Igual que en una cámara fotográfica, los colegas no tenían suficiente nitidez en su plato de antena. El telescopio era lo bastante grande como para compensar esto, pero al equipo de calibración le iba a costar un montón compensar lo suficiente la pérdida de la señal. Luego se produjeron paradas de emergencia porque a ratos, por alguna razón, los motores recibían muy poca corriente. Los colegas mexicanos tuvieron que esperar y volver a reiniciar todo. Se habían perdido sus datos, pero aún nos quedaba toda la noche por delante.

En nuestra sala de control nos estábamos acercando ya al momento clave. En el programa constaba la primera observación de M87; eran las tres menos cuarto de la madrugada. Ahora teníamos que pillar con el telescopio la radiación que procedía exactamente del centro de esa enorme galaxia que está a una distancia de cincuenta y cinco millones de años luz, allí donde despliega

su fuerza un gigantesco agujero negro activo, del que todavía no sabíamos con exactitud qué tamaño tenía realmente.

«Fuente M87», introdujimos en el ordenador. La pantalla mostró las coordenadas de ascensión recta 12h 30m 49,4s y de declinación +12° 23' 28". El telescopio giró despacio en dirección a la constelación de Virgo, la segunda más grande del cielo. Fascinados seguimos el giro por el monitor. El ángulo horizontal (o azimut) del telescopio se colocó en la posición correcta y ahora encajaba perfectamente también la elevación que indicaba el ángulo vertical. Como ocurre siempre después de cada movimiento mayor, tuvimos que proceder al reajuste. «Pico Veleta fijado en M87 y grabando, apuntando cerca de 3C 273», anunció Krichbaum. Las gráficas en la sala de control mostraban una señal de nivel plausible, los discos duros estaban a pleno rendimiento y se iban llenando. Una señal tranquilizadora. En nuestros instrumentos vimos cómo el telescopio perseguía el centro de M87 y compensaba la rotación de la Tierra. Durante horas nos movimos alternativamente entre M87 y un cuásar de calibración para escaneos de varios minutos. Todo funcionaba ya por sí solo.

En algún momento entramos todos en trance. Es un estado extraño. En realidad nos vencía el cansancio, pero al mismo tiempo queríamos seguir los movimientos del telescopio, por minúsculos que fuesen. El plan era que yo relevaría a Thomas en las primeras horas de la madrugada, para que él pudiera echar un sueñecito por fin. Eso era, en todo caso, lo que habíamos acordado, pero a él le estaba resultando muy difícil separarse de su puesto. Thomas solía permanecer en su puesto de observación noches enteras; para situaciones de este tipo debe de tener almacenado en su cuerpo una reserva secreta de energía.

Estaba amaneciendo. A las 6.50 horas se despertaron también los telescopios en Hawái y durante un breve periodo observamos M87 juntos. Nos separaban diez mil novecientos siete kilómetros, ¡la distancia más larga en nuestra red para esa fuente! Estábamos a punto de superar las pruebas más duras, ¿saldría bien todo? Un cuarto de hora después se hallaba en nuestras grabadoras el último de los treinta y cuatro escaneos totales, y las lucecitas dejaron de parpadear. Krichbaum envió un último mensaje al grupo de chat: «Realizados todos los escaneos de VLBI. Ahora estamos un poquito cansados y haremos un receso después de treinta y ocho horas de observación». El pobre se había pasado la noche anterior en vela. Mientras íbamos cayendo rendidos en nuestras camas, Sara Issaoun, en Arizona, y sus colegas, en Hawái, siguieron trabajando unas horas más. De los telescopios centrales, el

de Arizona fue el que tuvo el turno más largo, y exactamente igual que nos sucedió a nosotros, Sara Issaoun no pudo separarse de la pantalla. Se iba a pasar observando diecinueve horas de un tirón, más el tiempo de preparación. Continuó al pie del cañón mientras nosotros nos preparábamos ya para la siguiente noche. Su receso iba a ser muy breve.

#### EL FINAL DE LA CUENTA ATRÁS

El primer asalto fue un éxito. ¡Ojalá continuaran así las cosas! En Boston se alegraba también Shep Doeleman por esa muy buena primera fase de observación y nos dio las buenas noches, a pesar de que la mayoría de nosotros solo dormimos algunas horas durante el día.

Mientras los demás se iban a la cama, a mí me esperaban tareas nuevas. Poco antes de nuestra expedición había aparecido en la BBC un artículo sobre nuestras mediciones; en él se decía que los astrónomos iban a realizar la primera fotografía de un agujero negro. ¿De dónde habían sacado esa información? Nosotros no habíamos emitido ningún comunicado de prensa, porque no sabíamos si íbamos a obtener buenos resultados. ¿Qué ocurriría si solo lográbamos de nuevo una mancha borrosa? ¿No estábamos creando demasiadas expectativas? ¿Y si nos tocaba medir todavía algunos años más? Yo no rehúyo a los medios de comunicación, pero esa noticia era en aquel momento una distracción que estaba de más.

No obstante, aquel artículo había bastado para desencadenar una avalancha mediática en toda regla. Mi teléfono sonaba a todas horas, porque los periodistas de todo el mundo deseaban saber cómo nos iban las cosas en España, en el pico Veleta. Concedí entrevistas en directo a través de Skype para Sky News y Al Jazeera, y hablé para la radio neerlandesa. También echaban humo las redes sociales, con una intensidad tal que los radioastrónomos más veteranos estaban comenzando a refunfuñar justo en esos mismos canales. Traté de atenuar las expectativas, y dije que podríamos darnos por satisfechos si llegábamos a ver algo similar a un cacahuete feo.

Así que no había a la vista suficiente sueño reparador, lo cual repercutía en mis capacidades lingüísticas. Algunos neerlandeses se quejaron de mi gramática en Twitter. Solo se moderaron un poco y fueron más indulgentes cuando oyeron que en realidad soy alemán. Para mí fue casi un cumplido.

Al atardecer se aproximaba la siguiente decisión con respecto a la meteorología. Las condiciones para la observación eran excelentes en todas partes. Tras una breve teleconferencia, llegó como se esperaba la señal de arranque para el segundo asalto: «Inicio de modo VLBI», volvió a anunciarse. Estaban programados casi un centenar de escaneos, así que la plataforma colaborativa tenía por delante un turno aún más arduo que el anterior. Iniciamos todo dos horas más tarde que en la víspera, a medianoche. Durante algunas horas nos íbamos a ir moviendo cada pocos minutos alternativamente entre 3C 273 y M87. El tiempo meteorológico se mantenía bueno, por suerte. Terminamos el último escaneo de la sesión a las 7.30 horas. En ese momento, el centro de la galaxia M87 estaba tan solo en un ángulo de unos diez grados por encima del horizonte. También se extinguía la intensidad de la radiofuente más potente.

Las observaciones son entretenidas. El canal de chat estaba que ardía, pues cuanto más larga es la noche, más se hace el tonto. Está claro que los colegas estaban de buen humor. Daniel Michalik envió desde el Polo Sur una foto en la que salían él y su colega de pie con sus gruesas chaquetas forradas y sus gafas de esquadores frente al imponente plato del telescopio que tenían allí<sup>[146]</sup>. Por detrás se abre hasta el horizonte toda la amplitud del paisaje llano: centenares de kilómetros de hielo y nieve se extienden en la nada. El blanco del paisaje se transforma sin transición en el azul del cielo. Esa imagen posee una estética singular y habría merecido un lugar especial en cualquier museo de la técnica. Ahora tengo una impresión de las increíbles condiciones en las que trabajan los dos allí abajo. «Las temperaturas alcanzan unos inimaginables sesenta y dos grados bajo cero», escribió Michalik.

Las fotos son fantásticas. Siempre quiero ver más. Sin perder un instante convoqué un concurso de belleza del EHT. Les dije a los colegas que en un grupo privado enviaran sus comentarios sobre las impresiones que les causaban los telescopios. De esta manera nos haríamos una mejor idea de los lugares de trabajo de los demás, y en algunos casos también de los colegas mismos. Había personas del proyecto EHT que no se habían visto nunca en persona antes de la expedición de medición. Esa competición por las fotos más bonitas acercaría un poco más a todos los miembros del equipo.

Al día siguiente no estaba claro que pudiésemos medir. El tiempo meteorológico era regular en algunos telescopios, y por este motivo se aplazó la decisión por el momento. Los operadores en España estaban nerviosos. Si no se tomaba pronto una decisión, otro grupo trabajaría con el telescopio y perderíamos esa noche. El grupo se decidió en el último minuto por un

«iniciamos». Por un lado, el hecho de que pudiésemos trabajar por tercera noche consecutiva en todas las ubicaciones era una gran suerte; sin embargo, los turnos nocturnos largos iban en detrimento de nuestra materia gris. Doeleman escribió en tono de reconocimiento que tenía muy claro la enorme carga que representaba aquello para todo el equipo, pero que debíamos aprovechar los días que teníamos. Para dormir ya habría tiempo después.

Esta vez no nos tocaba a nosotros hasta las seis de la mañana, hora local. En el programa estaba, por fin, el centro galáctico. Estaba especialmente nervioso, pero todo salió a la perfección. Al día siguiente se acabó la racha del buen tiempo. En México llovía. En la montaña donde se ubicaba el telescopio se había pronosticado nieve. Y también en Arizona era inestable; y además allí soplan ráfagas fuertes de viento. Tal vez fuese demasiado para un telescopio grande. Por ese motivo nos tomamos un receso de dos días. En otros tiempos tal vez habríamos seguido con las observaciones, pero entonces nadie se entristeció con ese aviso; todos los miembros de los equipos estaban agotados.

Aproveché el tiempo para desarrollar un pequeño programa de ordenador con el que podríamos preparar e iniciar las mediciones futuras de una manera automática. Para mí, programar es como meditar, una distracción con un maravilloso efecto tranquilizante.

La noche siguiente volvió a haber un «Inicio de modo VLBI». Las condiciones climáticas se habían moderado en las ubicaciones más críticas. En el pico Veleta la noche estaba divina; el aire allí no podía ser más seco. En cambio, en el Polo Sur se había producido una avería en el telescopio. Los colegas de allí tuvieron que saltarse algunos escaneos, pero luego volvió a funcionar la instalación. Una noche más y lo tendríamos todo en el saco. Esa noche transcurrió también como las anteriores, con escasas incidencias. Hacia las ocho de la mañana, Pablo Torne anunció desde el Pico: «Estamos listos. Aparte de dos escaneos perdidos, todo ha funcionado muy bien aquí». ¡Lo habíamos logrado! Remo Tilanus, nuestro gestor del proyecto, pidió la palabra desde Hawái: dio las gracias por el trabajo cumplido y nos deseó un buen regreso a casa. «O mucha diversión esquiando en la montaña», y es que conocía muy bien el telescopio de Granada.

Nos recostamos. Había algo de solemnidad festiva en la atmósfera de la sala de control. La falta de sueño había dejado sus huellas, pero a pesar de todo se percibía ese instante como un triunfo, al menos de manera provisional, pues no sabríamos sino después de algunos meses si se podrían

aprovechar aquellos datos. De todos modos, nosotros habíamos hecho nuestro trabajo.

Con el final del último turno la tensión fue disminuyendo poco a poco también en los demás equipos. Era el momento de celebrarlo; el primer brindis nos llegó desde el Polo Sur. Para el final de la campaña de mediciones tenían preparada una botella de whisky escocés. ¿Cómo había llegado hasta allí? También en México el ambiente en el LMT era a todas luces excelente. Gopal Narayanan posteó que su último escaneo estuvo acompañado musicalmente por la «Bohemian Rhapsody» de Queen. La siguiente canción en la lista de reproducción fue «The Final Countdown». Incluso en Boston estaban de buen humor. Allí estaba sonando «Over the Rainbow» de Israel Kamakawiwo'ole. Sin embargo, la palma se la llevaron mis estudiantes en Arizona. Sara Issaoun informó: «Estamos oyendo una canción de Muse. Se llama “Supermassive Black Hole”». Me quedé perplejo. Sabía lo que es un agujero negro supermasivo, pero ¿quién caramba era «Muse»?

#### EL VIAJE DE VUELTA A CASA

Para los científicos, las expediciones se cuentan entre las experiencias más excitantes de su carrera profesional. De todas formas, dado que los astrónomos solemos viajar mucho, siempre me alegro cuando el trabajo ha quedado hecho y puedo regresar lo más rápidamente posible a casa con mi familia. Mi esposa dice siempre que primero tiene que regresarme a la Tierra. Eso ocurrió también entonces, después de la medición en España. Las noches pasadas en vela tuvieron un elevado coste energético para todos los equipos de medición del EHT. Ahora necesitaba un poco de sueño, y seguro que a los colegas y a las colegas de los otros telescopios les sucedía otro tanto. Mientras que la bandada de investigadores del EHT iba regresando a la civilización desde los rincones más apartados de la Tierra, los discos duros de las grabadoras emprendieron también su viaje. Unos mil más o menos fueron enviados a través de una empresa de mensajería en grandes cajas de madera.

«Que no se tuerzan ahora las cosas, por favor», pensé. No sería la primera vez que se pierden datos VLBI durante el transporte. En esos discos estaba almacenado el tesoro del EHT. No había copia de seguridad porque las cantidades de datos eran demasiado grandes. Estábamos obligados a trabajar

sin red, ni doble fondo como protección. La pérdida de los datos habría sido una catástrofe inimaginable para nosotros y nuestro proyecto. La campaña habría sido en vano, y quién sabe si tendríamos tan buen tiempo en todas partes la próxima vez.

Poco a poco fueron llegando las cajas con los discos duros al Observatorio Haystack. Una parte de los datos se envió desde allí a Bonn, al Instituto Max Planck de Radioastronomía. La espera más larga fue para los discos duros del Polo Sur. No pudieron salir en avión desde allí hasta al cabo de medio año, después del invierno antártico, a través de la base McMurdo. Los observadores del Polo Sur también tendrían que permanecer allí ese tiempo; su noche estaba todavía lejos de terminar.

En los cinco días de observación, cada uno de los ocho telescopios almacenó aproximadamente cuatrocientos cincuenta terabytes de datos. Así pues, teníamos que analizar en total unos tres petabytes y medio (¡un petabyte es una cifra con quince ceros!). El primer paso sería correlacionar los datos de los diferentes telescopios, es decir, superponerlos y combinarlos en su momento exacto. Los equipos de Massachusetts y Bonn compartirían respectivamente ese trabajo, pero también controlarían una parte de los datos del otro equipo. Ambas instituciones contaban con décadas de experiencia, pero aun así lo mejor era andar sobre seguro.

El proceso de correlación consiste en entresacar y superponer las radiaciones almacenadas en el ruido de fondo de los datos. El EHT es un interferómetro, y la información se halla siempre en la combinación de las ondas de dos telescopios; uno solo no tiene ningún valor aquí. Podemos imaginarnos así la interferencia: arrojamos dos piedras a un estanque y generamos de esta manera dos anillos de ondas circulares. Si las ondas se superponen, se anulan mutuamente en determinados puntos o se refuerzan en otros y generan un patrón característico. Los radioastrónomos denominan en su jerga a este patrón de refuerzo «franjas», un *fringe pattern* es simplemente un patrón de rayas. A partir de la dirección y de la intensidad de las rayas podemos leer con mucha precisión la dirección relativa de la zona de impacto y el tamaño de las dos piedras. No obstante, los radioastrónomos no realizan sus mediciones en un estanque tranquilo, sino en un mar tormentoso. Primero tienen que superponer muchísimas crestas y valles de ondas hasta que se pueda ver siquiera algo, y para tal fin las diferentes ondas tienen que estar perfectamente sincronizadas, de lo contrario se dispersan.

Para conseguirlo hay que desplazar las ondas de radio unas contra otras, de modo que oscilen casi al mismo compás. De ahí que los expertos de los



centros de correlación se asemejen a los pinchadiscos que acompañan dos canciones diferentes ajustando la velocidad de dos tocadiscos. El ritmo se solapa con perfecta sincronía, de modo que las canciones suenan como una única pista. Solo que los radioastrónomos no trabajan con dos discos, sino con las complicadas grabadoras Mark 6 de los telescopios. Los dos radiotelescopios no operan en el modo VLBI hasta que están exactamente en el mismo compás.

Para nosotros significa esperar; un pinchadiscos, en cambio, sabe enseguida si sus dos tocadiscos trabajan de forma sincronizada. Si comete un error y el ritmo de una de las dos piezas musicales se retrasa un poco, se dará cuenta a más tardar cuando el público se tape los oídos y se vaya de la pista de baile a toda prisa a causa del ritmo desacompañado. Sin embargo, durante nuestras mediciones apenas podemos examinar si todo marcha de forma sincronizada. Mientras observamos nos sentimos como los antiguos grandes exploradores en alta mar que sin GPS ni puntos de orientación se ponían al timón de sus naves con la esperanza de alcanzar su gran objetivo atravesando las infinitas extensiones de los mares y los océanos. No sabemos hasta el final si todos los esfuerzos han valido la pena y si hemos llegado ciertamente a nuestro destino, pues no siempre encontramos las «fronteras», es decir, los patrones de superposición. Hasta entonces nos toca esperar y mordernos las uñas por los nervios.

Para la búsqueda del ritmo acompañado de los telescopios hay que conocer su posición relativa respecto al cielo, así como el tiempo relativo de llegada de las ondas de radio del espacio. Para calcular esto, los expertos en VLBI emplean un modelo del movimiento de la Tierra que tiene en cuenta su rotación, el desequilibrio rotatorio, los movimientos de los océanos y los de las capas de aire. En el ruido de fondo de las ondas de radio de dos telescopios, una supercomputadora, que conecta miles de ordenadores en una red, busca las oscilaciones comunes desplazando las ondas unas contra otras y localizando las mejores correlaciones.

Encontrar los valores correctos es una tarea laboriosa, y el potencial de error es elevado. Si se yerra tan solo un milisegundo, hay que seguir examinando millones de alternativas, y una correlación completa de los datos suele llevar más tiempo que las observaciones mismas. Esta es la razón por la que comenzamos probando con un conjunto breve de datos de dos telescopios para un cuásar muy brillante.

El 26 de abril de 2017 llegó un mensaje desde las profundidades del correlador interferométrico. Mike Titus, experto en correlación del MIT,

informó con satisfacción sobre las primeras franjas entre el JCMT en Hawái y el LMT en México para el cuásar OJ 278. Se nos quitó un peso de encima. Fue como escuchar el grito de «¡tierra a la vista!», y ahora proseguiríamos sin interrupción. Al día siguiente, Titus informó sobre patrones de interferencia aún más intensos entre el JCMT, el LMT y el SMA en la radiofuente 3C 279. Casi cada día llegaba otro aviso de éxito, todos ellos iban cubriendo poco a poco la red entera. El 5 de mayo comuniqué al director del IRAM que el EHT había encontrado franjas casi entre todos los telescopios<sup>[147]</sup>. Fue increíble, realmente había funcionado todo. Si bien no teníamos ni idea de lo que nos mostrarían los datos, eran los mejores que jamás se habían reunido en un experimento de ese tipo. Estábamos pisando un territorio desconocido del cosmos. Sin embargo, todavía tardaríamos tres cuartos de año hasta que todos los datos estuviesen correlacionados, incluidos los del Polo Sur. Antes de que tuviéramos siquiera una idea de cuáles serían los resultados, comenzamos nuestra segunda campaña de observación.

En el mes de abril de 2018 no tuvimos la suerte de nuestra parte. Dejamos escapar los tres primeros días porque no estuvo listo a tiempo el receptor nuevo para un telescopio, y luego la meteorología no colaboró. En el pico Veleta ya no podía ver la punta del telescopio, había desaparecido entre la niebla. Los platos de antena del telescopio chileno ALMA se congelaron de repente, e incluso en Arizona y Hawái el tiempo meteorológico andaba más bien regular. Menos mal que había algo positivo: participaba por primera vez el nuevo Telescopio Groenlandia (GLT), de nuestros colegas de Taipéi.

Entonces nos llegó una noticia que nos dejó conmocionados. Se decía que un grupo armado había asaltado al equipo de México, en el que se encontraba Michael Janßen, mi estudiante de doctorado. Con total desesperación traté de establecer contacto con él; me sentía culpable. ¿A qué situaciones exponemos a nuestros jóvenes colaboradores? Hasta entonces no se había producido ningún incidente allí, pero el responsable del proyecto y de mis colaboradores soy yo. Por fin di con Michael al teléfono. «Una pickup oscura nos obstaculizó el camino cuando nos dirigíamos al telescopio —me comunicó agitado—. Nos rodearon seis hombres enmascarados y con rifles de asalto. Levantamos los brazos. Uno hablaba un poco de inglés. Cuando me di cuenta de que él estaba nervioso, yo me puse aún más nervioso». Michael relató su aventura con una presencia de ánimo asombrosa, pero percibí la intensidad de su agitación interior. «Intenté explicarles que éramos astrónomos. Entonces se produjo unos instantes de gran agitación. Dijeron que estaban allí para protegernos, y se marcharon. Katie Bouman y Lindy Blackburn ya estaban

arriba, por suerte no les había ocurrido nada, y yo estoy a salvo», concluyó. «Vente para aquí —le dije—, tan pronto como sea seguro». Shep Doeleman y yo tuvimos una agitada conversación telefónica, y después hablé con el director del observatorio<sup>[148]</sup>. Decidimos sacar de allí a nuestro equipo y terminar la campaña sin ese importante telescopio.

Nadie sabía si se había tratado de un intento de secuestro frustrado o si detrás de esa acción estaba la policía secreta. Tampoco quisimos saberlo en detalle, pues por aquel tiempo se habían producido tensiones entre el crimen organizado del estado de Puebla y el Gobierno de México. En aquella carretera llena de curvas y de mala visibilidad que asciende al volcán extinto de Sierra Negra se produjeron continuos asaltos posteriormente. Por este motivo, los operadores del Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica de México asumieron las consecuencias en febrero de 2019 y cerraron por algún tiempo el LMT y el vecino Observatorio de Rayos Gamma<sup>[149]</sup>.

Por ello y debido a otras dificultades técnicas en otros telescopios, hubimos de cancelar nuestra campaña de observaciones en 2019. En el mes de abril de 2020 íbamos a intentarlo de nuevo, y planeé dirigirme al nuevo telescopio IRAM, el NOEMA, en el pico de Bure, en los Alpes franceses. Entonces, el coronavirus impidió nuestra campaña de medición. Dos semanas antes del estado de emergencia y del confinamiento cerraron todos los telescopios y nos quedamos de nuevo sin mediciones. Puede que el año 2017 fuese nuestro *annus mirabilis*. Los datos de 2017 nos mostrarían si habíamos aprovechado aquella oportunidad única.

## 5

# La primera imagen

### CÓMO EL RUIDO DE FONDO SE CONVIERTE EN UNA IMAGEN

Una imagen del espacio no cae simplemente del cielo, sino todo lo contrario. Cualquier astrónomo sabe cuánta paciencia y cuánto esfuerzo son necesarios para una imagen cósmica, sobre todo cuando las ondas de luz están grabadas en discos duros. En principio, después de la grabación de los datos tenemos que reconstruir un telescopio en el ordenador e imitar lo que haría el plato de antena o el espejo de un telescopio gigante con ondas auténticas.

La operación matemática que lleva a cabo un espejo al focalizar la luz del espacio se denomina «transformada de Fourier». Esta transformación lleva el nombre del matemático francés Jean Baptiste Joseph Fourier, que la introdujo en 1822, y en la actualidad se aplica en todos los ámbitos imaginables de nuestra vida cotidiana. Quien almacena en el ordenador imágenes JPEG comprimidas o archivos MP3 de música, está empleando propiedades de esta transformada de Fourier. También nuestro sistema auditivo convierte las vibraciones en sonidos: nuestro oído y el espejo ustorio son genios matemáticos, porque dominan automáticamente esta compleja operación hasta en el sueño; lo cual habrá experimentado cualquiera que se haya despertado sobresaltado por la alarma de un despertador digital a una hora incorrecta. En el ordenador, primero tenemos que programar esas transformaciones con arduo esfuerzo, es decir, le enseñamos cómo hacerlo paso a paso.

Una de las peculiaridades de la transformada de Fourier es la capacidad de omitir informaciones sin perder con ello la impresión general de la imagen o de la música. Los procedimientos electrónicos de compresión explotan esta ventaja a diario: cuando se realiza la transformada de Fourier de una imagen o

de una pieza musical, se eliminan aquellas partes de los datos que no son importantes, se graban los datos restantes y se puede transformar de nuevo la imagen o el archivo de sonido a partir de ellos. Las diferencias son apenas perceptibles para el ojo o para el oído, pero la cantidad de datos es considerablemente menor, razón por la cual pueden almacenarse más imágenes en una tarjeta de memoria, por ejemplo.

Lo mismo sucede cuando miramos el cielo estrellado con un telescopio reflector cuya lente se ha rayado o con una cámara con motas de polvo en la lente. Perdemos información, y el espejo solo puede llevar a cabo la transformada de Fourier de una manera incompleta. A pesar de todo, no obtenemos ninguna imagen agujereada o perforada en la que faltan estrellas, sino solo una en la que estas se ven algo borrosas. Las alteraciones causadas por la falta de información se distribuyen imperceptiblemente por toda la imagen. Cada error en el espejo influye en todas las estrellas de la imagen por igual. Sin embargo, con un algoritmo de ordenador, esos errores pueden eliminarse en su mayor parte y mejorarse así la imagen.

Por este motivo, un radiointerferómetro global, que en lugar de un gran espejo reflectante está compuesto por muchos pequeños telescopios interconectados, no tiene por qué estar completamente lleno. Funciona incluso si no hay telescopios en todos los lugares del mundo. Esto se correspondería con un espejo rayado y muchos agujeros; en realidad, con un espejo con más arañazos y agujeros que espejo. A pesar de todo, con un poco de habilidad y valiosos conocimientos matemáticos puede reconstruirse una imagen exacta. Eso ahorra muchas antenas y aún más dinero. Además, sería una barbaridad pretender cubrir toda la superficie terrestre con radiotelescopios.

La transformada de Fourier de una imagen puede compararse muy bien con una sinfonía. La imagen que vemos se corresponde con la música que oímos. La operación es, entonces, la partitura de la sinfonía, y un radiointerferómetro se corresponde con un aparato de medición que graba la música y la descompone de nuevo en las notas de la partitura.

En nuestra red VLBI cada combinación de dos telescopios mide en todo momento exactamente una nota de la imagen, que el correlador interferométrico calcula. Las distancias entre los telescopios son las líneas de base; podemos imaginárnoslas como las cuerdas de diferentes longitudes de un arpa, responsables de las distintas notas. Solo que aquí es también al revés: las cuerdas no generan notas, sino que andan a su acecho, y cuanto más largas son, más aguda es la nota de la imagen que reciben. Aplicado esto a una sinfonía, las líneas de base cortas oirían principalmente el timbal y el

contrabajo de una orquesta, y las líneas de base largas tan solo el flautín y el triángulo.

En el caso de la transformada de Fourier para la imagen de una cabeza, por ejemplo, las notas graves de la imagen abarcarían únicamente la forma de la cabeza, pero no los detalles de la cara. En cambio, las notas agudas de la imagen harían visibles los contornos pronunciados de la boca y de la nariz, pero no la cabeza. Lo importante aquí es cuánto tiempo aparece la cuerda virtual entre los telescopios desde la perspectiva de la radiofuente. Si miramos oblicuamente la cuerda, parecerá más corta que si la miráramos desde arriba. Debido a la rotación de la Tierra, la longitud proyectada de la cuerda cambia, y el telescopio se va «sintonizando» en el transcurso de las muchas horas de observación durante una noche.

Ahora bien, para obtener una buena imagen a partir de una red VLBI primero hay que ajustar con precisión la sensibilidad de medición de los telescopios individuales, y corregir los retardos relativos de todos ellos entre sí. Esto se correspondería con la puesta a punto y el pulido regular de un espejo que se compone de muchos segmentos, o con la afinación perfecta de un piano. Nuestro equipo de calibración asumió esta tarea en la primavera de 2018<sup>[150]</sup>. Se ocupó de la mezcla correcta, ajustó el volumen de una gran pieza musical con muchos instrumentos y realizó la prueba de sonido antes de que comenzara nuestro concierto. Solo entonces la cacofonía de los datos se convirtió en una armoniosa sinfonía: la imagen del agujero negro.

A mediados de mayo de 2018 salía de mi despacho como de costumbre, cuando Sara Issaoun se me acercó y me dijo con una calma notable: «¿Has visto ya nuestra primera gráfica de calibración de Sgr A\* y M87? Puede que te interese». Sara siempre está de buen humor, pero esta vez le brillaban los ojos con picardía. Me picó la curiosidad y miré a la pantalla de su ordenador. Volví a mirar otra vez y pregunté perplejo: «¿Creéis lo que estáis viendo ahí?». A lo que respondió ella: «Bueno, son los primeros datos, todavía tenemos que examinarlos con más precisión...».

Lo que presentó el equipo de calibración era una curva de puntos difuminados. Era la «escala musical» de M87 y mostraba el volumen de todas las notas medidas de la imagen de un objeto, ordenadas por frecuencias. El volumen disminuía constantemente en la dirección de las notas más agudas de la imagen y en cierto momento se ponía a cero. Si la imagen del agujero negro fuera un retrato, conoceríamos ahora el tamaño exacto de la cabeza. Cuantas menos notas agudas, más grande es la cabeza. Pero entonces la curva volvía a ascender de repente. Habíamos medido también muchas notas

agudas. La cabeza tenía también una cara, ¡y podíamos verla! Las notas más agudas y decisivas nos llegaron nada menos que en los últimos minutos, cuando observábamos conjuntamente en España y Hawái. ¡Sin duda asombroso!

Di un resoplido, entre aliviado y nervioso. «¡Demasiado bonito para ser verdad!». Todos conocíamos la forma de esa curva por los libros de texto de radioastronomía<sup>[151]</sup>. «No voy a echar las campanas al vuelo, pero esto se corresponde con bastante exactitud a la transformada de Fourier de un anillo. Si esto es así, entonces M87 es realmente tan grande como afirman algunos, y podríamos ver la sombra», dije casi con veneración. «Sí, entre seis y siete mil millones de masas solares», añadió Sara con una sonrisa.

«Bueno, eso tendremos que verlo primero», repliqué aparentando calma e intentando poner cara de póquer. No obstante, me pasé todo ese día recorriendo mi despacho como una pantera encerrada. Me sentía como si hubiera anunciado su visita un invitado muy especial a quien había estado esperando durante décadas. Pronto podríamos ver por primera vez a esa visita. Un cántico de gratitud llenó el despacho, por lo general tan sobrio.

## LA GRAN SORPRESA

El hecho de que no midamos todas las notas de la imagen con VLBI significa que, en teoría, hay muchas imágenes que serían compatibles con nuestros resultados de las mediciones. Quien no tiene todas las notas de una sinfonía, en principio puede silbar muchísimas melodías, si bien la mayoría de ellas podrían sonar muy estrambóticas.

Me preocupaba cómo podíamos asegurarnos de que no nos estábamos engañando a nosotros mismos. Teníamos que ser nuestros críticos más severos. Por fortuna, todo el equipo parecía ser perfectamente consciente de ese peligro, y efectuamos cada paso individual en el análisis con al menos dos métodos independientes.

El equipo de calibración trabajaba con increíble dedicación en el tratamiento de los datos. Lindy Blackburn, un experto de Harvard en este tipo de tareas, escribió una segmentación electrónica de los datos; y Michael Janßen escribió una segunda con todo el equipo y la llamó rPICARD<sup>[152]</sup>. Tan solo había que decir «¡Hágalo!», como mi capitán favorito de *Star Trek*, y el

procesamiento de los datos transcurría de una forma absolutamente automática. Ambas segmentaciones suministraron resultados compatibles, esto significaba que el instrumento ya estaba afinado y podíamos dar paso libre a los datos y fabricar imágenes a partir de ellos. Un «equipo imaginero», nutrido y muy activo dentro de la plataforma colaborativa se ocupaba de eso<sup>[153]</sup>.

Aún quedaba un largo camino hasta conseguir una imagen científicamente impecable. En los muchos pasos del equipo imaginero del EHT participaban docenas de colegas de todo el mundo. Existían algunas posibilidades de generar una imagen, y aquí entraba en acción Katie Bouman. Es experta en el procesamiento electrónico de imágenes y ya estaba entusiasmada con este asunto desde la secundaria. Después de su carrera universitaria, trabajó primero en el MIT y luego se mudó a Harvard. Conocía las ambigüedades del procesamiento de imágenes y cómo sortear con seguridad los mayores escollos. Organizaba concursos con regularidad para poner a prueba los algoritmos y a los expertos en VLBI. Para tal fin, los especialistas recibían datos simulados por ella. Algunos tenían el aspecto que todo el mundo se imagina de un agujero negro; otros mostraban un jet; y otros se asemejaban a un muñeco de nieve con sombrero, bufanda y una zanahoria por nariz. Los equipos no sabían lo que se escondía detrás de los datos y tenían que entregar sus imágenes reconstruidas; en realidad se trataba de un pequeño concurso de belleza. El trabajo de los colegas era evaluado incluso por un jurado, del que formé parte una vez. De este modo, nos sometíamos una y otra vez a una especie de comprobación cruzada sobre la evaluación pura de los datos, y el equipo seleccionaba algunos algoritmos establecidos que seguía desarrollando después.

Hasta entonces el equipo imaginero había trabajado únicamente con datos simulados de imágenes y con los de nuestros calibradores. Sin embargo, ahora la cosa iba en serio, pues se había dado paso libre a las notas medidas de la imagen de M87 y Sgr A\*. La tensión era enorme, ¿qué aspecto tendrían nuestros agujeros negros? Nos sentíamos como los niños y las niñas momentos antes de descubrir los regalos de Navidad. Bajo el árbol había algunos regalos que abultaban mucho, y ahora se nos permitía quitarles el envoltorio. Eso sí, un regalo de este tipo solo se abre una vez. Habría una única primera vez. En ciencia, quitarle el envoltorio a los datos es también un experimento y puede influir en su análisis, dado que lo realizan seres humanos.



De ahí que el grupo se divida a su vez en cuatro subgrupos a la hora de desenvolver el regalo de forma independiente unos de otros<sup>[154]</sup>. Yo estaba con mis doctorandos, Sara, Michael y Freek en el segundo grupo, que abarcaba tres continentes y estaba dirigido por nuestro colega japonés Kazunori Akiyama.

Para que cada equipo alcance realmente un resultado independiente, se impide cualquier comunicación entre ellos. Y, como es natural, nadie tiene autorización para mostrar a otras personas fuera del EHT las imágenes que vayan surgiendo en su grupo. Hay que estar completamente seguros de que no va a filtrarse nada al exterior. No obstante, tengo que confesar que a pesar de todo le mostré las imágenes a mi esposa.

El trabajo de los grupos imagineros estaba temporizado con toda precisión. Durante la noche del 6 de junio de 2018 se pusieron en libre circulación los datos de las mediciones de M87 y Sgr A\* para los cuatro equipos. Todos estábamos emocionados. Los doctorandos comenzaron de inmediato a evaluar los datos; cada cual trabajaba primero en su propia imagen. En ese momento me encontraba de nuevo en un congreso de la AAS en Estados Unidos, donde di una conferencia sobre nuestra radioantena lunar. Traté de que no se me notase nada y mantuve contacto electrónico en secreto con Freek y los demás. Esa noche se originaron alrededor del mundo las primeras imágenes del agujero negro. Nadie sabía cuál sería el primer grupo en lograrlo, y tampoco importaba. Mientras se ponía en marcha toda la maquinaria, yo estaba en un avión de regreso a Alemania. Mi tensión durante la vuelta desde Denver era casi insoportable. En el programa de entretenimiento a bordo del avión vi una charla TEDx de Katie Bouman. «Cuando aterricemos, será ya una ponencia anticuada», pensé, con una sonrisa. Cuando mi avión se encontraba por fin en la pista de rodaje del aeropuerto de Frankfurt, saqué mi teléfono del bolsillo para ver las imágenes de mi grupo. La visita tan esperada durante tanto tiempo iba a llegar ese mismo día.

Mi estado de ánimo se parecía al del momento cursi de una novela romántica del siglo XIX. La imagen del agujero negro era como una amada lejana a la que había estado esperando durante décadas y que hasta entonces solo había estado cerca de mí a través de nuestro intenso intercambio epistolar. En mi mente tenía una idea exacta de su aspecto a pesar de no haberla visto jamás. Ella era la visita especial e iba a estar allí por primera vez. Ver la primera imagen era como el instante en que el carruaje se detiene por fin delante de la casa: se abrirían las portezuelas y podría mirarla a la cara

por primera vez, como tanto anhelaba. En esa alegría anticipada se entremezclaban también mis temores y mi angustia. ¿Me habría engañado mi imaginación? ¿Estaba todo tan solo en mi mente? ¿Era la realidad mucho más tosca y fea? ¿Y qué sucedería si verla no me conmovía en absoluto? El carruaje se detuvo a poca distancia, la portezuela se abrió.

Temblando un poco abrí el archivo que me había enviado Freek. Estaba en un formato especial de datos para la astronomía<sup>[155]</sup>. Entretanto yo estaba sentado ya en el tren, y tenía ante mí el ordenador portátil. Miré con disimulo a mi alrededor; los demás viajeros no me prestaban ninguna atención. Entonces se abrió por fin la ventana, en ella podía verse algo grisáceo, algo borroso. Amplié la imagen, ajusté el contraste, elegí mi gama cromática favorita, la del fuego, y entonces lo vi: ¡no era ningún anillo cerrado! ¿Una herradura? No, se trataba más bien de las tres cuartas partes de un anillo. ¡Qué maravilla!

No podía apartar la vista, no me cansaba de mirarlo. Era una novedad fascinante, pero de alguna manera también muy familiar, como si lo conociera desde hacía mucho tiempo. Durante una hora me sentí flotar, hasta que se reinstaló el escepticismo en mí. ¡Aquello había sido solo una visión fugaz! ¿Qué aspecto tendría mañana? Si se confirmaba esa primera impresión, entonces en algún momento habría que emprender la esforzada senda para fundar una relación. ¿Aguantaría ese tiempo? Hasta la boda quedaba todavía mucho camino por recorrer.

Poco después llegó un correo electrónico de Kazunori Akiyama. Estaba convocando una teleconferencia con nuestro equipo para el día siguiente. En ella, todos los miembros del grupo II compararían sus imágenes. Nos propuso que protegiéramos sin falta los datos de las imágenes con una contraseña antes de enviárselas. Y también él estaba terriblemente excitado: «¡Buah! Esta noche no dormiré», escribí. Lo mejor sería viajar directamente a Nimega para hablar con mis estudiantes, pero en aquel momento tenía una charla TEDx en la Universidad de Aquisgrán. Antes del ensayo me esfumé a hurtadillas a un cuarto trastero. Entre enseres de comedor y algunas sillas contemplé los agujeros negros de los demás. ¡Alivio! También en sus imágenes podía reconocerse un anillo. Así que no eran imaginaciones mías. Durante la charla no debía decir ni una palabra al respecto. Ya estaba desfasada cuando la pronuncié, pero la di muy contento igualmente<sup>[156]</sup>.

A finales de junio se llevó a cabo el decisivo taller imaginero en la Universidad de Harvard en Boston<sup>[157]</sup>. En él se reunieron más de cincuenta colegas de toda la plataforma colaborativa para mostrar sus imágenes:

primero los calibradores, luego M87. El encuentro se produjo a mitad de las vacaciones estivales. Necesitaba esa pausa para pasarla con mi esposa en el mar Báltico. Sin embargo, por las noches comprobaba como hechizado mi teléfono móvil buscando resultados. No podía desconectar del todo, todavía no. En efecto, las imágenes de los otros tres grupos mostraban también anillos, lo cual no me sorprendía, sino que me tranquilizaba enormemente. Había presentado por fin a la familia el tan secreto amor de la adolescencia, y había sido aceptado de inmediato.

Acto seguido discutimos en el consejo científico del EHT cómo íbamos a analizar y a publicar nuestra imagen en el futuro. En el transcurso del verano nos dimos cuenta de que era mucho más complicado procesar y evaluar los datos de la observación de Sagitario A\*. Por ese motivo decidimos evaluar por el momento solo los datos de la galaxia M87. «Hagamos primero lo fácil», dijo mi colega y vicepresidente del consejo científico, Geoff Bower.

El monstruo masivo en M87 resultaba muy apropiado para nuestra imagen porque su plasma radiante fluye casi a la velocidad de la luz alrededor del agujero negro; pero, a causa de su enorme tamaño, el gas tarda algunos días o incluso semanas en dar una vuelta entera. Si elaborábamos una imagen con nuestro telescopio global durante aproximadamente ocho horas, el agujero negro en M87 se mantenía tan quieto como un enorme oso en hibernación. En cambio, el centro de Sagitario A\* es mil veces más pequeño que M87 y el gas caliente gira y cambia, por consiguiente, mil veces con más frecuencia en ese mismo tiempo. Se movía inquieto en nuestras imágenes como una criatura de dos años pasada de revoluciones en su fiesta de cumpleaños. Cada toma con una exposición larga saldría bastante borrosa, y necesitaríamos realizar más esfuerzos para generar una imagen unívoca y clara a partir de nuestros datos de medición.

Tras el taller en la Universidad de Harvard se disolvieron los grupos imagineros de trabajo a ciegas. Y el equipo entero comenzaba otra vez desde el principio. Ya sabíamos aproximadamente el aspecto que tiene un objeto de radiación en M87; ahora era el momento para que los ordenadores calculasen las mejores imágenes. Seleccionamos tres diferentes algoritmos que competían entre sí<sup>[158]</sup>. Para ello, un equipo desarrolló de nuevo unos datos simulados de VLBI que eran engañosamente similares a los auténticos, pero que estaban basados en imágenes distintas. Algunas eran anillos; otras, discos; algunas eran tan solo dos manchas. De forma automática, los datos pasaban traqueteando por los algoritmos, y el equipo imaginero calculaba miles de imágenes. Al final eligieron exactamente los parámetros que

reproducían todas las imágenes simuladas igual de bien, incluso las que no tenían sombra en el centro. Un algoritmo que solo reconstruyera bien los anillos sería un autoengaño.

Solo entonces el equipo aplicó a nuestros datos auténticos de medición los tres algoritmos con dichos parámetros, y obtuvimos tres imágenes ligeramente distintas, pero unívocas. No me habría esperado nunca unas imágenes tan buenas. Mostraban un anillo de color rojo candente con una mancha oscura en el centro. El color no era ninguna casualidad, sino que estaba inspirado en nuestro viejo artículo sobre la sombra según las predicciones teóricas. Un colega de Arizona adaptó y mejoró un poco la escala cromática<sup>[159]</sup>. Ciertamente, no pueden verse los rayos de radio, pero para el público los agujeros negros adquirirían pronto un color rojo candente. Incluso la NASA representaría posteriormente con rojo su simulación por ordenador de un agujero negro<sup>[160]</sup>. Cuando tiempo después le conté la historia de las ondas de radio coloreadas en rojo a Lothar Kosse, un compositor de canciones cristianas modernas, dijo fascinado: «Veo colores que no conozco». Un comentario muy oportuno, me parece a mí.

Ya podíamos dirigirnos a la opinión pública con esas imágenes. Era como el día de un compromiso matrimonial secreto, a partir de ese momento comenzaban los preparativos para la boda.

Los equipos analistas ya habían empezado a prepararse para el examen de los resultados. Ahora trabajaban al máximo de revoluciones. Los grupos de teoría hacían horas extra sin fin<sup>[161]</sup>. Y en las supercomputadoras producían una gigantesca biblioteca de agujeros negros simulados para poder compararlos con los datos. Hasta entonces los agujeros negros y su entorno inmediato no habían sido simulados jamás con tanto detalle y minuciosidad.

Otro equipo se preparaba para la medición del agujero negro<sup>[162]</sup>. ¿Qué tamaño tenía? ¿Podíamos deducir su masa? ¿Y la orientación?

Lo que surgió allí en poco tiempo fue sensacional. Se han escrito muchas historias breves y largas sobre héroes. Cada cual daba lo mejor de sí mismo; sin embargo, la adrenalina y las muchas noches en vela pasaron factura. Algunas personas llegaron hasta sus límites o los sobrepasaron, se quedaron atrás o sufrieron bajo la presión. La actividad, aparentemente heroica, las veinticuatro horas del día desveló también su lado agresivo, pues desencadenó un remolino peligroso que agotó a héroes y a compañeros de armas por igual. Además de la intensa colaboración global, se descubrió en ocasiones una arcaica conducta tribal y territorial, en la que una horda se enfrentaba a otra porque la idea de unos o su método no era «de aquí». En el grupo de gestión

se deterioraron las relaciones, y la junta directiva y nuestro consejo científico tuvieron que emplearse a fondo para mantener la cohesión de todo el equipo. Algunos echaron gasolina al fuego, otros intentaron apagarlo, pero en el EHT todo el mundo se sentía animado a alcanzar la meta y realizar el mejor trabajo posible.

En calidad de científico del proyecto, Dimitrios Psaltis intentó encauzar esa tormenta creativa en canales organizados, y desarrolló un plan de publicación. ¿Vamos a divulgar rápidamente la imagen con un artículo breve en una de las grandes revistas científicas, tal vez en *Nature*? Eso resultaría inapropiado. La imagen era tan espectacular y tan innovadora que no debíamos aparentar ningún afán de notoriedad. ¡Se habían originado muchísimas cosas, y todas ellas deberían estar documentadas! Después de muchos debates en la plataforma colaborativa, Psaltis presentó un plan para seis artículos especializados, que fue respaldado por el consejo científico. Deseábamos ilustrar con esmero todo el proceso científico que fue necesario para el EHT: la técnica VLBI, la calibración de los datos, el nacimiento de la imagen, las simulaciones y la medición de la imagen; un artículo para cada tema. Otro artículo general resumiría y clasificaría todo. Al final salieron doscientas cuatro páginas, casi un libro entero sobre una sola imagen.

En el mes de noviembre de 2018 se reunió el equipo del EHT en Nimega para una importante colaboración. Ciento veinte científicos se juntaron en la Universidad Radboud<sup>[163]</sup>. En ella se debatirían conjuntamente todos los temas del EHT. Era el primer encuentro desde las observaciones y la entrada en vigor del acuerdo de colaboración en el año 2017. Katharina Königstein, mi asistente por aquel entonces, organizó esa semana con mucho cariño y energía. El encuentro tuvo lugar en el Berchmanianum, un antiguo monasterio jesuita, del que la Universidad Radboud se hizo cargo y reformó recientemente. Bajo la mirada severa de los santos en la antigua capilla, se debatió sobre la orientación estratégica del EHT y sobre nuestros seis artículos.

Frente a las puertas del monasterio esperé el lunes por la mañana los autobuses en los que debían llegar los colegas desde los hoteles de los alrededores. Cuando se abrieron las puertas, vi tantas caras conocidas que me emocioné. Imperaba una atmósfera alegre, relajada. «Te conozco de la televisión», fue una de las frases más repetidas. Muchos colegas se habían visto hasta entonces solo en videoconferencias, y aunque habían pasado juntos virtualmente innumerables horas, no se habían encontrado nunca en persona.

Un año y medio más tarde se produjo la crisis del coronavirus, que puso a muchas personas en cuarentena y transformó por completo la cultura de trabajo de muchas empresas. Pero las videoconferencias de día y de noche eran ya algo totalmente normal para el EHT; aunque nuestra autoimpuesta cuarentena quedó interrumpida durante una intensa semana en el encuentro de colaboración del año 2018. Esa experiencia tuvo una enorme importancia para la dinámica en el EHT. Nos mostró a todos qué factores emocionales y sociales se echan a perder cuando los seres humanos se ponen en contacto únicamente a través de pantallas, cámaras y micrófonos. El encuentro de Nimega fue como una reunión conmemorativa con antiguos compañeros de curso, en la que vuelves a ver a personas que te resultan muy familiares, pero que sin embargo se han convertido un poco en extraños.

Durante los ratos de tiempo libre había tanto movimiento como en una colmena, por todas partes se formaban grupos espontáneos que debatían entre ellos. La meteorología puso de su parte y nos recordó los días perfectos durante las observaciones, y eso que en aquella estación del año en los Países Bajos los días suelen ser grises y estar pasados por agua. Siguiendo una antigua tradición de VLBI, insistí en echar partidito de fútbol; incluso marqué un gol, solo que al día siguiente me costó subir las escaleras. Como culminación, Katharina Königstein organizó una cena de congreso en la gran catedral de San Esteban en Nimega. Al principio me produjo una sensación extraña, pero en los Países Bajos secularizados, una asociación promotora genera importantes ingresos para la conservación de la iglesia, y nosotros experimentamos una emocionante noche juntos. Cuando de repente una cantante de ópera arrancó a cantar desde la tribuna con el acompañamiento de un órgano, aparecieron los teléfonos móviles para las fotos y los pañuelos para las lágrimas.

En las sesiones plenarias, los coordinadores de los artículos expusieron el plan para las diferentes publicaciones. Me pidieron que coordinara el artículo principal general, y pregunté a la plataforma colaborativa: «¿Qué historia sobre nosotros es la que deseamos contar? ¿Qué declaraciones nos atrevemos a hacer?».

«Lo que vemos, en todo caso, es una sombra, tal como se espera de un agujero negro. Nunca podremos demostrar la existencia de los agujeros negros —subrayó Psaltis—. Solo podremos afirmar que nuestros resultados coinciden con las predicciones de la teoría general de la relatividad, pero lo hacen de una manera impresionante. Si miramos las imágenes del grupo de teoría, entonces vemos que muchas de las simulaciones encajan

asombrosamente con nuestra imagen, en especial si simulamos una a una en el ordenador las observaciones artificiales de VLBI de los modelos. Eso es una maldición y una bendición a la vez. La sombra es de veras una señal muy sólida y muy visible de los agujeros negros. Sin embargo, en realidad no podemos decir, por ejemplo, si nuestro agujero negro rota y con qué intensidad lo hace».

De todos modos, mientras podamos penetrar a través de la nebulosa candente de radio, veremos que la mancha negra y su tamaño se correlacionan exactamente con la masa. El anillo es luz que se curva por todos lados alrededor del agujero negro. La parte de abajo es más clara, exactamente como se espera cuando el gas en torno a un agujero negro rota casi a la velocidad de la luz y se mueve hacia nosotros. Según la teoría de la relatividad, ese movimiento tan rápido focaliza y amplifica su rayo de luz en la dirección de avance. Dado que el jet y, por consiguiente, el eje de rotación del plasma apuntan hacia nosotros en la parte superior derecha, y que la parte inferior del gas se mueve en la misma dirección, el anillo debería estar girando en el sentido de las agujas del reloj.

Sin embargo, nuestro resultado principal fue el tamaño del anillo; expresado en la jerga astronómica, el diámetro era de cuarenta y dos microarcoregundos. ¿Quién se habría imaginado que, después de todos esos años de trabajo y del procesamiento de billones de datos en las supercomputadoras, la respuesta a la pregunta de las preguntas iba a ser cuarenta y dos? Todo se reduce a ese único número.

Ese agujero negro parecía tan grande como un grano de mostaza perforado en Nueva York contemplado desde Nimega, o como un pelo a una distancia de trescientos cincuenta kilómetros. M87 estaba a cincuenta y cinco millones de años luz, por lo que esto correspondía a un diámetro de cien mil millones de kilómetros. Mediante la comparación con nuestras simulaciones pudimos determinar la supermasa de esa bestia, que es, efectivamente, de seis mil quinientos millones de masas solares. El horizonte de sucesos de un agujero negro semejante sería, aplicado a nuestro sistema solar, cuatro veces tan grande como la órbita de Neptuno.

No obstante, en ese momento todavía no estaba claro qué «fotografía» debía ser y sería la imagen. Después de todo, teníamos algunas de cuatro días diferentes con tres algoritmos diferentes, es decir, doce imágenes. Todas parecían tan similares que se confundían, pero no eran del todo iguales. Estalló un debate serio en el grupo imaginero de trabajo, que Geoff Bower y yo tratamos de moderar. Al final, el grupo decidió simplemente promediar en

una imagen los tres métodos distintos para el mejor día de medición del mes de abril de 2017. Se mostrarían también las imágenes de los demás días y las individuales, pero no de una manera tan destacada. Se trató casi de una decisión salomónica. Todos los miembros del gran equipo podían afirmar ahora y con razón que su trabajo también estaba contenido en esa imagen única.

La última gran pregunta era: ¿cuándo la publicaríamos? Shep Doeleman estaba planeando una fecha para el mes de febrero, próxima a la gran rueda de prensa en la AAAS, en Washington, el mayor congreso científico del mundo. Me pareció demasiado arriesgado; yo abogaba por una fecha en primavera o incluso en verano. La buena ciencia y las buenas publicaciones requieren su tiempo y el día solo dispone de veinticuatro horas. La fecha señalada se demostró insostenible por temprana, y algunos de nosotros acordamos una fecha para el mes de abril, para después de la campaña de observación planeada y posteriormente anulada. La exclamación de Doeleman, «duro, pero factible», se convirtió en una frase célebre, casi cínica, entre los enterados, y es que también ese intervalo de tiempo hasta abril era para todos nosotros una prueba dura de resistencia. Lo de duro se quedó corto.

## DOLORES DE PARTO

Sin embargo, antes de que la imagen pudiera divisar por fin la luz de la opinión pública mundial, quedaba todavía una fase de trabajo intenso por hacer. La revista especializada *Astrophysical Journal* nos había prometido una edición especial para nuestros seis artículos. Un grupo de coordinadores se encargó de cada uno; la mayoría de las veces se trata de los coordinadores de los respectivos grupos de trabajo y a menudo, además, una serie de subcoordinadores que se responsabilizan de apartados individuales. Se escribió a muchas manos simultáneamente en una plataforma en línea.

Doeleman, Tilanus y Fish coordinaron el artículo sobre nuestro instrumento. Geoff Bower, Dimitrios Psaltis, Luciano Rezzolla y yo coordinamos y escribimos el artículo general. Fuimos el único equipo sin ningún grupo de trabajo propio, pues teníamos que resumir todo, con frecuencia antes de que los otros resultados estuviesen completamente listos. Una y otra vez generamos versiones nuevas y las enviamos a la plataforma



colaborativa para que las comentaran. Se cuestionó cada frase, cada referencia individual, y, en parte, también se debatió buscando las contradicciones. Todos los equipos de las publicaciones pasaron por un proceso extenuante y desmoralizador. Un comité de publicación acompañó este proceso y buscó expertos internos para cada artículo antes de enviarlo a la revista especializada<sup>[164]</sup>.

En nuestro artículo no solo resumimos todos los demás artículos, sino que debatimos también los puntos fuertes y los puntos débiles de nuestro resultado último. ¿Podía ser que el anillo estuviese allí solo por casualidad, como un aro de humo en el aire causado por un avión a reacción que pronto se difuminará? Probablemente no, pues en las miles de observaciones VLBI de jets alrededor de los agujeros negros no se ha visto nunca algo así y nuestra estructura parecía estable. ¿Podía ser que se encontrase allí algo que se parecía a un agujero negro pero que de hecho fuese completamente diferente, por ejemplo, un conglomerado gigantesco de partículas elementales todavía desconocidas, una estrella de bosones? Los físicos teóricos han desarrollado muchas ideas de este tipo, creativas pero apenas fundamentadas, y nosotros habíamos simulado tales teorías incluso con ejemplos<sup>[165]</sup>. No podía descartarse del todo, pues en la zona de penumbra alrededor del horizonte de sucesos podría ocultarse una física complicada y todavía desconocida. Sin embargo, un agujero negro era la explicación más simple y más probable para nuestra imagen, y aclaraba toda una variedad de fenómenos astrofísicos en el universo.

Nuestro verdadero avance fue que por primera vez nos habíamos acercado a un agujero negro supermasivo de la única manera posible. Hasta donde alcanza nuestro conocimiento y nuestra conciencia, podemos afirmar que esos monstruos masivos oscuros de las galaxias son, en efecto, agujeros negros.

Ahora veíamos con nuestros propios ojos lo que los pioneros de los cuásares solo podían suponer hacía casi cincuenta años, y pronto lo vería el mundo entero. Daba comienzo una nueva fase: tras décadas de búsqueda de agujeros negros comenzábamos ya con su medición. La cuestión ya no era si existían, sino si los comprendíamos correctamente. Todo está claro ahora: si los agujeros negros fueran diferentes de lo pensado, las desviaciones serían más bien pequeñas, pues de lo contrario nuestra imagen habría tenido otro aspecto.

El horizonte de sucesos ya no es ninguna idea matemática abstracta como en tiempos de Einstein y de Schwarzschild. Se ha convertido en un lugar concreto en el que llevamos a cabo investigaciones científicas. Al mismo

tiempo, con las ondas gravitatorias, los púlsares y el Telescopio del Horizonte de Sucesos hemos reunido una rica gama de instrumentos para examinar en detalle la teoría de la relatividad en las zonas más extremas del cosmos y a diferentes escalas. La teoría general de la relatividad, por ejemplo, predice de una forma muy básica que los tamaños del horizonte de sucesos y su sombra son proporcionales a la masa del agujero negro. Las ondas gravitatorias, descubiertas en el año 2016, proceden en un principio también de esa región de sombras, pero de pequeños agujeros negros estelares, cuyo tamaño es posible calcular.

Nuestro agujero negro es cien millones de veces más pesado, pero también cien millones de veces más grande que esos pequeños agujeros negros estelares, exactamente tal como se esperaba. La predicción más fundamental de la teoría de Einstein, la denominada «invariancia de escala», fue confirmada con una precisión impresionante: de casi ocho decimales.

Cuando redactamos los artículos me di cuenta también de nuestro problema con la denominación para el agujero negro en la galaxia M87. Sencillamente no teníamos ningún término para esa maravilla gravitacional. Los astrónomos no habían dedicado ningún pensamiento a cómo llamarlo. O bien le poníamos un nombre a la criatura o continuábamos hablando de una manera poco práctica del «agujero negro en el centro de M87». Después de todo, M87 es el nombre de toda la galaxia y no del agujero negro.

Así que, tras un debate minucioso en la plataforma colaborativa, añadimos simplemente un asterisco al nombre, igual que en el caso de Sagitario A\*. Se trataba de una decisión eficiente y lógica para los astrónomos. Este principio puede extenderse también a otras galaxias. Sin embargo, los periodistas científicos mostraron su disconformidad al cabo de un tiempo; la gente necesita nombres elocuentes para aquello con lo que tiene un vínculo y M87\* no era ningún mote cariñoso. Por diversión pensamos en llamar Karl o Albert al agujero negro, como un pequeño homenaje a Schwarzschild o a Einstein. Ahora bien, ¿habría tenido posibilidades reales de extenderse entre la mayoría?

Poco después de aparecer nuestras publicaciones, la Universidad de Hawái emitió un comunicado de prensa en el que anunciaba que un profesor de Lingüística había bautizado a la fuente con el nombre de *Powehi*<sup>[166]</sup>. Es una palabra procedente de la mitología hawaiana que significa más o menos «la oscuridad profunda e interminable de la creación». Era un nombre maravilloso, del que los hawaianos estaban orgullosos, con razón, y que se convirtió en parte de su cultura. Sin embargo, la imagen se originó con

telescopios de todo el planeta y es de todos los pueblos y de todos los idiomas. Tal vez cada país debería pensar un nombre, un apodo, por decirlo así, para M87\*.

Cuando estuvo listo nuestro artículo, este constaba de nueve páginas de texto continuo. Sin embargo, necesitábamos casi el mismo número de páginas para enumerar a todos los colegas, instituciones, universidades, promotores y radiotelescopios que habían participado en él. Se listaron trescientos cuarenta y ocho autores por orden alfabético. El primero era Kazunori Akiyama; la última, Lucy Ziurys, una profesora de Arizona que había desarrollado y mantenido el SMT.

A comienzos de febrero enviamos el artículo de manera oficial a la revista *Astrophysical Journal*. Ahora solo quedaba el proceso de evaluación, denominado «por pares», en el que expertos independientes examinan nuestros resultados. Normalmente, esa revisión puede durar semanas o meses, pero en esta ocasión se había seleccionado con antelación a los expertos, a los evaluadores, y se encontraban listos para comenzar. Este era el último gran obstáculo. ¿Y qué sucedería si los expertos rechazaban nuestro artículo o encontraban errores que hubiéramos pasado por alto? Algunos reaccionan con hostilidad a veces y te pueden convertir la vida en un infierno. A los pocos días recibimos de vuelta los dictámenes anónimos. Pasé la vista por el texto con nervios y me dejé caer con alivio en la silla. Las reacciones eran muy positivas, todo el esfuerzo y la autocrítica habían merecido finalmente la pena. Solo teníamos que cambiar algunos pequeños detalles. También los demás artículos salieron bien parados.

Ya solo quedaban unas pocas semanas hasta nuestra rueda de prensa de comienzos de abril. En Estados Unidos, Shep Doeleman llevaba las riendas con fuerza; pretendía organizar un gran acto en Washington con la NSF. En Europa manteníamos videoconferencias con regularidad con todos los socios para concertar nuestra propia rueda de prensa en Bruselas. Surgieron con rapidez planes para otros actos en Tokio, Shanghái, Taipéi y Santiago de Chile. En Roma, Madrid, Moscú, Nimega y en muchas otras ciudades, la rueda de prensa de Bruselas se retransmitiría en directo y estaría comentada por expertos locales. De este modo, cada país podría escuchar los resultados en sus respectivos idiomas.

Para Europa se trataba de un territorio inexplorado, y es que semejantes ruedas de prensa tienen lugar la mayoría de las veces en grandes instituciones dedicadas a la investigación, como el ESO, en Garching o el CERN, en Ginebra. La ciencia no había llegado todavía a la capital política de Europa.

No obstante, esta imagen es también un éxito de la colaboración y de la financiación europeas. Fue la época de los amargos debates sobre el Brexit y con esta imagen pudimos sentar un precedente de la solidaridad entre los ciudadanos de este continente diverso. Con su financiación y su interés habían contribuido a alcanzar este éxito. Eso es lo importante para mí.

El 20 de marzo de 2019 quedó aceptado el último artículo. Hacía mucho tiempo ya que teníamos organizadas las ruedas de prensa. Ahora lo principal era no dejar que se filtrase nada a la opinión pública. En un proyecto tan grande, con tantísimos colegas, esto resulta complicado en extremo, y hacía mucho que circulaban rumores de que el 10 de abril iba a anunciarse algo gordo.

Cuando un periodista científico se enteró de que iban a celebrarse simultáneamente seis ruedas de prensa en todo el mundo, le saltaron todas las alarmas. Durante días me pidieron información innumerables veces. Un conocido reportero del *New York Times* llamó por teléfono a mi doctoranda Sara Issaoun, con un pretexto cualquiera pretendió sonsacarle información, pero ella se mantuvo firme y no desveló nada. Sin embargo, el periodista acabó obteniendo lo que quería... de Estados Unidos. La mayoría de los periodistas contaban con que íbamos a presentar una imagen del centro de la Vía Láctea. Alguno que otro tendría que cambiar a toda prisa su artículo ya redactado.

Un día antes de la rueda de prensa viajé a Bruselas con Luciano Rezzolla, Monika Moscibrodzka, Anton Zensus y Eduardo Ros para presentar la imagen. Nuestro variado equipo estaba en representación de cinco países diferentes y como mínimo de seis idiomas.

En Estados Unidos, Shep Doeleman y tres compatriotas se pusieron en marcha, entre ellos mi colega Sera Markoff, de Amsterdam. También en Tokio, Taipéi y Santiago comenzaron los preparativos. De nuevo, se trataba de una especie de expedición global, solo que esta vez éramos nosotros a quienes se iba a observar con atención. En muchas universidades, colegas y estudiantes seguirían el acto en directo, igual que presenciamos en su momento el anuncio de las ondas gravitatorias. Para los astrónomos, un evento así es un poco como ver un mundial en las pantallas públicas gigantes para los aficionados al fútbol, pero con menos cerveza.

Se programó un ensayo de la rueda de prensa con un experto en medios de comunicación, justo en la misma sala en la que tuvimos que defender en su día nuestra solicitud de financiación ante los expertos del ERC. Se bajaron las persianas, yo pronuncié mis palabras de apertura y con tensión mostré a los

colaboradores de la Unión Europea la imagen en la pantalla por primera vez. A continuación los miré a los ojos, que destellaban, y durante algunos segundos reinó un silencio casi reverente incluso entre los profesionales más curados de espanto. Me hice una primera idea sobre la carga emocional que poseía aquella imagen.

Por la noche me retiré a mi habitación del hotel para meditar una vez más sobre las palabras que iba a pronunciar al día siguiente y para practicar ante el espejo. Quería decir la frase «Esta es la primera imagen de un agujero negro» en cuatro idiomas. Sara Issaoun la tradujo por mí al francés. Entretanto recibí la visita breve de mi hijo, Nik, que a pesar de su corta edad, ya había tenido un inicio exitoso como músico y compositor para películas. Para el ESO ha acompañado con música nuestro zoom del agujero negro<sup>[167]</sup>, e incluirá escenas de ese día en su primer vídeo musical<sup>[168]</sup>.

A medianoche nos llegó el aviso de una amenaza informática. Un periodista científico<sup>[169]</sup> y antiguo compañero de estudios había descubierto el comunicado de prensa secreto con la imagen en un sitio web inseguro. Con ese enlace podría haberse convertido en una sensación en internet, pero por suerte nos informó. Algunos colegas se pasaron la noche en vela para solucionarlo. ¿Quién más lo habría encontrado? ¿Fue el único? Esperamos con tensión el día siguiente y el comienzo de la rueda de prensa, pero todo el mundo permaneció en silencio; ese día se convertiría en una fiesta para la ciencia.

Cuando el ganador del Premio Nobel George Smoot presentó en 1992 la primera imagen de radio que mostraba a nuestro joven universo solo trescientos ochenta mil años después de la Gran Explosión, dijo en un tono algo patético: «Estamos viendo la cara de Dios». Quise contraponerme un poco a esa frase. Si el Big Bang es el comienzo del espacio y del tiempo, entonces los agujeros negros significan algo así como su fin. De ahí que concluyera mi rueda de prensa con este comentario: «La sensación es como la de estar mirando las puertas del infierno». Y el mundo entero las estaba mirando.

## **CUARTA PARTE**

### **Más allá de los límites**

Una mirada al futuro: las grandes cuestiones abiertas de la física, la cuestión acerca del lugar del ser humano y de Dios

## Más allá de nuestro poder de imaginar

### UNA RECEPCIÓN ABRUMADORA

La resonancia de la imagen del agujero negro fue abrumadora, parecía fascinar a todos y a todas<sup>[170]</sup>. Los principales diarios y semanarios internacionales informaron acerca de este acontecimiento único en la historia de la ciencia y de la humanidad. Lo mostraron los canales de noticias líderes de la televisión, y las redes sociales echaban humo. Era maravilloso y alarmante a la vez. Un instante de alegría compartido en todo el planeta. Una reminiscencia de los sentimientos que desató el primer alunizaje en el mes de julio de 1969. Mientras tanto, mi hija se había convertido en una joven vicaria que estaba haciendo sus prácticas en la escuela. «En la sala de profesores, todos tienen tu imagen en el teléfono móvil», me escribió con orgullo.

Es impresionante la cantidad de gente que se apropió de la imagen al instante. Se hicieron montajes innumerables y muy divertidos mezclándola con fotos de gatos, y se reenviaba a otra gente. El buscador Google la puso como *doodle* del día en su página principal<sup>[171]</sup>. En la redacción de los medios de comunicación líderes alemanes colgaba en el tablón de anuncios como anécdota política de actualidad. Una foto de Katie Bouman mirando esa imagen por primera vez con cara de fascinación se viralizó en internet, y ella, en contra de su voluntad, se convirtió en una estrella de las redes sociales<sup>[172]</sup>. Una gran agencia de fotografía de China afirmó poseer los derechos de autor de la imagen e intentó venderla. La indignación en internet condujo a una caída de la cotización en bolsa del 27 por ciento; dos días después de la rueda de prensa, la empresa había perdido ciento treinta y cinco millones de euros de valor a causa de nuestra imagen<sup>[173]</sup>.

Es probable que nunca antes una sola imagen científica hubiera estimulado tan rápidamente la imaginación de los seres humanos. No en vano, nuestro éxito es también su éxito. Ningún científico ni ninguno de los equipos lo habría podido conseguir en solitario sin las muchas personas que se ocuparon de que nosotros funcionáramos también y pudiéramos realizar nuestro trabajo: los panaderos que horneaban nuestro pan; los encargados de la limpieza que limpiaban nuestras dependencias; los equipos de cocina y los técnicos de las estaciones de los telescopios. En definitiva, todos los ciudadanos y ciudadanas contribuyeron en este proyecto global con su respaldo a nuestra comunidad.

Muchos colegas de todo el mundo me contarían tiempo después cómo vivieron ese día único. Todos tuvieron que explicar a los amigos, a los vecinos y a la prensa lo que había ocurrido en realidad. La semana posterior a la gran rueda de prensa transcurrió con un subidón de adrenalina. Nos llevaban a todas partes: entrevistas y conferencias, y recibíamos infinidad de correos electrónicos y mensajes de texto a todas horas. Todos y todas nos habíamos abierto paso con nuestras últimas fuerzas hasta la fecha de la aparición de la imagen, y ahora estaba quemando las reservas que me quedaban. Se me contraía el corazón de una forma muy peculiar como nunca antes en mi vida, hacía semanas que me sentía como un coche con el ralenti demasiado acelerado, pero sin ningún descanso a la vista.

Tenía programadas siete conferencias en cinco días y en Semana Santa, que para mí tiene una importancia especial; sin embargo, no percibía todavía el ambiente pascual. El Domingo de Ramos di una conferencia en el abarrotado museo municipal de Nimega; el Jueves Santo hablé ante un grupo de astrónomos en Cambridge. De nuevo, la sala estaba llena hasta el último asiento. Entre el público se encontraba Martin Rees, el astrónomo de la corte real británica, quien hizo presentable y aceptable la idea de los agujeros negros en los años setenta. Ahora miraba con sus propios ojos la primera imagen de un agujero negro y formulaba la pregunta decisiva: «¿Qué vemos realmente en la imagen? ¿El horizonte de sucesos?». «Solo su sombra», respondí, y en ese mismo instante me sentí como una sombra de mí mismo. Me picaba la garganta, estaba mareado, sentía que mis fuerzas se habían consumido. Regresé a casa cansado, y a trancas y barrancas; en realidad teníamos planeadas unas vacaciones para Pascua.

Al día siguiente, Viernes Santo, fui como cada año con mi esposa a una misa de la Asociación Cristiana de Jóvenes en Colonia. Es el lugar donde comenzó mi historia de fe. Oímos la historia de la muerte y el sufrimiento de



Jesucristo: recibido entre vítores por la multitud el Domingo de Ramos, luego la despedida con sus amigos el Jueves Santo, delatado esa misma noche y crucificado el Viernes Santo entre burlas por unas intrigas de las que era inocente. Yo estaba sentado en la última fila, y mientras escuchaba la historia, pensaba en los vítores de los últimos días, pero también en las heridas que costaron. Lloré. Ahora necesitaba el descanso y la energía de la Pascua.

Tardé algunos días en volver a estar al cien por cien. Los ánimos volvieron a hacer acto de presencia, pero mi corazón necesitaba todavía algunas semanas para regresar a la calma.

Di espontáneamente la primera gran conferencia pública después de Semana Santa en la reunión cristiana de Spring, en la región montañosa de Sauerland. Por lo general, allí se presentan las ponencias científicas en diminutos seminarios, pero los organizadores habían reservado en el último momento la gran sala de conferencias.

En la sala, llena hasta los topes, no había ni rastro de hostilidad hacia la ciencia, sino una expectativa cordial. Enfermeras, artesanos, escolares, jubilados, maestros, dependientes y empresarios estaban sentados, inmóviles, en sus asientos, y escuchaban embelesados. Mi amigo músico Lothar Kosse dijo inspirado: «Todo es posible, todo es imposible» y puso el cielo y un agujero negro en su siguiente álbum. Los agujeros negros parecen fascinar a todos los seres humanos por igual. Pero ¿por qué es así?

#### LO QUE LOS AGUJEROS NEGROS CUENTAN DE NOSOTROS, LOS SERES HUMANOS

Monstruos de la gravitación, máquinas de devoración cósmicas, fauces del infierno: para las descripciones de los agujeros negros cualquier superlativo se queda corto. Los agujeros negros son los dinosaurios de la astrofísica —populares como el *Tyrannosaurus Rex*— a pesar de, o precisamente a causa de, su temible fama. El hecho de que nuestra imagen adornara los titulares de las revistas de todo el planeta era ya excitante de por sí, pero que las personas reaccionaran con tanta emoción hizo que el asunto se volviera aún más conmovedor.

Hubo personas que me contaron cómo les había cautivado la imagen, que no pudieron dormir la víspera de la revelación por los nervios o que se quedaron profundamente emocionados cuando la vieron. Ni los bosones de

Higgs, ni las ondas gravitatorias habían desencadenado tales emociones. Así pues, ¿qué cuentan los agujeros negros de nosotros, los seres humanos?

Me parece que representan nuestros temores más básicos como ningún otro fenómeno científico. Son uno de los grandes misterios en las inmensidades del espacio. En la astrofísica marcan el final total y son la personificación de máquinas despiadadas de destrucción. Los seres humanos perciben esto de una manera intuitiva. En nuestra imaginación, los agujeros negros simbolizan la nada devoradora, un límite en el que cesa toda vida y toda comprensión, la visión de las puertas del infierno.

Los agujeros negros hablan de un mundo que es completamente diferente al nuestro. La luz no se mueve allí en línea recta, sino en círculo. Si miro hacia delante, veo mi espalda. El tiempo casi parece detenerse para uno, mientras que para otro continúa fluyendo. El gas circula por todas partes prácticamente a la velocidad de la luz y puede alcanzar temperaturas apocalípticas, en las que toda materia se descompone en sus partículas elementales. De las moléculas y los núcleos atómicos solo queda una nube candente de protones y electrones, el plasma. Yo podría caer en un agujero negro, en principio sobrevivir también y realizar incluso mediciones científicas, pero jamás podría decirle a nadie lo que estoy viendo allí. Ninguna información abandona un agujero negro, ni siquiera las ondas de luz. Los agujeros negros nos acercan al más allá.

El más allá existe, en efecto, incluso en la física. En la teoría general de la relatividad, él no tiene nada de sobrenatural, sino que incluso es una parte importante de ella, y divide el mundo en dos ámbitos: este mundo, el aquí, es el espacio al que estoy unido, del que puedo conseguir informaciones y que se comunica conmigo. Y luego está el más allá, el espacio que sobrepasa fundamentalmente mi propia posibilidad de la experiencia. De él no aprendo nada; me lo oculta todo. Mi horizonte separa estas dos esferas.

Con obstinación y por principio los agujeros negros se oponen con su horizonte de sucesos a nuestra curiosidad y a nuestra facultad de percepción. Todo lo que desaparece detrás de él permanece allí para toda la eternidad, eso si la teoría de Einstein es la verdad última.

Ese eterno más allá de los agujeros negros es uno de los mayores desafíos de la física moderna. En la teoría, el espacio tras el horizonte de sucesos está claramente ubicado y, sin embargo, solo existe en nuestra imaginación. Es igual de real que del todo irreal. Con nuestros radiotelescopios podemos visualizar en la actualidad con una precisión asombrosa dónde se encuentra la puerta al más allá en las profundidades del espacio. Podemos describirla

desde un punto de vista físico, e incluso podemos ver cómo la luz desaparece allí en forma de mancha oscura sin que vuelva a aparecer nunca más.

Podemos decir: «Ahí, está justo ahí, exactamente en ese lugar existe un espacio que no es de este mundo», solo para dejarnos vencer por la impotencia y confesar que no somos capaces de medirlo. Los agujeros negros son el más allá en medio de nuestro aquí.

Para los físicos esto es similar a una declaración de fracaso total. ¿Qué tipo de física es esta que ocupa un espacio en una ubicación claramente definida en medio de nuestro universo, pero que se sustrae a todo examen? ¿Puede seguir hablándose aquí de una ciencia experimental? «Sí, por supuesto que es física —me dicen los físicos teóricos—, ¡pues podemos medir con precisión lo que sucede en ese espacio!». «¡No, no es física! —replico yo—. Esto es física del más allá». O más bien, metafísica.

A la mayoría de las personas les son indiferentes las leyes físicas cuando piensan en el más allá, pero todo el mundo tiene una idea al respecto, y su conocimiento es antiquísimo. La concepción de un mundo más allá espolea nuestra imaginación, es desafiante y está estrechamente unida al mismo tiempo con la muerte. Los agujeros negros son tan solo un símbolo nuevo de una larga lista.

Hace más de cien mil años nuestros antepasados comenzaron a enterrar a los fallecidos. Posiblemente poseían ya la idea de una vida después de la muerte. Nadie sabía qué aspecto podía tener algo como el más allá, pero los primeros ritos de respeto y los sentimientos por los muertos están en nuestro origen y dan testimonio al menos de una evolución cultural que ha producido nuestras ideas actuales, muy evolucionadas, acerca del más allá.

Sin embargo, muchas de estas visiones son similares en todas las culturas: una vida eterna, un juicio divino, el cielo y el infierno. En la Antigüedad los seres humanos creían en un supramundo para los vivos y en un inframundo para los muertos, una idea que conocemos de numerosas culturas: los griegos denominaban Hades a ese lugar. En la mitología nórdica reinaba Hela, la diosa de los muertos, en su Helheim. Posteriormente, el término «infierno» (*Hölle*) se derivó probablemente de su nombre. En cambio, los vikingos caídos en combate podían vivir en el Valhalla, un lugar paradisíaco para guerreros. También los romanos imaginaron un oscuro y profundo lugar, se llamaba Orcus. Los mayas denominaban Xibalbá al inframundo, el lugar del miedo.

Con las religiones globales quedó establecida la idea del más allá. El cristianismo y el islam parten de la base de que existe un paraíso o un cielo y

una vida en el más allá. En el judaísmo imperan dos opiniones: una parte inmortal del alma que continúa viviendo después de la muerte y que regresa a Dios. Los judíos ortodoxos, en cambio, creen en la resurrección. No incineran a sus fallecidos, pues para ellos es sagrada la paz de los muertos. Los budistas y los hinduistas creen en millones de renacimientos, tal vez incluso como animal o planta. Solo el final de la transmigración de las almas en el Nirvana interrumpe y da fin a ese ciclo.

Los agujeros negros añaden a todos estos mitos del más allá uno nuevo, moderno. Es un mito inspirado en las ciencias experimentales, en el que se mezclan cuestiones profundamente humanas con imágenes de la física moderna. Para nosotros, la muerte biológica significa traspasar un límite: del aquí y el ahora pasamos a un más allá, del que no podemos saber si existe. ¿Hay algo más después, o allí no hay nada? Quien haya presenciado alguna vez la muerte de un ser querido, habrá percibido cómo un moribundo se retira de su propio cuerpo en los últimos minutos para no dejar más que una envoltura vacía. No podemos conocer ninguno de los últimos pensamientos, experiencias y sueños de ese ser humano cercano a nosotros, se los lleva literalmente consigo a la tumba y al más allá. «¿Adónde va?», me pregunté cuando murió mi madre ante mis ojos. Unos pocos minutos antes le había sostenido la mano y había rezado con ella.

La muerte hace que se tambaleen todos nuestros cimientos. El estremecimiento ante la certeza de un final se cuenta entre los sentimientos primigenios, que con gusto rehuiríamos, pero que una y otra vez nos atraen como con magia. Hasta ahora los agujeros negros eran tan solo formas abstractas, figuras de la imaginación que cobraban vida en las películas de Hollywood, pero hoy han adquirido por primera vez unos rasgos. Ciertamente no puede palparse, no puede percibirse, pero sí visualizarse. Podemos mirar a la bestia a los ojos, y en ellos divisamos justo nuestra angustia primigenia. ¿Se trata tal vez del primer paso para superar ese miedo?

«Pero mira aquí, es lo que parece la entrada al infierno —oigo susurrar a mi subconsciente—, no hay ningún motivo para entrar en pánico, estás a salvo aquí en la silla de tu escritorio». Aunque no sé exactamente lo que sucede allí, al menos lo he visto con mis propios ojos; el horror ya no es algo difuso, sino que puede ser descrito e ilustrado.

Mientras el Sol brilla por la ventana y la Tierra rota tranquilamente alrededor de su eje, contemplo esta imagen del agujero negro y sé que está muy lejos. Ninguno de ellos, ni siquiera alguno de los muchos de pequeñas dimensiones que existen en nuestra Vía Láctea, nos trasladará al más allá. El

agujero negro más próximo conocido tiene cuatro masas solares y se halla aproximadamente a una distancia de mil años luz de la Tierra<sup>[174]</sup>. Desde la lejanía, su fuerza de atracción no es mayor que la de una estrella normal y corriente, y su horizonte de sucesos solo es casi tan grande como el lago de Constanza<sup>[175]</sup>. La posibilidad de que nos afecte un agujero negro así de pequeño es escasísima. Esto no ha sucedido en los últimos cuatro mil millones de años y no nos sucederá tampoco en un futuro próximo.

Así que podemos seguir observando con tranquilidad los agujeros negros desde la lejanía y disfrutar de su física exótica. Sin embargo, una instantánea puede desarrollar una fuerza simbólica. En ese sentido, nuestra imagen no es solo ciencia, sino también arte y mito al mismo tiempo<sup>[176]</sup>. El Museo de Arte Moderno de Nueva York y el Museo Nacional de Amsterdam la añadieron en su colección, por presiones, y está colgada en los pasillos, como un cuadro.

Los artistas consiguen expresar lo abstracto en palabras e imágenes y crear una realidad, y el arte transforma e interpreta la realidad. En ese sentido, la ciencia es también una pieza de arte. Sus imágenes no son nunca la realidad misma, solo dan un testimonio de la realidad y con su historia crean una nueva y abstracta, estimulan pensamientos y visiones del mundo completamente distintas y plantean nuevas cuestiones.

Una imagen científica no tiene ningún valor sin su historia, y nuestra imagen tan solo sería una mancha oscura sin la historia que tiene detrás. De ahí que el significado de la imagen se mantenga e incluya la credibilidad de los seres humanos que la generaron, así como la historia que le dieron. Esto último es válido en realidad para cualquier resultado obtenido en una investigación. Nosotros, los científicos, no vivimos únicamente de los hechos, sino también de la confianza depositada en nosotros.

En esa imagen queda reunida toda la evolución de la astronomía y de la física, así como el sentimiento, la exageración mítica y el silencio comprensivo, la mirada hacia las estrellas, la medición del mundo y del universo, la comprensión del espacio y del tiempo, la tecnología más moderna, la colaboración global, la tensión humana, el miedo a perderse y la esperanza de algo completamente nuevo. Esta imagen nos lleva a nuestros límites en cualquier sentido, pues todavía no están aclaradas, ni de lejos, todas las cuestiones relativas a los agujeros negros.

El EHT continúa trabajando. Todo el mundo está esperando con tensión a ver el aspecto que tiene el agujero negro del centro de la Vía Láctea. ¿Conseguiremos esa imagen o la inquietud nos la echará a perder? ¿Nos mostrará también Sagitario A\* algún día su sombra? ¿Qué aspecto tendrá

M87\* en los próximos años? ¿Podremos ver qué les ocurre a los campos magnéticos en torno al agujero negro? ¿Conseguiremos realizar tal vez una película en lugar de una imagen? Deseamos observar mucho más y necesitamos urgentemente telescopios adicionales. Ojalá uno pronto en África, ¡agradeceré cualquier respaldo<sup>[177]</sup>! Obtendremos imágenes definitivas y de una nitidez impresionante en cuanto tengamos antenas de radio orbitando la Tierra<sup>[178]</sup>. Entonces sí contaríamos con un telescopio más grande que la Tierra. ¡Todavía hay mucho por ver!

## 2

### ¿Más allá de Einstein?

#### LOS AGUJEROS DE GUSANO

Cuando era pequeño vivía con mis padres en un gran edificio de apartamentos. En el patio trasero había un cajón de arena y algo de césped. El jardín estaba rodeado por un muro infranqueable, y yo siempre quise saber que había detrás de él. Así que un día comencé a perforar un agujero con clavos y palos en las juntas. Para mis pequeñas manos eso era muy laborioso y agotador. Estuve trabajando en aquello en secreto durante algunos meses, cuando los adultos no miraban. La grieta fue haciéndose cada vez más grande, pero nunca conseguí atravesar el muro porque era, simplemente, demasiado fuerte para mí.

Cuando me hice lo bastante mayor para ir a la escuela, pude explorar el terreno de detrás del muro, y allí estaba el patio de la escuela. En lugar de atravesar el muro, ahora solo tenía que abandonar el patio trasero, dar la vuelta al bloque de viviendas y luego pasar por la gran puerta para llegar hasta el terreno que antes me parecía tan misterioso. A veces solo hay que crecer y madurar con paciencia para comprender que atravesar el muro era la vía errónea y que la correcta era dar la vuelta a la esquina.

Sigo teniendo exactamente la misma curiosidad cuando la cosa va de muros y de límites. ¿Qué hay detrás? ¿Conseguiremos algún día superar nuestros límites? ¿Son insuperables los muros oscuros de los agujeros negros? ¿No existe en algún lugar del horizonte de sucesos una grieta a través de la cual podamos mirar, o por donde dar un rodeo?

Albert Einstein ya planteó en 1935 la misma cuestión cuando debatía sobre el interior de los agujeros negros con Nathan Rosen, su asistente. Desde un punto de vista matemático, las ecuaciones permiten también lo contrario

de un agujero negro, es decir, un agujero blanco, del que solo puede salir algo, pero no puede entrar nada. Peor aún: en principio, un agujero blanco y un agujero negro podrían estar interconectados a través de un puente que permitiría el acceso por un agujero negro y la salida, al otro extremo, por un agujero blanco.

En la física, a ese constructo se le conocía como el puente de Einstein-Rosen. Sin embargo, con gran visión publicitaria, el profesor de Princeton John Archibald Wheeler lo bautizó en los años cincuenta como agujero de gusano, haciendo felices así a generaciones de autores de ciencia ficción. Y es que de esa manera no solo sería posible escapar de los agujeros negros, sino que además los agujeros de gusano interconectarían dos ámbitos del universo y se podría viajar a una velocidad mayor que la de la luz. Serían imaginables incluso los viajes en el tiempo y las visitas a otro universo.

Ahora bien, todo lo que es posible matemáticamente ¿es también real? Las matemáticas son la mitología de la ciencia, una descripción abstracta que ilustra las experiencias reales de una manera igual de maravillosa que las criaturas fabulosas producto de la imaginación. Lo que existe en las matemáticas puede existir también en la realidad, pero no tiene por qué ser así. Distinguir entre una y otra es la dura tarea de los físicos.

En el caso de los agujeros blancos y los agujeros de gusano estamos frente a la misma pregunta: ambos parecen reales desde la perspectiva matemática, pero ¿tienen sentido también desde un punto de vista físico? Hasta el momento no hemos encontrado ningún indicio de que exista un agujero de gusano en el espacio. De hecho, con la imagen de M87\* reflexionamos un poco si podría tratarse tal vez de uno. Sin embargo, el tamaño no encajaba con las predicciones<sup>[179]</sup>.

Aún más desagradable es el hecho de que los agujeros de gusano son matemáticamente inestables; colapsan si los atraviesa la materia, al menos en la teoría. Para evitar esto habría que inventar una nueva forma de materia que genere antigravedad. La antimateria por sí sola no resultaría apropiada, pues está sujeta a la ley de la gravitación universal, lo mismo que la materia normal. Si se arrojara antimateria al aire, esta debería caer al suelo, a no ser que se aniquilase previamente con materia en una explosión que despediría una enorme cantidad de energía y luz<sup>[180]</sup>.

Otro problema es el hecho de que no tenemos ni idea de cómo podría originarse de manera natural un agujero de gusano transitable. Probablemente habría que construirlo. Para algunos teóricos creativos esto no representa ningún problema: «Dado que no sabemos nada con certeza sobre la tecnología



y los materiales de civilizaciones avanzadas, nosotros, los físicos, tenemos una libertad infinita para desarrollar algo así», afirmó el premio Nobel Kip Thorne en el *New York Times*<sup>[181]</sup>. Yo soy bastante escéptico al respecto. Aun cuando los agujeros de gusano pudieran existir, no está comprobado, ni siquiera en la teoría, que sean capaces de hacer realidad todas esas promesas milagrosas. Ahora bien, soñar se puede a pesar de todo.

## LA RADIACIÓN DE HAWKING

La teoría cuántica y la teoría de la relatividad de Einstein son tal vez las ideas más revolucionarias en las ciencias experimentales. Determinan nuestro mundo en sus cimientos, y ambas son fundamentales. Sin embargo, cuando tratamos de conciliarlas, rebasamos un límite mental. Los agujeros negros revelan ese conflicto insoluble con mucha claridad, como ningún otro objeto cósmico.

La teoría general de la relatividad describe lo más grande de todo, el espacio-tiempo. En él suceden el principio y el final de nuestra vida, así como el espectáculo del universo entero. Es el teatro en el que se desarrolla el universo. Todo tiene su ubicación y su momento en el espacio-tiempo. Si recordamos el ejemplo de la sábana, entonces ese teatro no posee un escenario estático, sino que se compone de un tapiz flexible que actúa también, que reacciona, que cambia con los protagonistas. Un agujero negro es el actor más radical de ese escenario cósmico, un actor que lo desgarrar, por decirlo así, y que nos plantea cuestiones profundas.

¿Todo tiene su lugar y su tiempo? ¿Es realmente así? ¡No! Y ahí está la segunda teoría igual de fundamental, la teoría cuántica. Mientras que la de la relatividad describe lo muy grande, la teoría cuántica describe lo más pequeño de todo: la estructura de la materia, las moléculas, los átomos y las partículas elementales. Ahora bien, son precisamente esos componentes de la luz, los fotones, los que hacen que el espacio-tiempo sea medible. Esos cuantos de luz sacan al espaciotiempo de la oscuridad de una descripción matemática abstracta a la claridad de la realidad experimentable. Así pues, en este punto se tocan la relatividad y la física cuántica.

Sin embargo, a diferencia de la teoría de Einstein, no todo tiene su lugar o su tiempo en la física cuántica. En apenas un instante, los procesos pueden

avanzar y retroceder. Las partículas pueden estar en dos o más lugares a la vez cuando nadie mira. En sus extremos, la teoría cuántica inaugura un mundo microscópico que nos es tan ajeno como el mundo macroscópico al borde de los agujeros negros. No obstante, ambas teorías se han convertido en parte de nuestra vida cotidiana y trabajan apaciblemente una con la otra en nuestros teléfonos inteligentes, por ejemplo. Cada chip, cada semiconductor de nuestros teléfonos es física cuántica aplicada. Sin ella no habría internet ni cerebros de ordenador. Por otra parte, el sistema de navegación que nos señala el camino en el mapa del teléfono móvil, emplea los resultados de la teoría general de la relatividad.

Sin embargo, ambas teorías colisionan en el borde de los agujeros negros de una manera fundamental. Ahí debe de estar operando una física completamente nueva, y desde hace muchos años decenas de miles de los investigadores e investigadoras más inteligentes de nuestro planeta se devanan los sesos acerca del aspecto que podría tener, pero no han conseguido ningún éxito claro hasta la fecha.

El problema tiene hasta el momento tan solo una existencia teórica. Se remonta al famoso astrofísico Stephen Hawking, quien, entre otros, reflexionó acerca de lo que sucede con las partículas cuánticas en el horizonte de sucesos.

Los objetos cuánticos son, por ahora, los diablillos más pequeños de la física. Dios les hace la vista gorda en cosas que para nosotros ni siquiera entran en consideración. Así, por ejemplo, pueden «prestarse» energía a corto plazo sin tener que pedir permiso a nadie. Su truco es devolver esa energía tan rápidamente que no se note.

En principio nos imaginamos que el espacio vacío es un gigantesco mar espumoso que salpica de vez en cuando al aire gotas de agua y espuma, para luego desaparecer en él. El límite entre el mar y el aire queda difuminado. Te mojas cerca de la superficie, aunque no estés nadando en sus aguas.

De la misma manera, en el espacio vacío se originan espontáneamente las partículas más pequeñas, y vuelven a desaparecer. No está, entonces, vacío, sino lleno de espuma de partículas. Sin embargo, para generar una partícula de la nada, se requiere energía, por supuesto. ¿De dónde sacarla y no robarla? En el mar es el viento el que genera esas gotas con su energía, pero en el espacio sideral vacío no hay viento. De ahí que la naturaleza emplee un simple truco para equilibrar: toma prestada algo de energía a corto plazo en forma de un cuanto de luz virtual. En ese proceso genera un par cuántico que se compone de dos mellizos exactamente opuestos: una partícula y su

antipartícula, el angelito y el diablillo, por decirlo así. Una tiene carga positiva; la otra, negativa. Si la una gira a la izquierda, la otra lo hace a la derecha. La una es materia; la otra, antimateria. Siguiendo con la imagen del mar, la partícula es como una gotita en el aire, y la antipartícula, como una burbujita de aire en el mar.

Cuando las dos se juntan de nuevo, entonces se anulan sus propiedades; la materia y la antimateria se destruyen mutuamente. No queda nada entonces excepto un breve destello virtual de energía, que desaparece de nuevo en el mar del espacio-tiempo. Es así como se devuelve la deuda de energía y nadie puede quejarse.

Ahora bien, aquí ocurre lo mismo que en una crisis financiera: esa fullería funciona solo mientras no le llame la atención a nadie y se devuelvan con puntualidad todas las deudas. Sin embargo, las cosas se tuercen con los temporales y las tormentas. Entonces saltan las gotas de agua por encima del mar en dirección a tierra y salpican el muelle del puerto en forma de espuma. El mar parece perder agua, te mojas en tierra. Aun así, habría de pasar una eternidad hasta que el mar se vaciase de esa manera y, además, los ríos y la lluvia lo vuelven a llenar una y otra vez.

Justo un proceso así —según Hawking— tiene lugar también en el borde de los agujeros negros. El horizonte de sucesos es la costa en el mar del espacio-tiempo. La tormenta es el agujero negro; en lugar de energía eólica hay allí energía gravitatoria.

Hawking describió este proceso en sus conferencias de esta manera: los pares mellizos de partículas y antipartículas se generan en el borde del agujero negro y se prestan energía de su intenso campo gravitatorio. Antes de juntarse de nuevo, una de ellas desaparece en el horizonte de sucesos. La melliza superviviente ya no puede unirse con su antimelliza y se pierde en la infinitud del cosmos. Una pareja provisional de partículas se ha convertido de repente en una partícula por siempre soltera.

Ahora ya no es posible devolver la deuda de energía con la que se pagó esa partícula; es un negocio con pérdidas. El agujero negro ha pagado por dos partículas, pero tan solo ha recibido una. De esta manera pierde energía y masa. Es como si escapara de él una brisa constante de espuma de partículas, igual que percibimos la brisa marina en la orilla. Y entonces parece como si el agujero negro brillara. Se trata de la radiación de Hawking, que este británico ya fallecido describió por primera vez en 1975.

De todas formas la imagen de las partículas y de las antipartículas de Hawking está aquí un poco abreviada, porque explica principalmente la

tecnología computacional de la teoría cuántica. Al final, lo que se irradia no son partículas, sino sobre todo fotones, es decir, luz, y en unas longitudes de onda mayores que el mismo agujero negro. La radiación no se genera tampoco directamente en el horizonte, sino que procede de una extensa zona alrededor del agujero negro. Por tanto, es como si irradiara el campo gravitatorio.

Desde un punto de vista formal, podemos describir esta radiación de los agujeros negros también como una radiación térmica. Una taza de café caliente se enfría al cabo de algún tiempo, incluso si la tapamos para que no se evapore el agua. La taza produce radiación térmica porque los átomos de la superficie de la taza vibran ligeramente por el calor e irradian partículas cuánticas de luz. El físico alemán Max Planck descubrió las propiedades de esta radiación en el año 1900, y con ellas sentó las bases de la teoría cuántica y las vinculó a la termodinámica: todo cuerpo negro no transparente irradia cuando está caliente, y ello con independencia de la materia de que está hecho y de su forma.

Una taza de café caliente es, por tanto, física cuántica en acción que irradia sobre todo luz de infrarrojo cercano. En ese proceso pierde energía y se enfría lentamente. Las cámaras térmicas son capaces de ver esa luz; nuestros ojos, no. Sin embargo, nuestra mano siente esa radiación incluso antes de que toquemos la taza. Percibimos casi ese temblor cuántico en el interior de la taza mediante la luz invisible.

La forma matemática de la radiación térmica posee siempre el mismo aspecto y depende tan solo de la temperatura; cuanto más elevada sea esta, más elevada será también la frecuencia de la luz. Por esta razón, cuando calentamos el acero primero brilla de forma invisible en la frecuencia del infrarrojo cercano, luego es de color rojo visible, más tarde es amarillento y después es blanco, porque cada vez se añaden más colores de frecuencia elevada. Las estrellas pueden brillar incluso en una tonalidad azulada porque se calientan aún más que el acero al rojo vivo.

Al menos en la teoría, los agujeros negros irradiantes de Hawking pueden emitir exactamente la misma radiación. Así pues, podemos asignarles una temperatura, y esta temperatura depende solo de su masa. Cuanto más pequeños son, más calientes parecen. Según Hawking, un agujero negro con un 0,5 por ciento de la masa de la Luna estaría aproximadamente tan caliente como un café recién hecho e irradiaría de igual manera; pero es bastante probable que no tuviera el mismo gusto.

Debido a la radiación de Hawking, un agujero negro pierde energía y, por consiguiente, también masa; al fin y al cabo masa es igual a energía, como dice la fórmula más conocida de Einstein. Al contrario que la taza de café que se enfría por la radiación térmica cuando se la deja en reposo, ¡un agujero negro siempre se vuelve más caliente debido a su radiación! Cuanto más pequeño es, más elevada será la temperatura y con mayor eficiencia irradiará. En algún momento deflagrará de una manera similar a una explosión con un gran calor, casi infinito. Esto podría explicar por qué, supuestamente, no se dan en la naturaleza los agujeros negros pequeños. Uno con la masa de dos locomotoras diésel juntas, es decir, de unas ciento sesenta toneladas, produciría una radiación de tan solo un segundo de duración.

La cosa es distinta en el caso de los agujeros negros de la astrofísica. Ya uno de estos objetos con la masa del asteroide Ícaro, de unos cien millones de toneladas, alcanza una edad próxima a la del universo antes de que irradie. Un agujero negro con la masa del Sol necesita para ello 1067 años, y M87\* unos inimaginables 1097 años.

Una vez traté de representármelo gráficamente, pero no hay manera. Si tomáramos la masa de todo el universo conocido —es decir, de todas las estrellas, planetas y nebulosas que hay en alguna parte del espacio—, la juntáramos en un gigantesco mar de materia y extrajéramos de él al cabo de mil millones de años un único protón minúsculo, entonces el universo habría desaparecido ya cien millones de veces más rápido que M87\* por la radiación de Hawking.

Además, el universo se habría extinguido por completo, estaría vacío y oscuro antes de que pudieran fundirse los agujeros negros. Y es que cada partícula de gas, cada onda luminosa en el universo permite que un agujero negro siga creciendo. Así pues, en intervalos de tiempo mayores de los que somos capaces de imaginar, solo los agujeros negros supermasivos como M87\* se volverán aún más grandes. La radiación de Hawking en M87\* es tan débil que a ningún aparato le sería posible detectarla, ni por asomo, durante la vida de nuestro universo, ni siquiera si lo enviáramos hasta allí.

No obstante, desde un punto de vista puramente teórico, los agujeros negros podrían evaporarse y, por consiguiente, quedaría libre todo lo que estuvo preso en ellos alguna vez. No habría nada eterno, ni siquiera los agujeros negros.

En los cálculos sobre la radiación de Hawking es decisiva la presencia de un horizonte de sucesos, pero si este fenómeno es realmente una desintegración de los campos gravitatorios, podría imaginarme incluso que al

final también las estrellas de neutrones o incluso la materia normal se desintegrarán en un proceso comparable, y así todos los campos gravitatorios se transformarán de nuevo en luz. Sin embargo, eso sigue siendo pura especulación por el momento.

Al comienzo fue la luz y al final tal vez solo quedará de nuevo la luz, si hasta entonces no sucede nada excitantemente nuevo.

Al término de nuestra rueda de prensa sobre la imagen, el comisario de la Unión Europea, Carlos Moedas, citó algunas frases de Stephen Hawking: «Los agujeros negros no son tan negros como los pintan. No son las cárceles que pensábamos. Hay cosas que pueden salir de ellos, tanto hacia fuera como, posiblemente, hacia otro universo. Así que cuando sientas que estás en un agujero negro, ¡no te rindas! Siempre hay una salida».

Fue el final alentador a una rueda de prensa impresionante. Así pues, para permanecer en esa metáfora, ¿nos permiten los agujeros negros una resurrección a la Hawking, después de haber pasado por el infierno? ¿Son estos objetos tan solo un purgatorio provisional en el camino hacia la verdadera iluminación?

No nos dejemos confundir por esa esperanza engañosa. Tras mi muerte y la incineración de mi cuerpo en un crematorio, es mucho más probable que un tornado reúna las cenizas y el humo, y que yo me recomponga casualmente de nuevo a partir de los restos dispersos por todo el mundo, que yo pueda escapar jamás de un agujero negro.

No obstante, los físicos teóricos no se dan por satisfechos con esa imposibilidad práctica. La mera perspectiva de un suceso semejante los lleva a la mayor de las confusiones.

## PÉRDIDA DE INFORMACIÓN

Cada época tiene sus grandes temas. Estos influyen en nuestras visiones del mundo, pero también influyen en la ciencia. Un colega comentó una vez con suficiencia que no le había extrañado que para designar la explosión primigenia se hubiera empleado el término Big Bang muy poco después de la detonación de la primera bomba atómica. En la actualidad vivimos en la era de la información, y cada vez con mayor frecuencia, la física se parafrasea en el lenguaje de la teoría de la información. Las variantes más recientes llegan

incluso tan lejos como para afirmar que la gravedad puede ser descrita con bits, que las leyes naturales se asemejan a los lenguajes informáticos o incluso que el universo entero es en realidad una única simulación por ordenador<sup>[182]</sup>. Esas fantásticas especulaciones no me convencen mucho, para ser sinceros, pero es indiscutible el hecho de que la información se ha convertido en un concepto importante en las ciencias experimentales.

Todo es información: la materia y la energía, quizá también los agujeros negros. Uno de los conceptos decisivos es el antónimo de información, la no-información, el desorden o, para expresarlo de una forma más distinguida, la entropía. Los conceptos de luz y de tiempo, de conocimiento y de ignorancia, de azar y de predestinación, están, en efecto, estrechamente relacionados.

Ya a finales del siglo XIX, el austríaco Ludwig Boltzmann investigó cómo la termodinámica y sus propiedades —por ejemplo el calor, la presión, la energía y el trabajo— estaba relacionada con las partículas más pequeñas. El calor y la presión de las máquinas de vapor generaban por aquel entonces energía y trabajo. En una máquina de vapor hay muchas partículas pequeñas de vapor de agua que se mueven y hacen surgir la presión, que efectúa trabajo e impulsa a las locomotoras.

Las partículas en el generador de vapor son como los niños y las niñas que juegan en un castillo hinchable. Cuanto más alocadamente saltan por todos lados, con tanta mayor intensidad se meneará el castillo. La presión sobre sus paredes se acrecienta cuanto mayor sea el número de niños y de niñas y cuanto más desenfrenados sean sus saltos. La energía y la velocidad de todos ellos se corresponden con la temperatura en una caldera de vapor. Al final de la fiesta de cumpleaños, los niños y las niñas se han desfogado y su energía disminuye. El castillo hinchable se queda en paz y la caldera de vapor se enfría.

Antes de que se pongan a dar saltos, divido a los niños y a las niñas en dos grupos: al principio, los más apacibles y con camisetas azules están tan solo sentados en el castillo hinchable. Y aquellos con feroces ansias deportivas y ataviados con camisetas rojas se precipitan en él después del disparo de salida; se producen algunos encontronazos intensos, pero sin que llegue a correr la sangre. Al llegar la horda salvaje, el castillo hinchable se tambalea alarmantemente porque todos, casi al mismo tiempo y de manera coordinada, saltan contra la pared posterior. Todavía impera un estado de orden elevado y de baja entropía. Dado que el castillo hinchable está tan lleno de criaturas, también los niños y niñas apacibles se ven obligados a saltar con los demás, porque de lo contrario los echarían afuera, y los de las ansias deportivas

tendrán que saltar un poco más despacio, porque de lo contrario se estarán dando empujones sin cesar con los otros. Los dos grupos se entremezclan, el jaleo se hace más grande y más confuso. Un físico lo describiría de la siguiente manera: el castillo hinchable se halla en un equilibrio térmico y la entropía se incrementa, todo está entremezclado, hay camisetas rojas y azules por todas partes. Si los niños y las niñas se quitaran las camisetas, nadie sabría ya a qué grupo pertenecían originalmente.

Algo similar sucede en una máquina de vapor. Si conecto un generador de vapor de aire caliente con un generador de vapor frío, entonces el aire fluirá del primero al segundo, y de esta manera podré accionar una turbina. Si dejo de calentar, se igualará la temperatura en ambos generadores, las partículas de gas se moverán a la misma velocidad en ambas calderas, el aire ya no fluirá solo en una dirección, y la turbina se detendrá. El sistema se encuentra en equilibrio térmico, todas las partículas están perfectamente entremezcladas. El sistema ordenado —aquí partículas frías; allí, partículas calientes— se ha desordenado, se ha incrementado la entropía: ya no se realiza ningún trabajo. El físico diría que el sistema está termalizado, y con ello querría decir que está completamente entremezclado. Tan solo hay una masa asimilada, cuya única identidad es la temperatura común de todas las partículas.

También podríamos decir que el desorden se incrementa cada vez con mayor intensidad. Esta no es solo una de las experiencias más importantes de los padres y de las madres jóvenes, sino también de la física, pues describe un teorema fundamental de la termodinámica que es válido para todo sistema físico cerrado y para cualquier habitación infantil. Nunca veremos que dos generadores de vapor a igual temperatura se dividan espontáneamente en una caldera caliente y otra fría, o que los bloques de construcción se clasifiquen por sí solos por el color en una habitación infantil. Siempre hay que aplicar primero energía para reducir la entropía. Ordenar requiere esfuerzo, y cuesta energía.

De todas formas, ni siquiera una caja desordenada de bloques de construcción de colores alcanza la máxima entropía posible. Esto no ocurre hasta que todos ellos no estén triturados, descompuestos y finalmente desintegrados por la radiación térmica de la luz. Y eso es incluso peor que cualquier habitación infantil.

De ahí que podemos considerarnos afortunados de que nuestro universo solo tenga algunos miles de millones de años de edad. Si viviéramos en un universo de una edad infinita, sería entonces un lugar con un desorden máximo y completamente arbitrario a pesar de todos los esfuerzos en contra.



No habría ninguna galaxia, ya no habría estrellas, ni partículas, ni más agujeros negros. La luz divergiría hasta el infinito y supuestamente se apagaría. El universo sería tan fascinante como el humo de una vela en el viento del desierto. En este sentido, la finitud del espacio es también, a fin de cuentas, la condición previa de nuestra existencia.

Sin embargo, resulta interesante que el término de entropía aparezca también en la teoría de la información, como ya mostró en 1948 el matemático estadounidense Claude Elwood Shannon; solo hay que reemplazar los juguetes en la habitación infantil o las partículas de gas en la caldera de vapor por letras. Tomemos las páginas de este libro. Si juego al teléfono roto y leo estas líneas a mi vecina, que se las susurra de memoria a la suya, y esta a su vez se las transmite al oído a su vecina, entonces se irán colando tantos más errores cuanto más larga sea la cadena. Un texto que se espera de carácter más o menos informativo se convierte en algún momento en un galimatías incomprensible que ya no contiene ningún tipo de información. Si solo voy suministrando datos y no los corrijo, la pérdida de información y el desorden irán incrementándose constantemente. Una sopa de letras caliente nunca se convertirá en un libro comprensible en un tiempo asumible<sup>[183]</sup>. Para ello se requiere una energía empleada con un objetivo, por ejemplo, en forma de energía solar almacenada en el chocolate que el cerebro del autor necesita para escribir frases con sentido.

El concepto de entropía puede extenderse a los agujeros negros. De hecho, son los igualadores y los aniquiladores de información totales. Según las leyes de Einstein, para una persona que cayera en un agujero negro sería válido el hecho de que toda la información contenida en ella, toda su historia, sus pensamientos, su aspecto y sus recuerdos se reducirían a un número, al guarismo de su peso en el momento en que dejó este universo. Por este motivo, cinco sacos de arena dejarían tras de sí una impresión mayor que el presidente de Estados Unidos.

El sistema entero de un agujero negro está perfectamente definido mediante su masa y su momento angular. En este sentido, estos objetos, a pesar de su monstruosidad, son los más simples y sencillos del universo. Cualquier célula de una lombriz es inmensamente más compleja que un agujero negro.

Si los agujeros negros tienen realmente una temperatura de Hawking, entonces puede demostrarse que la superficie de su horizonte de sucesos es una medida de su entropía. Dado que los agujeros negros en la teoría de Einstein solo pueden volverse más grandes, su entropía solo puede aumentar

también, mientras que la información total, la complejidad absoluta en el universo, tiene que disminuir. Con cada pérdida de un ser humano o de una sola lombriz, el universo pierde siempre también un trocito de su historia. En la Tierra aún permanecerían al menos los restos mortales, pero si desaparecieran en los agujeros negros, la pérdida sería absoluta.

Si Hawking tenía razón, entonces los agujeros negros se desintegrarán en una radiación, de modo que su masa, su tamaño y su entropía volverían a reducirse. Sin embargo, la entropía total del universo no disminuiría, porque la radiación emitida la lleva consigo. Para un ser humano desaparecido en el agujero negro del infierno y reducido a un punto, esto significa que en última instancia se descompondrá en las partes más pequeñas y será irradiado en todas las direcciones del universo. Todos sus pensamientos saldrían de alguna manera, pero estarían arremolinados, sin posibilidad de recuperación, y mezclados con el ruido de fondo cuántico del universo, que los haría inaudibles. Con la imparable expansión del espacio acabarían perdiéndose en la nada.

Por tanto, un agujero negro desintegrado en una forma de radiación sería como una caja volcada de bloques de construcción; un caos terrible. Sin embargo, dado que la entropía total no debe cambiar por esa radiación, esto significa que incluso los agujeros negros ya formaban un completo caos. De hecho, hoy en día casi toda la entropía del universo se encuentra en los agujeros negros<sup>[184]</sup>.

Ahora bien, muchos físicos teóricos no quieren resignarse a esta pérdida de información y hablan de la paradoja de la información de los agujeros negros, pues en la física cuántica es sagrada la conservación de toda información. Solo así queda garantizado que un sistema cuántico se desarrollará según las leyes y será previsible. El estado de una partícula cuántica no perturbada, no medida y no vista en el momento actual está fijado con precisión por su estado anterior<sup>[185]</sup>. Por tanto, el presente y el futuro de una partícula están claramente vinculados uno con otro. Las ecuaciones de la física cuántica son reversibles: podemos recorrerlas hacia delante o hacia atrás y se llega siempre al mismo estado. De todos modos, el estado de una partícula en este campo es siempre tan solo una probabilidad con la que se mide una propiedad con una precisión relativa, pero otra propiedad permanece entonces indeterminada. No todas las propiedades de una partícula son medibles con exactitud, según la relación de indeterminación de Heisenberg, y, a su vez, toda medición de una partícula puede cambiar su estado.

Imaginémoslo como en el tiro con arco: si una buena arquera apunta bien a la diana, podemos estar seguros de que dará en el blanco. Ahora bien, no se puede predecir con exactitud en qué círculo se clavará la flecha, sino solo cierta probabilidad. Solo en cuanto se clava la flecha sabemos la puntuación exacta de ese tiro.

Las partículas cuánticas son como las flechas que vuelan por los aires. Si las medimos, se conducen igual que el impacto de la flecha en la diana. Si miramos atrás, también podremos decir quién disparó la flecha. El problema es reversible; la flecha y la arquera están vinculadas la una a la otra. Por este motivo, la física está en disposición —dentro de ciertas incertidumbres— de realizar predicciones con una impresionante precisión, así como de vincular causas y efectos.

Sin embargo, si los agujeros negros destruyen la información cuántica, entonces también cortan la vía unívoca a través del tiempo. El vuelo de la flecha estaría casi oculto. No sabríamos de dónde viene ni adónde se dirige. De pronto podría clavarse en todas partes, tal vez incluso en los espectadores situados detrás de la arquera. Una fisura en el dogma de la conservación de la información cuestiona la omnipotencia de la física cuántica y la capacidad de predicción de la física en general, lo cual no es cuestión baladí.

Algunos teóricos pensaron que tal vez todas las informaciones cuánticas están almacenadas en el centro del agujero negro, en las cercanías de la singularidad. Ahora bien, toda la información desaparecida alguna vez en el horizonte de sucesos debe permanecer entonces allí hasta la evaporación definitiva del agujero negro. Pero esto tiene poco sentido, pues el almacenamiento de información requiere espacio y energía. Al final, el agujero negro es tan pequeño que simplemente no tiene sitio para almacenar, además, la información de miles de millones de soles.

Otros físicos proponen que la información se queda suspendida en el borde o por debajo del horizonte de sucesos. ¿Puede ser posible que, al atravesarlo, este se agite como una membrana y almacene así la información? ¿Quizá los agujeros negros sean tan solo información almacenada en la superficie? Einstein se retorcería en su tumba por cada una de estas dos hipótesis, porque según su principio de equivalencia, una partícula en caída libre en la gruta oscura no debería darse cuenta de que está atravesando el horizonte de sucesos. Solo al impactar en la singularidad podría empezar a barruntar que algo ha salido mal. En la teoría de la relatividad no hay sitio para la información en el horizonte de sucesos.

A pesar de todo, la mayoría de los físicos parten de la base de que los agujeros negros almacenan información de alguna manera y que la liberan de nuevo en la radiación de desintegración; y que esta contiene incluso un código secreto a partir del cual, por lo menos en teoría, podría leerse su pasado. El mismo Stephen Hawking se adhirió a esta escuela de pensamiento después de sus dudas iniciales y de una apuesta perdida<sup>[186]</sup>. El famoso matemático y pionero de los agujeros negros, Roger Penrose, insiste, en cambio, en que la información se pierde real y definitivamente en los agujeros negros. Después de todo, seguimos sin saber lo que hacen los campos gravitatorios con las partículas cuánticas.

Yo albergo algunas prudentes simpatías por la posición de Penrose. Los agujeros negros son objetos macroscópicos; no se limitan solo a la singularidad, sino que más bien todo el espacio-tiempo curvo es el agujero negro. Lo conforman todas las partículas cuánticas en y ante la singularidad. Ninguna partícula cuántica está aislada, ni permanece sin ser perturbada por las demás. La información se comunitariza<sup>[187]</sup>. ¿Puede seguir hablándose de informaciones y de relaciones individuales en las partículas por separado? Si el espacio no es cuántico, ¿tiene algún sentido argumentar al respecto con principios de la física cuántica? La teoría de este campo es reversible, pero no lo es el universo real macroscópico. Así pues, ¿por qué deberían serlo los agujeros negros? ¿Son tal vez los grandes generadores aleatorios del cosmos?

La física se encuentra inmersa en una crisis de información; sobre este asunto se han escrito muchos libros. Quién se equivoca, ¿la teoría de la relatividad o la física cuántica? Hay muchas opiniones destacables, pero no sabemos cuál es la que apunta al blanco. Sin embargo, una crisis en la física es siempre una oportunidad para una teoría nueva. Los físicos andan en su búsqueda desde hace más de cuarenta años. Hasta el momento los esfuerzos han sido en vano, pues no hay manera de que podamos conciliar la gravedad y la física cuántica. Desarrollar una teoría de la gravitación de los cuantos es una tarea en extremo compleja. La mayoría de los planteamientos tienen ya enormes dificultades a la hora de dejar caer una manzana al suelo.

Y eso que no hay carencia de ideas creativas, sino que falta una clara señal de Dios acerca de cuál de esas ideas es probablemente la correcta. Una de las principales cabezas pensantes en este ámbito, el investigador de la gravedad cuántica residente en Potsdam, Hermann Nicolai, me dijo en una ocasión: «Me parece que con el pensamiento a secas no vamos a avanzar mucho; necesitamos experimentar». ¡Necesitamos una expedición como la de Eddington para la gravedad cuántica!

Por este motivo, la crisis de la física es de índole teórica hasta el momento. Con nuestra imagen del agujero negro no estamos en disposición todavía de confirmar ni de descartar muchas nuevas hipótesis. La teoría de la relatividad es, de momento, todo lo que necesitamos para comprenderla. Si alguna nueva teoría dista en algún tanto por ciento del tamaño y la forma de la sombra, tal vez entonces podamos contemplar realmente sus efectos en algún momento. Si tan solo encontramos desviaciones en el ámbito del tamaño de los objetos cuánticos, es probable que esos efectos permanezcan ocultos para siempre a nuestros ojos.

Mediante la imagen del agujero negro, el problema de la incompatibilidad de ambas teorías se ha vuelto bastante más real y más concreto que antes. Porque si miramos en la oscuridad de la sombra, entonces estamos divisando exactamente el borde del horizonte de sucesos, allí donde la teoría de la relatividad y la física cuántica andan a la greña. El problema de la conciliación de ambas grandes teorías no es de ningún modo abstracto, sino completamente real. Le hemos proporcionado un sitio al que se puede señalar con el dedo. Por tanto, el verdadero secreto de esta imagen no está en su brillante anillo de fuego, sino en su sombra.

### 3

## Omnipotencia y límites

¿ES POSIBLE MEDIRLO TODO?

Una de las imágenes más impresionantes del telescopio espacial Hubble fue tomada en las navidades de 1995. Durante diez días, el telescopio fijó su punto de mira en una manchita del cielo poco llamativa y elegida casi al azar situada un poco por encima del borde delantero de la Osa Mayor, y tomó trescientas cuarenta y dos exposiciones individuales. Una vez montadas para formar una única imagen, dieron como resultado el Campo Profundo del Hubble. En comparación con la inmensidad del espacio, ese encuadre es muy pequeño; como mirar a través del ojo de una aguja que sostuviéramos hacia el cielo con el brazo extendido. La imagen está repleta de manchas de luz grandes y pequeñas, esparcidas sobre la oscuridad del espacio. Si miramos con detenimiento, descubrimos que cada una de esas manchas pequeñas de luz es una galaxia, y hay tres mil en toda la imagen. Para ilustrar el cielo entero, nos harían falta alrededor de veintiséis millones de imágenes del tamaño de un ojo de aguja y alcanzaríamos la cifra de algunos centenares de miles de millones de galaxias. Si pensamos que cada galaxia alberga centenares de miles de millones de estrellas, nuestro universo abarca por lo menos un número de 10<sup>22</sup> estrellas, pero probablemente son muchas más.

Hace más de dos mil quinientos años, cuando el profeta Jeremías quiso expresar un tamaño inconmensurable escribió: «Como no puede ser contado el ejército del cielo, ni la arena del mar se puede medir»<sup>[188]</sup>. A pesar de que a simple vista solo veía unos pocos millares de estrellas, presentía ya algo de la inaprehensible profundidad del espacio. De hecho, hay aproximadamente tantas estrellas en el cielo como granos de arena en las playas de este planeta, si bien su número puede determinarse con mucha menos precisión incluso.

Vivimos una época especial. Aquello que los profetas de antaño solo presentían, nosotros lo percibimos en la actualidad a simple vista. Los telescopios y los satélites nos abren la visión de mundos desconocidos, algo que no le fue concedido a ninguna generación anterior a la nuestra. Como dioses, miramos desde arriba a la Tierra y la vemos flotar como una perla azul sobre el terciopelo negro del espacio. Vemos nubes y tormentas de arena en Marte, gigantescas nubes brillantes de polvo, de las cuales se originan las estrellas jóvenes. Vemos lejanas vías lácteas con centenares de miles de millones de estrellas de todos los colores y el ojo de una aguja en el cielo, repleto de millares de galaxias que solo representan una pequeña fracción de la plenitud que puebla el cosmos. La riqueza de las imágenes procedentes del cosmos sobrepasa todo lo que un ser humano puede asimilar y comprender, y nuestro conocimiento sigue creciendo.

Este es el éxito visible de la ciencia y de la técnica. Es nuestra época, la era de las ciencias experimentales. Todo puede medirse, incluso el ser humano. Donde en otros tiempos ayudaban la intuición, la esperanza y la fe para la toma de decisiones, hoy en día encontramos estudios, mediciones, modelos y bases de datos. Cada decisión debe ser fundamentada y corroborada con datos y modelos. Incluso los científicos de humanidades y los teólogos trabajan hoy en día con métodos informáticos y planteamientos estadísticos tomados de las ciencias experimentales. La tecnología nos tiene por entero en sus manos, y además, ofrece entretenimiento e inspiración. Ya no se juega en el jardín, sino en el ordenador. Dios está domesticado, el ser humano es calculable. ¿Seremos capaces en algún momento de tomar y de fundamentar cada decisión individual de una manera racional y científica, quizá con ayuda de una aplicación?

La física se encuentra en la vanguardia de este desarrollo. Y junto con la astrofísica no solo nos obsequian la belleza del universo, también nos conducen a las grandes cuestiones de la vida. Con nuestros telescopios miramos en retrospectiva a los comienzos del espacio y del tiempo, y exploramos la Gran Explosión. Y ahora observamos incluso en el abismo de los agujeros negros. ¿Quién lo habría creído posible en el pasado? El principio y el final del tiempo se han convertido en imagen, ¿no es este el mayor triunfo de la física? ¿No es esto la culminación de una larga evolución hacia la exploración y comprensión completas del mundo? Investigadores de todos los continentes trabajan juntos para resolver los últimos grandes enigmas de la humanidad. ¿Quién o qué puede detenernos ahora? ¿Qué

secreto puede escapar ya a nuestra mirada, ahora que todo el mundo trabaja en colaboración?

Fue preciso un continente entero para descubrir los bosones de Higgs que nos dan a todos nosotros algo de masa. Fueron precisos observatorios e investigadores de dos continentes para detectar la vibración del espacio-tiempo con detectores de ondas gravitatorias. Y fue preciso todo el mundo para hacer visible, por fin, un agujero negro.

El mundo se apresta al último combate para desentrañar las grandes preguntas de la física y de la vida. ¿Se trata solo de una cuestión de tiempo hasta haber resuelto los últimos enigmas de la naturaleza y poder arrancar del semblante de Dios el velo que lo oculta?

Después de todo, la historia de la ciencia ha mostrado que nuestro horizonte se ha ido ensanchando cada vez más y que han crecido de una manera exponencial el conocimiento y la comprensión. Un país se convirtió en un continente; ese continente, en todo el mundo. El globo terráqueo pasó a ser un sistema solar; el sistema solar pasó a ser toda una galaxia; y esa galaxia se convirtió en todo el universo. En la actualidad, los físicos hablan de un sinnúmero de universos, el multiverso.

El físico alemán Philipp von Jolly entró en los anales de la historia con su comentario de que en la física se había descubierto casi todo. Por este motivo desaconsejó al joven Max Planck a finales del siglo XIX que investigara en física: «Puede que haya todavía en ese o en aquel rincón alguna mota de polvo o alguna burbuja por examinar y clasificar, pero el sistema, como conjunto, se encuentra bastante consolidado», recordaba Planck de su época de bachiller. Sin embargo, no se dejó desanimar y abrió la puerta a la teoría de la relatividad de Einstein y dio el pistoletazo de salida para la física cuántica.

¿Así que esto seguirá de esta guisa? ¿Será realmente así?, me pregunto a mí mismo, y no soy el único<sup>[189]</sup>. Tal vez el gran descubrimiento sea pronto que no podemos descubrirlo todo. Encontrar los límites es también encontrar la humildad.

Precisamente la nueva física se basa en los límites de la comprensión, que se han convertido en una parte fundamental de la física misma. La finitud de la velocidad de la luz en la teoría de la relatividad implica que no podemos saberlo todo, no podemos contar cada estrella del universo, no podemos medirlo todo con precisión y no podemos realizar predicciones perfectas. La teoría cuántica conduce, a través de la relación de indeterminación de Heisenberg, a la constatación de que nada de lo que existe existe,



exactamente. La termodinámica y la teoría del caos llevan a la comprensión de que el futuro es, en realidad y en última instancia, impredecible.

Hasta la fecha, y empleando los métodos más modernos, hemos contado mil millones de las estrellas de nuestra propia galaxia. Esto no es nada comparado con el número real de estrellas en todas las galaxias del espacio. Nunca conseguiremos abarcarlas todas, ni visitarlas siquiera. Son tan solo un eco del pasado. Muchas ya han dejado de existir. Y solo seguimos viendo la luz que nos llega desde tiempos remotos. A causa de la progresiva expansión del universo, nunca podremos alcanzar el 94 por ciento de las galaxias que vemos hoy en día, ni siquiera aunque pudiéramos viajar a la velocidad de la luz<sup>[190]</sup>.

La Gran Explosión y los agujeros negros se han convertido en una realidad científica según todo lo que sabemos hoy y según el criterio actual, pero se han vuelto reales también los límites que ellos nos señalan. Todo lo que se halla detrás, sigue permaneciendo en los dominios de la imaginación y de las matemáticas. No podemos mirar dentro de un agujero negro, ni tampoco podemos acechar más allá de la Gran Explosión.

Como es natural, continuaremos sacudiendo esos límites y buscando puertas hacia lo que hasta ahora es inexplorable, pero no tenemos ninguna garantía de que esas puertas existan. Cualquier ampliación fundamental del horizonte requeriría una revolución radical de toda la física existente. Pero ¿es posible tal cosa? A pesar de las grandes e imponentes frases laudatorias, si miramos en retrospectiva a la ciencia, vemos que esta ha llevado más bien una evolución larga en lugar de muchas revoluciones: Einstein no despreció a Newton, sino que en cierto modo tan solo señaló los límites de su teoría y la integró en una nueva, más completa.

Para desvelar los últimos secretos de la física se precisan esfuerzos comunes por parte del mundo entero. Esto promete todavía muchas décadas emocionantes, pero ¿qué ocurre si hace falta algo más que eso? ¿Instalar un gigantesco interferómetro con docenas de espejos gigantes en el cosmos? ¿Aceleradores de dimensiones planetarias? ¿Es posible pagar eso? ¿Es factible en realidad? Y aunque así fuera, ¿daría respuesta a todos nuestros interrogantes?

Me pregunto a mí mismo: ¿es posible que precisamente el mayor triunfo de las ciencias experimentales signifique también su mayor derrota? Puede que justo en la última lucha por la conquista absoluta y la comprensión completa del mundo nos demos cuenta de que en nuestra altanería desmedida hemos estado persiguiendo un espejismo y de que no nos hemos acercado ni

un solo paso a las grandes cuestiones de la vida mediante las ciencias experimentales.

¿Podría ser que nunca se respondan las grandes preguntas del «de dónde» y «adónde» con ayuda de la tecnología, y que hayamos sucumbido a la locura de la factibilidad? Esto no significa que debemos dejar de formularnos preguntas, sino que deberíamos presentarnos con humildad ante Dios, ante la naturaleza y ante las cuestiones de nuestra existencia.

Seguiremos teniendo muchas alegrías gracias a los grandes esfuerzos de la ciencia, pero en sí mismos no representan ninguna meta de salvación. La ciencia no es la clave absoluta para explicar el universo, sino una celebración de la creatividad y de la curiosidad humanas. Finalmente, es probable que nosotros, los físicos, perdamos el último combate por la respuesta a las grandes preguntas, pero de todas formas merece la pena luchar por encender una luz en la oscuridad.

#### LA NIEBLA DEL TIEMPO

Las ciencias experimentales parecen poseer poderes proféticos, ¡realizan predicciones sorprendentes! Esta característica es una exigencia decisiva para las ciencias experimentales en sí mismas y un logro impresionante para muchas personas. La trayectoria de una esfera, el comportamiento de los materiales, la desviación de la luz al pasar junto al Sol o el aspecto de los agujeros negros pueden predecirse maravillosamente. Hasta las previsiones meteorológicas se han vuelto muy útiles entretanto, e incluso se trabaja a toda máquina en los pronósticos sobre el transcurso de la pandemia. ¿Algún día será todo predecible y entonces ya estará todo fijado en el futuro? Nuestra intuición se opone a este pensamiento, y con razón, por suerte.

Cuando era adolescente, reflexionaba sobre lo que era el tiempo. Me lo imaginaba como un bosque envuelto en una densa niebla por el que yo tenía que caminar sin poder detenerme. Solo Dios ve desde arriba todos los caminos posibles en este bosque neblinoso, ve el pasado y el futuro al mismo tiempo, pero yo solo veo un trozo de mi propio camino delante y detrás de mí. Ante mí, el futuro emerge gradualmente del velo de la incertidumbre; detrás de mí, el pasado se desvanece en la niebla de mis recuerdos. A veces voy deprisa por el bosque y a veces camino despacio; lo único que no puedo hacer

es detenerme. En cada cruce tomo una decisión nueva. De esta manera cambia mi camino y conduce a un nuevo futuro incierto. Otras personas recorren su propia senda por el bosque neblinoso, a veces me las encuentro, a veces caminamos juntos, a veces nos perdemos de vista otra vez.

Pero ¿por qué el camino a través del bosque de niebla solo me permite avanzar y no retroceder? ¿Por qué el tiempo en la vida real solo va hacia delante? ¿Por qué la flecha del tiempo solo señala en una dirección? ¿Y por qué está limitada nuestra mirada al futuro?

En el espacio podemos movernos hacia delante y hacia atrás, a derecha e izquierda, así como abajo y arriba. Y también podemos regresar siempre al mismo lugar. Esto no funciona en el tiempo. Muchas ecuaciones de la física contienen el tiempo como parámetro, y se le puede hacer avanzar y retroceder como en una película. En la vida real no es posible esto, y eso que a veces nos gustaría mucho volver atrás en el tiempo.

Para entender estas cuestiones, tenemos que contemplar todas las áreas de la física juntas: la teoría de lo más pequeño, la física cuántica; la teoría de lo más grande, la de la relatividad; y la teoría de las muchas partículas, la termodinámica.

Lo que está claro es que sin tiempo no hay evolución. El tiempo es una maldición y una bendición a la vez. Le debemos nuestro nacimiento y nuestras experiencias, igual que nuestra decadencia y muerte. Quien tiene tiempo, tiene también un principio y un final. En un universo estático no habría que padecer ni que perder nada, pero tampoco habría nada que experimentar ni que descubrir.

En general, la aparición del tiempo se interpreta en física como una consecuencia de la entropía, de la decadencia imparable. A diferencia de muchas otras leyes de la física, el teorema fundamental de la termodinámica sobre la entropía tiene solo una dirección: que esta aumenta. Exactamente igual que el tiempo. Los procesos se vuelven irreversibles, solo transcurren en una dirección temporal. Si has quemado un libro y has encendido con él una máquina de vapor, de sus cenizas no se originará nunca espontáneamente el mismo libro. En todas partes, allí donde se realiza trabajo, donde se emplea energía, se pierde una pequeña cantidad de esta y se desvanece en forma de desorden creciente. Al vivir, respirar y movernos, consumimos energía y aumentamos la entropía. Así pues, quien vive, solo puede moverse en el tiempo en una dirección.

También la gravedad es una curiosa calle de un solo sentido. Las cargas eléctricas pueden ser positivas o negativas, pueden atraerse o repelerse, los

campos magnéticos tienen un polo norte y un polo sur, solo la gravedad no posee un contrario. La masa atrae invariable y únicamente. Una piedra que lancemos al aire caerá siempre por la influencia en ella del campo gravitatorio de la Tierra y un agujero negro se irá haciendo cada vez más grande mediante la masa.

Sin embargo, es precisamente esta unidireccionalidad la que hace posible la evolución. Si tras la Gran Explosión no hubiera existido ninguna gravedad, el gas y la materia se habrían perdido en el vacío del espacio. Jamás se habrían condensado las estrellas ni los planetas, jamás se habría formado el ser humano. Sin la gravedad, el Sol no ardería, las plantas no vivirían y los seres humanos no comerían. Nuestra existencia se la debemos a la gravedad.

El deprimente principio de que la entropía aumenta siempre, tiene también su variante positiva: mediante el empleo de la energía con un fin concreto, puedo disminuir la entropía en determinados lugares. Con algo de energía puedo ordenar la habitación de los críos; con algo de energía puedo escribir un libro, todo a expensas de la energía total del universo. Solo la flecha del tiempo y de la gravedad permite islas de creatividad en el espacio. La gran pregunta es: ¿de dónde viene toda esa energía originaria? Este sigue siendo uno de los grandes secretos de nuestro universo.

Pero es justo aquello que nos obsequia con la vida, lo que pone límites a nuestro anhelo de omnisciencia. Cuanto mayor es la entropía, menos sé sobre el pasado o el futuro de las partículas individuales. Sé que finalmente un libro se desintegra en cenizas, pero es imposible predecir cómo se distribuirán estas. Por tanto, el transcurso del mundo no es, de modo inherente, determinista, ni está fijado.

Por algunas conversaciones, tengo la impresión de que muchas personas marcadas por las ciencias experimentales siguen teniendo una visión del mundo estrictamente determinista en su corazón, en contra de sus conocimientos. Si se conociera tan solo el estado del mundo con precisión en un momento determinado, el transcurso de todas las cosas estaría fijado a la perfección y sería predecible, incluso previsible. El mundo sería, en efecto, un gran juego de ordenador. Por consiguiente, también el libre albedrío de los seres humanos sería tan solo una ilusión, el resultado de un desarrollo del sistema cuántico establecido finalmente con anterioridad en nuestras neuronas bajo el influjo de la información que asimilamos del entorno. Entonces toda decisión estaría tomada de antemano, y, desde luego, mucho tiempo antes de que hubiera nacido nadie. ¿Decidió la Gran Explosión que yo levantara ahora mi dedo en señal de advertencia?

El mundo no es predecible, ¡y no lo es por principio! Los físicos están muy orgullosos, con razón, de poder calcularlo todo, pero a veces pasan por alto sus propios límites. El determinismo es el unicornio rosa de los físicos: es fascinante en sus sueños, pero no existe en la realidad. Solo existe de forma aproximada en intervalos breves de tiempo y a pequeña escala. Si he colocado unas fichas de dominó a la distancia correcta unas de otras y empujo la primera, está fijado desde un punto de vista determinista que caerá hasta la última ficha. Sin embargo, por principio, no son calculables ni el futuro ni el pasado. La nebulosa del azar nos bloquea la visión clara de la eternidad. En la vida real, las fichas de dominó no caen siempre de la manera que pensamos, por ejemplo si por casualidad entra corriendo el gato de Schrödinger en la habitación.

Mi colega de la Universidad de Leiden, Simon Portegies Zwart, lo demostró de una manera impresionante. Simuló en el ordenador el movimiento de tres agujeros negros no rotatorios y empleó para ello tan solo las leyes clásicas de la gravitación universal de Newton, pero calculadas numéricamente con precisión discrecional. Se trata más o menos del sistema físico más simple que podemos imaginar. Uno esperaría poder calcular la evolución de estos tres sistemas gravitatorios durante cualquier tiempo y con precisión, hacia delante y hacia atrás. En realidad esto no es así, porque durante el intervalo de la edad del universo, el sistema puede cambiar de manera impredecible, si no se conocen las distancias de los agujeros negros con la precisión de una longitud de Planck. Esta representa unos 10-35 metros; es la distancia más pequeña que podemos conocer, muy por debajo del tamaño de cualquier partícula cuántica. Una distancia tan pequeña no puede medirse por principio, ya que en esa dimensión fallan todas las leyes naturales conocidas. Sin embargo, esto significa también que ya en un sistema de tres simples masas puntuales, la evolución se vuelve irreversible e impredecible. A la inversa, tampoco puede buscarse el origen de tales sistemas. No podemos saber dónde tuvieron su comienzo los tres agujeros negros.

Si el equipo de Simon Zwart hubiera calculado un sistema de planetas deformables en lugar de agujeros negros, o si hubieran utilizado las ecuaciones más complicadas de la teoría de la relatividad de Einstein en lugar de las leyes simples de la gravitación universal de Newton, el sistema se habría desarrollado de una manera aún más caótica. Y si tomamos aún más estrellas y agujeros negros, todo se asemeja a un caos total. Debemos

hacernos a la idea de que, en lo fundamental, ¡el universo es imprevisible y caótico!

¿He de añadir tal vez que un ser humano es increíblemente más complejo que un sistema de tres agujeros negros? ¡Seguro que no! Incluso en intervalos breves de tiempo no hay ningún ser humano que sea predecible, como ya saben todos los padres y todas las madres de niñas y de niños pequeños. Así pues, quien sueñe con transferir en algún momento un ser humano a un ordenador y calcular todo detalladamente, mejor debería soñar con unicornios rosas, pues estos no son imposibles, al menos no desde un punto de vista físico. El ser humano está sometido a las leyes naturales, pero en lo más profundo de su fuero interno, ¡es fundamentalmente libre!

Incluso el origen de una decisión en nuestro cerebro, a nivel microscópico, se diluye con rapidez en la nebulosa de la incertidumbre. No obstante, la neblinosa espuma cuántica no toma ninguna decisión por mí. En contra de las afirmaciones de algunos físicos, poseo un libre albedrío y, por tanto, no estoy exento de la responsabilidad de mis actos<sup>[191]</sup>. No puedo delegar en las partículas cuánticas en mi cerebro, que no tienen nada que ver conmigo, para que tomen decisiones arbitrarias por mí, y es que «nosotros» no somos tampoco tan caóticos. No soy solamente los elementos en los que puedo descomponerme, sino también su interacción y su evolución a través del tiempo. De ahí se origina siempre algo nuevo, autónomo, mi Yo<sup>[192]</sup>.

No obstante, lo que sea el Yo sigue siendo en filosofía algo igual de impreciso que la naturaleza del tiempo en la física. Entre mis convicciones está la de que mi Yo no abarca tan solo mi espuma cuántica en el aquí y en el ahora, sino siempre también mi pasado y mi futuro hasta donde alcanza mi horizonte. En mi Yo están reunidos mis pensamientos, mis recuerdos, mi presente, mi esperanza y mi fe. Soy todo eso. Así es posible que mi Yo cambie cuando camino a través de la senda del tiempo, ya que mi horizonte me acompaña con cada paso. Por consiguiente, yo también cambio una y otra vez, sin llegar a ser nunca alguien completamente distinto.

Pero ¿de dónde procede, físicamente, ese jirón de niebla del tiempo, esa incertidumbre en ambas direcciones? El hecho de que no podamos mirar con exactitud hacia delante, ni calcular hacia atrás se debe a que no sabemos ni podemos saber nada en este mundo con absoluta exactitud.

Para conocer algo con precisión absoluta, por ejemplo, tendríamos que medir durante un tiempo infinito, pero esto no es posible en un universo que tiene una edad y un tamaño finitos. En un universo con tiempo no hay nada preciso por principio. Si algo es infinitamente pequeño o infinitamente breve,

habría que emplear una cantidad infinita de energía para medirlo con absoluta precisión. Esto puede demostrarse incluso con las matemáticas y conduce a la famosa relación de indeterminación de Heisenberg<sup>[193]</sup>. Esta dice que nunca pueden conocerse con exactitud todas las propiedades de una partícula cuántica, ¡y por principio lo que no se puede saber con precisión, tampoco existe físicamente de manera precisa!

En este sentido nos engañan las ecuaciones matemáticas que aprendimos en la escuela. Describen una naturaleza que no existe con esa exactitud. Por ello, el físico suizo Nicolas Gisin propuso emplear unas nuevas matemáticas intuitivas que tuvieran en cuenta la inexactitud de los números<sup>[194]</sup>. Solo con el tiempo estos se vuelven más exactos. Para decirlo cargando las tintas: «dos más dos son cuatro» no es del todo cierto hasta después de un tiempo infinitamente largo. Para averiguar, por ejemplo, si una hogaza de pan pesa justo dos kilogramos, tendría que medir durante un tiempo infinito, pero para entonces ya haría mucho tiempo que se habría echado a perder, o alguien ya se la habría comido.

Si la velocidad de la luz fuera infinita, cualquier información procedente del espacio me alcanzaría *ipso facto*, incluso desde una distancia infinita. El universo experimentable no tendría límites y su tamaño sería infinito. Todo estaría conectado siempre de manera simultánea con todo lo demás. Ahora bien, como la velocidad de la luz es finita, no existe ninguna infinitud experimentable en el espacio y en el tiempo, y por ello no existe nunca una exactitud absoluta. Por tanto, la finitud de la velocidad de la luz nos otorga una libertad especial, pues lo único que cuenta siempre es tan solo el aquí y el ahora. Cada lugar tiene su propio presente, su pasado y su futuro. Ahora no puedo saber todavía aquello que habrá de influir en mí mañana, ni siquiera puedo verlo, sino solo esperarlo. En realidad, el futuro no cobra aspecto hasta quizá mañana.

Esta finitud es también la que hace posible nuestra vida. Un universo de una extensión y una edad ilimitadas sería infinitamente arbitrario y eternamente aburrido, según la ley fundamental de la termodinámica. Cuando después de un tiempo casi infinito se apagarán todas las estrellas, se desintegrará toda la materia y cada agujero negro estallara en una radiación, el universo sería un mar vacío y carente de radiaciones de ondas luminosas infinitamente tenues.

Así pues, es el hecho de tener un principio lo que hace que nuestro universo sea tan encantador y tan digno de ser vivido, y como todo el mundo sabe, en todo principio siempre hay una magia inherente. En cuanto al final,

ni siquiera deberíamos temerlo en exceso. En el desarrollo del universo se han producido tantos giros sorprendentes y ha habido tanta creatividad que podríamos esperar cualquier cosa. ¿Por qué no debería perdurar la fuerza creativa que creó un principio?

La vida en nuestro espacio sideral está finamente equilibrada entre la arbitrariedad y la previsibilidad. Ni estamos exentos de las leyes naturales, ni somos sus esclavos. Si contemplamos una partícula individual, el futuro es por completo arbitrario; si miramos muchas partículas a lo largo de un determinado intervalo, vemos que todo transcurre con cierta probabilidad y regularidad. Y si observamos una cantidad enorme de partículas en un intervalo especialmente largo, casi todo es posible para cada partícula individual. La vida humana transcurre en una zona intermedia: es más o menos previsible con posibilidad de oscuridad así como de luz, pero también con la libertad de tomar decisiones nuevas una y otra vez. El bosque neblinoso es una imagen que ilustra muy bien ese estado de la vida humana, me parece a mí.

#### EN EL PRINCIPIO... Y MÁS ALLÁ

Cuando era niño solía quedarme despierto por las noches un buen rato y le daba vueltas a la cabeza. «¿Qué hay en realidad detrás del cielo?», me preguntaba. «Y si hay algo detrás del cielo, ¿qué hay entonces detrás de eso? ¿Y qué hay detrás de lo que está detrás de lo que está detrás del cielo? ¿Está Dios ahí o una infinitud vacía?».

Algunos físicos afirman que plantearse esas preguntas es algo pueril<sup>[195]</sup>. Ahora bien, preguntar de una manera infantil, no significa automáticamente ser pueril. Me gusta seguir teniendo la curiosidad de mi infancia y no dejo de preguntar, no sería capaz de comportarme de otra manera.

Me convertí en un científico para poder ver más lejos, pero mi mirada científica no alcanzará jamás la infinitud. De hecho, esta no puede pensarse ni medirse en realidad, razón por la cual el infinito no es accesible para la ciencia. La infinitud es una abstracción matemática y una especulación metafísica.

En el modelo del universo establecido en la actualidad, nuestra visión de la infinitud acaba en la Gran Explosión. Nuestro tiempo y nuestra historia



comienzan con ese momento, y en ella está escrito todo lo que habrá de ser alguna vez. La Gran Explosión es una exuberancia de energía concentrada<sup>[196]</sup>. Todo lo que vemos hoy en día, toda forma de materia o de energía se remonta en última instancia a esa energía primigenia; nosotros mismos también<sup>[197]</sup>.

Un espacio casi infinitamente pequeño se expandió de repente y creció de manera abrupta en tan solo 10-35 segundos. Surgió un destello primigenio de energía pura y de luz, a partir del cual cristalizó una sopa cuántica con partículas elementales. Se originaron los protones y los electrones, que formaron los componentes de nuestra materia. Al cabo de trescientos ochenta mil años, los protones y los electrones se unieron y formaron el hidrógeno que inunda el cosmos. La materia y la luz se separaron de repente y siguieron sus propios caminos. La materia oscura se concentró bajo el influjo de su propia gravedad: de los restos de la Gran Explosión surgieron oscuras islas en el universo que reunieron el hidrógeno de su entorno. A partir de ahí nacieron las galaxias con estrellas candentes que formaron nuevos elementos, que lanzaron de nuevo al espacio en gigantescas explosiones.

De las cenizas de las primeras estrellas nacieron nuevas estrellas, planetas, lunas y cometas. Comenzaba el ciclo de la vida estelar, y al final nació nuestra Tierra. El agua cayó, se acumuló y, junto con el polvo de estrellas, se formaron las células, los hongos y las plantas. Esta nueva vida cambió el mundo, se formó una atmósfera, las nubes se desgarraron y los animales evolucionaron. El último en surgir fue el ser humano, que pobló y conquistó la Tierra bajo la luz del Sol, la Luna y las estrellas, construyó ciudades, comprendió el mundo, el tiempo y el espacio, y escribió libros al respecto; todo eso a partir del caos de la Gran Explosión.

Es francamente sorprendente el hecho de que nuestro universo funcione. Crear un universo es como realizar un número de circo en la cuerda floja de la física. Si la gravedad fuera mucho más intensa, las estrellas colapsarían en agujeros negros; si fuera más débil, todo se dispersaría y se destruiría debido a la energía oscura. Y si la fuerza electromagnética fuera más potente, las estrellas no podrían irradiar<sup>[198]</sup>. El gran milagro del tiempo es el motivo por el que este engranaje del cosmos está tan bien trabado y nos posibilita la vida. Quien, tras la Gran Explosión, hubiera predicho su origen a partir del caos, le habrían tenido por loco. La materia que de pronto piensa, desarrolla una opinión, una creatividad y una personalidad propias simplemente no está prevista en los libros de texto de la física y, a pesar de todo, aquí estamos.

Una respuesta popular para la explicación de este enigma es que de hecho no existe un solo universo, sino muchos universos que prosperan como las flores en una pradera y después se marchitan, cada uno de ellos de una manera un poco distinta. Por eso es solo una casualidad que vivamos precisamente en este universo que además hace posible la vida, y es que solo somos capaces de ver este universo.

Así pues, ¿seguiremos pensando en algo más grande? ¿Podríamos descubrir pistas de antiguos universos en el nuestro, por ejemplo, amplias estructuras originadas por la colisión de dos universos? Personalmente, sospecho incluso que los agujeros negros hipermasivos son los fósiles mejor conservados de antiguos universos; después de todo, son lo último que podría quedar de un universo como el nuestro. Nada de esto se ha encontrado hasta la fecha. Por el momento no hay ninguna señal de que existan realmente universos paralelos ni de que podamos medirlos.

Tampoco está claro que de la mera existencia de un universo único (muy improbable) pueda colegirse la existencia de muchos otros. Si mi vecino ha sacado los seis números de la lotería, eso no significa, ni de lejos, que haya jugado millones de apuestas<sup>[199]</sup>. Como mucho podemos decir que vivimos por casualidad al lado de todo un suertudo. Si ese hubiera sido el único sorteo que hubiéramos experimentado en la vida y no conociéramos exactamente las reglas por las que se desarrolla ese juego, no podríamos deducir cuántos jugadores de lotería o, en nuestro caso, cuántos universos hay.

Sin esperanzas concretas de obtener pruebas, se plantea la cuestión de si el multiverso es de índole física o si ya es metafísica. No podemos ver el principio a través de la singularidad, ni tampoco podemos echar un vistazo más allá del borde de nuestro propio universo. Incluso si se argumenta que los multiversos son reales y no un sueño, sigue quedando la pregunta: ¿de dónde procede el multiverso? ¡Solo hemos desplazado nuestra ignorancia a la nada de la física!

Stephen Hawking afirmaba que preguntar qué había antes de la Gran Explosión sería tan sensato como preguntar qué hay al norte del Polo Norte. Propuso modelos de universo en los que la coordenada del tiempo no partía nunca del cero<sup>[200]</sup>. Eso me parece un truco de prestidigitación, pues el Polo Norte solo es un problema en un determinado modelo de universo y en un determinado sistema de coordenadas. Quien solo piense en un universo limitado a la superficie de una esfera, no puede responder de hecho a esa pregunta. Sin embargo, puede ir tranquilamente en cualquier dirección más allá del Polo Norte y preguntarse qué hay por encima y por debajo de este.

Otros dicen que el universo surgió espontáneamente de la nada, pero eso depende de cómo se defina la nada. Cada teoría sobre el origen del universo comienza al menos con un conjunto de leyes naturales, con un conjunto de ecuaciones matemáticas y, en la actualidad, la mayoría de las veces con un mar de espuma cuántica difusa, de la que puede surgir espontáneamente un universo nuevo. Ningún cosmos surge de la nada en ninguno de los modelos, y lo mismo ocurre para los multiversos.

«En el principio era el Verbo...» es el primer versículo del Evangelio de Juan y una de las citas más conocidas de la Biblia<sup>[201]</sup>. Al principio de toda ciencia experimental están las reglas por las que funciona el universo y a partir de las cuales se forma un «lenguaje». Pero ¿de dónde viene ese Verbo que estaba en el principio? ¿De dónde vienen las reglas? ¿De dónde viene eso que, con la ayuda de las reglas, se convierte en *algo*?

«Y el Verbo era Dios», dice la segunda parte, decisiva, del versículo. Los seres humanos se preguntan desde hace milenios por la causa primera, y en el círculo cultural judeo-cristiano-islámico se responde a esa pregunta primigenia con «Dios». En primer lugar, «Dios» es tan solo una perífrasis que cada cual tiene que llenar por sí mismo. La pregunta decisiva que se plantea es la siguiente: ¿quién o qué es Dios? Ya la formulación de esta pregunta deja claro que con ella se toca una dimensión que sobrepasa ampliamente la física y sus límites.

No obstante, cualquiera puede decidir por sí mismo que la cuestión de Dios no pertenece a los temas de la física. A título individual puede entenderse una actitud agnóstica semejante, pues cómo se aborde la pregunta acerca del origen y el sentido de la vida sigue siendo una decisión muy personal. No hay por qué formularla, pero se puede.

Ante el trasfondo de cómo ha evolucionado la astrofísica moderna, una actitud agnóstica puede ser absolutamente lógica. La astrología y la astronomía solo se escindieron una de la otra después de un largo proceso desde la Antigüedad hasta la modernidad. A un astrónomo que practicara la astrología hoy en día, sus colegas no lo tomarían en serio como científico. Le echarían en cara una práctica pseudocientífica.

El proceso por el cual la ciencia fue haciéndose cada vez más independiente condujo en la modernidad a la exclusión de las cuestiones religiosas, filosóficas y teológicas en las ciencias experimentales. Esto formaba parte de un proceso de emancipación de la ciencia respecto del dictado de las iglesias y de los filósofos. Ahora bien, esto no significa que deba dejarse de lado la cuestión. La autolimitación a temas no religiosos es el

método de las ciencias experimentales y no tiene por qué ser una respuesta general.

En este sentido, tampoco puede deducirse la inexistencia de Dios en la ciencia solo porque en física no se tolere la cuestión divina. El ateísmo es un convicción legítima, pero no puede fundamentarse científicamente. Refutar a Dios con ayuda de la ciencia me parece ni más ni menos igual de absurdo que el intento de demostrar la existencia de Dios con ayuda de la ciencia.

Los agujeros negros no solo nos muestran que los límites forman parte de nuestro mundo. Quien se atreva a preguntar más allá de los límites de la física, no puede pasar por alto a Dios. Justo porque la naturaleza nos establece límites fundamentales para el conocimiento, nos topamos una y otra vez con ellos y con nuestras preguntas aporreamos las puertas del cielo. Los límites ofrecen también algo de consuelo, pues frenan la arrogancia humana y nos permiten creer y tener esperanza. Pienso que no es posible una física desprovista por completo de Dios si formulamos preguntas hasta el límite del conocimiento humano y más allá. Los seres humanos llevamos esos interrogantes con nosotros, y muy dentro. Preguntar de dónde, adónde y por qué es algo así como un instinto de nuestra alma, que nos tiene ocupados buscando toda la vida. La religión, la filosofía y la ciencia desempeñan sus propios papeles en esa búsqueda. Todo se vuelve difícil cuando una disciplina reclama para sí sola la interpretación entera del universo.

Por tanto, le haría bien a la ciencia aceptar sus límites y participar en un diálogo constructivo, en lugar de alzarse como la única capaz de explicarlo todo. De lo contrario, tendrá que cargar con el lastre de esperanzas y promesas de salvación que no puede cumplir. Considero peligroso satisfacer nuestras necesidades espirituales con la sola ayuda de la ciencia y de la tecnología, incluso para la credibilidad de la misma ciencia.

Ahora bien, ¿vale la pena continuar hablando de Dios? Gracias al progreso de las ciencias experimentales, ¿no ha quedado reducido a segundón, ese a quien nuestro conocimiento ha empujado a un ámbito cada vez más reducido y lejano? Se pone las cosas demasiado fáciles quien afirma que Dios resulta superfluo porque la física moderna ya ha respondido a todas las cuestiones, tal como dijo Stephen Hawking. Yo digo, a la inversa, que Dios es hoy en día más necesario que nunca. Las ciencias experimentales no nos han acercado ni un solo paso a la respuesta de la gran pregunta filosófica de «de dónde venimos», a pesar de que hemos descubierto un increíble número de facetas sobre el desarrollo de la vida y del universo. De la misma manera que no hay más aproximación posible al infinito, tampoco es factible

un mayor acercamiento al origen de todo. En la actualidad sabemos muchísimo más que nunca, pero también sabemos mucho más sobre lo que no podemos saber. La laguna de la ignorancia, que se supone que Dios debe llenar, se ha vuelto más grande y mucho más fundamental que nunca. Abarca el origen del universo entero, posiblemente de muchos de ellos, de todo el universo cuántico subatómico. ¿De dónde ha surgido y adónde conduce? Hemos entendido mejor las reglas de juego del espacio estelar, pero no hemos respondido de dónde vienen ni uno ni las otras. Nadie que se suba a lo alto de nuestra torre babilónica del saber y reclame una victoria universal de la ciencia y tenga a Dios por muerto sería el primero sobre el que Él sonriera con indulgencia desde la lejanía<sup>[202]</sup>.

Por eso, el debate entre la fe y la ciencia me parece como la carrera entre la liebre y el erizo. La liebre, llamada Ciencia, se burla de las patas torcidas de su rival y corre con denuedo por los caminos de este de aquí para allá, solo para constatar que Dios, igual que el astuto erizo, ya estaba allí antes.

Pero entonces ¿es Dios únicamente una abstracción y una proyección humana? Seguramente esto es verdad, pues cualquier idea de Dios es siempre humana y abstracta. Nuestro entendimiento intenta hacer comprensible algo incomprensible, y para ello empleamos también conceptos abstractos. Sin embargo, esto no significa que lo que aparece detrás no exista. Un número complejo es un concepto abstracto en las ecuaciones matemáticas; no obstante, ha conducido a la predicción del positrón, que es muy real y existe de veras.

Las leyes naturales son también, en efecto, constructos humanos abstractos que, sin embargo, describen procesos manifiestamente reales. En rigor, estas solo existen en nuestra mente. Ninguna manzana sabe nada acerca de la ley de gravitación universal de Newton o de la teoría de la relatividad de Einstein, y aun así, cae cada vez, sin importar la altura desde la que se la deja caer. Las leyes de la gravitación universal son reales porque una manzana cae; de la misma manera, Dios, como primera causa, es real porque se ha creado el universo.

Las leyes naturales son descripciones abstractas de la realidad en el lenguaje de las matemáticas. Sin embargo, no describen la realidad entera en detalle. Los sistemas simples la describen con una exactitud asombrosa. Cuanto más compleja se vuelve la naturaleza, más difícil resulta expresarla en matemáticas simples. Toda fórmula matemática, todo programa de ordenador es solo una aproximación a la realidad. Solo la realidad en sí misma es una descripción perfecta de la realidad, solo el espacio sideral es una descripción

perfecta del espacio sideral, solo un ser humano es una descripción perfecta de sí mismo. A pesar de todo, no disponemos de esas descripciones perfectas, de ahí que solo tengamos abiertos muchos pero insuficientes accesos a la realidad, al cosmos y a nosotros mismos como seres humanos.

De la misma manera, solo Dios es una completa descripción de sí mismo. Toda conversación sobre Dios solo puede ser un balbuceo. Todo aquel que piense que sabe exactamente quién es o quién no es Dios obviamente no ha entendido lo que significa él o ella. De ahí que sea señal de una cognición profunda el hecho de que en la Biblia se encuentre un mandamiento a no hacerse ninguna imagen concreta de Dios. Dios no puede abarcarse en ninguna imagen. *Deus semper maior*; Dios es siempre mayor de lo que nos imaginamos que es. Esto vale tanto para el creyente como para el ateo. Me decepciona a veces ver cómo se desfigura a Dios hasta convertirlo en una caricatura para enardecer a las propias huestes, o para burlarse de él. Dios no es ni un monstruo con forma de espagueti, ni un anciano estadounidense blanco sin barba.

Pero ¿tiene algún sentido reflexionar sobre Dios? ¿De qué sirve hablar de Dios, si Dios se encuentra más allá de nuestro horizonte de experiencias? Aunque en última instancia no se pueda investigar el origen del cosmos, sí se puede en todo caso estudiar sus repercusiones. De hecho, los físicos incluso calculan el interior de los agujeros negros, a pesar de que no puede medirse en absoluto.

Gottfried Wilhelm Leibniz introdujo a principios del siglo XVIII una versión muy reducida de Dios, su imagen como maestro relojero. Dios es la primera causa; puso el mundo en movimiento, y desde entonces funciona constante y permanentemente el engranaje perfecto que construyó con maestría. Dios trabajó con tanta perfección que no necesita preocuparse ya más por este universo, pues su mundo es el mejor de todos los mundos posibles. El Dios de Leibniz es el de la Ilustración, que, de forma anónima e imperceptible, continúa embrujando algunas mentes en nuestros días, aun a sabiendas de que el mundo no es perfecto.

De hecho, ni siquiera este Dios relojero carece de consecuencias, pues en el pensamiento de las ciencias experimentales, la ley de causa y efecto ocupa una posición central. Si, para mí, Dios es solo la suma de todas las leyes naturales y de las condiciones que existieron en el origen del universo, entonces esas leyes naturales y esas condiciones iniciales son las que determinan nuestro universo y las que yo mido. Reflejan el principio. La obra y la naturaleza de Dios como maestro relojero, por consiguiente, seguirían

estando presentes en la actualidad y serían medibles. Entonces, la astrofísica es, en cierto modo, una búsqueda de huellas del pasado de este maestro relojero en la luz del presente.

De igual manera, los teólogos se han devanado los sesos desde hace milenios sobre la cuestión de quién o qué es Dios, y andan a la búsqueda de sus huellas en la actualidad. Para mí, a título personal, Dios es más que un relojero. En mi religión, la Biblia da testimonio de un rico tesoro de nombres, encuentros e historias de Dios. Otras religiones conocen relatos divinos comparables. Esas descripciones de Dios surgieron a lo largo de muchas generaciones, a partir de las experiencias alegres y dolorosas, de las preguntas, de los anhelos y de las esperanzas de seres humanos en el trato con este mundo. Todo ello describe una realidad vivida, pero no está escrita en el lenguaje de las matemáticas, sino en el lenguaje de la experiencia, de la poesía, de los sueños, de la amplitud de miras y de la sabiduría.

Preguntarme si me aman o cuánto valgo no me revela el lenguaje de las matemáticas, excepto si yo mismo soy un matemático. Pensar que podría y debería dejar de lado todas esas experiencias humanas simplemente porque comprendo mejor la física que las personas de hace cien años me parece una osadía, casi arrogancia.

Así pues, la búsqueda de Dios continúa siendo actual e importante. Y es que la manera de pensar el principio determina también cómo veré el hoy y el mañana. Del Dios relojero espero regularidad y fiabilidad, pero no un interés en mí o en cualquier otra persona. Ahora bien, si Dios es para mí no solo concepto, sino también persona, es decir, alguien como en las religiones monoteístas, entonces espero que sea alguien frente a mí, alguien de quien pueda y deba esperar algo nuevo hoy y mañana. Dios como alguien frente a mí hace posible los encuentros. En la fe cristiana, la personalidad de Dios se expresa tanto en la entrega de Jesucristo, hijo de seres humanos, como también en la comunidad de los creyentes y en la grandeza de la Creación.

La idea de describir a Dios como una persona podría hacer dudar de mí a los físicos agnósticos o ateos; sin embargo, esa idea es menos insólita de lo que pueda creerse. Es evidente que los protones parecen ser capaces de personalidad, dado que pueden formar a un ser humano. Al parecer, a partir de una Explosión Primigenia, de algo de materia y de algunas leyes naturales, la física consigue generar a seres humanos con conciencia, pensamiento abstracto, sentimientos, humor y con un sentido del destino y de la responsabilidad. Por tanto, la posibilidad de que se originase la vida, el individuo y la personalidad debe de haber estado ya establecida en las leyes

de la Gran Explosión, pero no predeterminada necesariamente. Como es evidente, esa posibilidad no quedó excluida, ¡pues aquí estamos! Parafraseando la intelección fundamental de Descartes «pienso, luego existo», podría decirse también «pienso, luego es posible». Si la materia piensa y siente, ¿por qué un Dios Creador, la Primera Causa, no iba a tener también una personalidad con espíritu, sentidos y mente? Para los físicos que pueden pensar en un cosmos pleno de vida, de posibilidades y de multiversos, un Dios personal no me parece ningún pensamiento irracional; en cualquier caso, es mucho más racional que comprender el universo como una simulación programada de ordenador. Solo por el hecho de que muchos seres humanos crean desde hace miles de años en un Dios personal, esa idea y esa creencia no son descabelladas.

No obstante, la personalidad de Dios se halla fuera del alcance de los detectores físicos. Si la ciencia del cosmos nos ha mostrado lo pequeños que somos, Dios nos dice, en cambio, lo valiosos que somos. La estima no es ninguna magnitud física medible. Debe venir de fuera y ser sentida por dentro. Una declaración de amor no puede entenderse con aceleradores de partículas o con telescopios, excepto quizá si considero todo este maravilloso universo, incluidos sus momentos dolorosos, como una única declaración de amor a nosotros, los seres humanos. Las declaraciones de amor son muy personales: satisfacen a unos, dejan indiferentes a otros. Dos personas que reciben la misma carta suelen leer algo muy diferente en ella. La cuestión de la personalidad de Dios es una experiencia profundamente humana, y debemos hacerla primero nosotros mismos, y no la física por nosotros. No obstante, esas experiencias pueden compartirse y vivirse de una manera similar. Por consiguiente, tampoco son completamente discretivas y aleatorias.

En este sentido, siempre me sorprende que algunas personas me pregunten cómo concilio ciencia y creencia. Y eso que no hago nada diferente de otros muchos científicos, sobre cuyos fundamentos descansa nuestro conocimiento actual. Nicolás Copérnico, Johannes Kepler, Max Planck, Arthur Eddington y muchas personalidades destacadas de la historia de la ciencia eran personas profundamente creyentes. Hoy en día puedo caminar por los pabellones de la Real Academia de Artes y Ciencias de los Países Bajos y debatir con uno sobre las sorpresas de la física cuántica y con otro sobre profundas cuestiones teológicas.

Para mí, las leyes naturales son parte de la Creación, lo mismo que yo. Si una manzana cae en consonancia con las leyes naturales, entonces para mí eso



es física grandiosa, pero también la expresión de un Creador fiable que es el mismo ayer, hoy y en la eternidad. Para otras personas solo cae una manzana.

Además, para mí, Dios no es *algo*, sino *alguien*. Experimento en persona ese lado de Dios en mis propias vivencias, en las vivencias de los seres humanos antes que yo y en los que están conmigo. Lo experimento a solas en la oración, en las celebraciones de la comunidad, en la mirada a Jesús, y en la grandeza y la belleza del cosmos. Cuando levanto la vista al espacio, entonces no estoy mirando solo a la naturaleza, a la inmensidad y a la vida, sino también a lo que hay detrás. La física me muestra nuevas maravillas, pero no me quita la fe, sino que la amplía y la profundiza. Cuando miro al ser humano Jesucristo, descubro el lado humano de la Creación y del Creador. Así encuentro a un Dios que abarca el principio y el fin, a quien ya no puedo ni tengo que demostrar nada más, y con quien me siento en casa.

Sin embargo, así como el escepticismo desempeña un rol importante en el progreso de la ciencia, la duda es también un elemento importante de mi fe. El campo experimental de la fe es la vida, y por tanto, mi vida y mi fe tienen que exponerse también a la crítica. ¡Tal vez dudan tantos hoy en día de las iglesias porque las iglesias dudaron demasiado poco de sí mismas en el pasado! Y es que la naturaleza del universo y la naturaleza de Dios se vuelven cada vez más complejas de lo que pueda comprender nuestro entendimiento limitado. La ciencia sin la autocrítica es curandería; la religión sin la duda es blasfemia; la política sin las incertidumbres es un fraude. No podemos saberlo todo.

Nuestra limitación natural y nuestra ignorancia constituyen también nuestra magia, pues nuestros límites nos convierten en buscadores. Justo las incertidumbres en este universo nos permiten tomar nuevas decisiones y formularnos nuevas preguntas una y otra vez. ¡Qué pocos atractivos tendría una ciencia en la que no hubiera nada más por descubrir! ¿Qué sería una vida sin preguntas, una vida en la que todo estuviera ya calculado de antemano? ¿Qué sería de un Dios en el que no necesitas creer porque piensas que ya lo sabes todo sobre él? También tiene su lado bueno no poder saberlo ni demostrarlo todo. Esta es también una forma de libertad, tal vez incluso su fundamento.

Como es natural, no puedo prohibirle a Dios que en algún momento demuestre su existencia y se me arrebate así mi libertad de creer. ¡Sin embargo, ELLA me decepcionaría profundamente!

Y tal vez la verdadera vocación del ser humano en este universo y mucho más allá sea seguir preguntando y buscando siempre. Esto es lo que nos

diferencia del gran resto del universo. De ahí que los límites del saber sean a la vez una bendición y un desafío. En la naturaleza del horizonte está que no lo sobrepasas nunca, pero siempre lo amplías. Ampliamos nuestros horizontes al avanzar: pensando, cuestionando, dudando, esperando, amando, creyendo.

Al comienzo de este libro embarqué al lector en un viaje al espacio sideral, pasando por la Luna y más allá de los planetas de nuestro sistema solar hacia la Vía Láctea, hacia estrellas extintas y agujeros negros. Ese viaje al universo es una carrera de relevos, en la que generaciones de astrónomos van pasándose el testigo del saber y van descubriendo nuevos espacios. Ese viaje no es para mí ninguna campaña de conquista del saber, sino más bien una peregrinación en la que nuestro espíritu se ensancha. Al final, nos conduce de vuelta a nosotros mismos y a nuestras preguntas sin resolver. Por tanto, va siendo hora de que dejemos de ser arrogantes conquistadores de universos y nos volvamos de nuevo humildes buscadores.

Quien busca siempre lleva en su interior la esperanza de encontrar algo en el camino. Todo buscador es siempre un portador de esperanza también. Cuando mi colega Harald Lesch pronunció la conferencia inaugural por el centenario de la Sociedad Astronómica de Alemania, le preguntaron después sobre la importancia del ser humano y de la fe. Se remitió al apóstol Pablo, quien escribió sobre lo que queda del ser humano: «Y ahora permanecen la fe, la esperanza y el amor, estos tres; pero el mayor de ellos es el amor»<sup>[203]</sup>.

Nosotros, seres humanos, somos solo motas de polvo en una mota de polvo en las inmensidades inconmensurables del cosmos. No podemos hacer que exploten las estrellas, no somos quienes giramos la rueda de las galaxias ni quienes sujetamos el firmamento por encima de nosotros. Sin embargo, sí podemos admirar e indagar el cosmos. En este universo podemos tener fe, esperanza y amor, esto es lo que nos convierte en un polvo de estrellas muy especial.

Si hoy la Tierra desapareciera del sistema solar, si hoy desapareciera el sistema solar de nuestra galaxia, si hoy desapareciera toda nuestra Vía Láctea del cosmos, eso no le importaría lo más mínimo al espacio sideral; no obstante, le faltaría algo muy valioso, esto es, nuestra fe, nuestra esperanza, nuestro amor... y nuestras preguntas, con las que una y otra vez aportamos nueva luz en la oscuridad.

## Agradecimientos

La idea de este libro surgió cuando, tras la publicación de la imagen en abril de 2019, hablé con Jörg Römer, editor de la sección de ciencia de la revista informativa *Der Spiegel*. Me había entrevistado, y posteriormente me acompañó en algunas conferencias. En algún momento fuimos a un restaurante vietnamita de Hamburgo y debatimos sobre los agujeros negros, Dios y el espacio. Él, el periodista crítico; yo, el investigador creyente. Sin embargo, a los dos nos unían la curiosidad y la fascinación por la ciencia.

Nuestra intención era que este libro, que hemos escrito intensamente juntos, fuese como nuestra conversación. Quisimos unir mi pequeña historia personal con la gran historia del descubrimiento del espacio estelar y escribirla de modo que fuese comprensible para todo el mundo. Por este motivo, hemos contado esta historia desde mi perspectiva: experiencias que yo mismo he vivido, y lecciones que he aprendido, algunas anécdotas de la vida de un científico —desde niño curioso hasta catedrático establecido— y de tanto en tanto también algún versículo de la Biblia que me conmueve.

Este libro relata también un trozo de mi vida que no habría sido posible sin el amor, el apoyo y la confabulación de mi familia. Mi maravillosa esposa no es solo la mejor compañera y directora de escuela que uno pueda imaginar, sino que incluso ha corregido este libro. Todos los errores que puedan encontrarse en él son añadidos posteriores.

Con sus comentarios críticos, mis colegas Frank Verbunt (Universidad de Utrecht/Nimega), Gerhard Börner (Universidad de Múnich) y Markus Pössel (Universidad de Heidelberg) nos prestaron a Jörg Römer y a mí unos servicios invaluable como expertos.

Nuestra agente, Annette Brüggemann, contribuyó decisivamente en la realización del libro y ayudó a desarrollar la idea.

Stephan Grünewald, del Instituto *rheingold*, nos ofreció espacio para la planificación. El director editorial Tom Kraushaar y nuestro editor Johannes Czaja, así como los colaboradores y colaboradoras de la editorial Klett-Cotta, nos acompañaron con profesionalidad y mucha entrega.

Por último, doy las gracias a mis colegas por sus trabajos preparatorios y sus colaboraciones, aunque no pueda nombrarlos aquí a todos y a todas. Muchos nombres tuvieron que quedar relegados a las notas, y la elección en ellas es asimismo selectiva e incompleta. Todos los coautores y coautoras de nuestra primera publicación sobre el agujero negro se encuentran a continuación de este agradecimiento, pero tendría que mencionar a muchos más.

Agradezco afectuosamente el cuidadoso trabajo realizado para la edición española del libro. Este agradecimiento especial va dirigido al redactor de mesa Oriol Roca, al traductor Jorge Seca, a la atenta labor de revisión científica y lingüística de María Jesús Domínguez Bello y Lorena Castell García, y a la lectura experta de Eduardo Ros.

Jörg da las gracias a su esposa y a sus dos hijas, que tuvieron que arreglárselas sin él con frecuencia durante el confinamiento por el coronavirus. Además, agradece a su empleador, el semanario *Spiegel*, que hizo posible la realización de este proyecto. Por último, pero no por ello menos importante, amigos y colegas cercanos ayudaron con palabras y hechos.

Una gran parte de mis ingresos como autor serán donados.

Frechen, localidad cercana a Colonia

Diciembre de 2020

HEINO FALCKE

## Los autores del EHT

Kazunori Akiyama, Antxon Alberdi, Walter Alef, Keiichi Asada, Rebecca Azulay, Anne-Kathrin Baczko, David Ball, Mislav Balokovic, John Barrett, Ilse van Bemmelen, Dan Bintley, Lindy Blackburn, Wilfred Boland, Katherine L. Bouman, Geoffrey C. Bower, Michael Bremer, Christiaan D. Brinkerink, Roger Brissenden, Silke Britzen, Dominique Broguiere, Thomas Bronzwaer, Do-Young Byun, John E. Carlstrom, Andrew Chael, Chi-kwan Chan, Shami Chatterjee, Koushik Chatterjee, MingTang Chen, Yongjun Chen (陈勇军), Ilje Cho, Pierre Christian, John E. Conway, James M. Cordes, Geoffrey B. Crew, Yuzhu Cui, Jordy Davelaar, Roger Deane, Jessica Dempsey, Gregory Desvignes, Jason Dexter, Shep Doleman, Ralph P. Eatough, Heino Falcke, Vincent L. Fish, Ed Fomalont, Raquel Fraga-Encinas, Bill Freeman, Per Friberg, Christian M. Fromm, José L. Gómez, Peter Galison, Charles F. Gammie, Roberto García, Olivier Gentaz, Boris Georgiev, Ciriaco Goddi, Roman Gold, Minfeng Gu (顾敏峰), Mark Gurwell, Michael H. Hecht, Ronald Hesper, Luis C. Ho (何子山), Paul Ho, Mareki Honma, Chih-Wei L. Huang, Lei Huang (黄磊), David Hughes, Shiro Ikeda, Makoto Inoue, David James, Buell T. Jannuzi, Michael Janssen, Britton Jeter, Wu Jiang (江悟), Michael D. Johnson, Svetlana Jorstad, Taehyun Jung, Mansour Karami, Ramesh Karuppusamy, Tomohisa Kawashima, Mark Kettenis, Jae-Young Kim, Junhan Kim, Jongsoo Kim, Motoki Kino, Jun Yi Koay, Patrick, M. Koch, Shoko Koyama, Michael Kramer, Carsten Kramer, Thomas P. Krichbaum, Cheng-Yu Kuo, Huib Jan van Langevelde, Tod R. Lauer, YanRong Li (李言荣), Zhiyuan Li (李志远), Michael Lindqvist, Kuo Liu, Elisabetta Liuzzo, Wen-Ping Lo, Andrei P. Lobanov, Laurent Loinard, Colin Lonsdale, Ru-Sen Lu (路如森), Nicholas R. MacDonald, Jirong Mao (毛基荣), Sera Markoff, Daniel P. Marrone, Alan P. Marscher, Iván Martí-Vidal, Satoki Matsushita, Lynn D. Matthews, Lia Medeiros, Karl M. Menten,

Yosuke Mizuno, Izumi Mizuno, James M. Moran, Kotaro Moriyama, Monika Moscibrodzka, Cornelia Müller, Hiroshi Nagai, Masanori Nakamura, Ramesh Narayan, Gopal Narayanan, Iniyan Natarajan, Roberto Neri, Chunchong Ni, Aristeidis Noutsos, Hiroki Okino, Héctor Olivares, Tomoaki Oyama, Feryal Ozel, Daniel Palumbo, Harriet Parsons, Nimesh Patel, Ue-Li Pen, Dominic W. Pesce, Vincent Piétu, Richard Plambeck, Aleksandar PopStefanija, Oliver Porth, Ben Prather, Jorge A. Preciado López, Dimitrios Psaltis, Hung-Yi Pu, Ramprasad Rao, Mark G. Rawlings, Alexander W. Raymond, Luciano Rezzolla, Bart Ripperda, Freek Roelofs, Alan Rogers, Eduardo Ros, Mel Rose, Arash Roshanineshat, Daniel R. van Rossum, Helge Rottmann, Alan L. Roy, Chet Ruzszyk, Benjamin R. Ryan, Kazi L.J. Rygl, Salvador Sánchez, David Sánchez Arguelles, Mahito Sasada, Tuomas Savolainen, F. Peter Schloerb, KarlFriedrich Schuster, Lijing Shao, Zhiqiang Shen (沈志强), Des Small, Bong Won Sohn, Jason SooHoo, Fumie Tazaki, Paul Tiede, Michael Titus, Kenji Toma, Pablo Torne, Tyler Trent, Sascha Trippe, Shuichiro Tsuda, Jan Wagner, John Wardle, Jonathan Weintraub, Norbert Wex, Robert Wharton, Maciek Wielgus, George N. Wong, Qingwen Wu (吴庆文), Ken Young, André Young, Ziri Younsi, Feng Yuan (袁峰), Ye-Fei Yuan (袁业飞), J. Anton Zensus, Guangyao Zhao, ShanShan Zhao, Ziyang Zhu.

Juan-Carlos Algaba, Alexander Allardi, Rodrigo Amestica, Jady N Anczarski, Uwe Bach, Frederick K. Baganoff, Christopher Beaudoin, Bradford A. Benson, Ryan Berthold, Ray Blundell, Sandra Bustamente, Roger Cappallo, Edgar Castillo-Domínguez, Richard Chamberlin, ChihCheng Chang, Shu-Hao Chang, Song-Chu Chang, Chung-Chen Chen, Ryan Chilson, Tim Chuter, Rodrigo Córdova Rosado, Iain M. Coulson, Thomas M. Crawford, Joseph Crowley, John David, Mark Derome, Matthew Dexter, Sven Dornbusch, Kevin A. Dudevóir (fallecido), Sergio A. Dzib, Andreas Eckart, Chris Eckert, Neal R. Erickson, Aaron Faber, Joseph R. Farah, Vernon Fath, Thomas W. Folkers, David C. Forbes, Robert Freund, Arturo I. Gómez-Ruiz, David M. Gale, Feng Gao, Gertie Geertsema, David A. Graham, Christopher H. Greer, Ronald Grosslein, Frédéric Gueth, Daryl Haggard, Nils W. Halverson, Chih-Chiang Han, Kuo-Chang Han, Jinchi Hao, Yutaka Hasegawa, Jason W. Henning, Antonio Hernández-Gómez, Rubén Herrero-Illana, Stefan Heyminck, Akihiko Hirota, Jim Hoge, Yau-De Huang, C.M. Violette Impellizzeri, Homin Jiang, Atish Kamble, Ryan Keisler, Kimihiro Kimura, Derek Kubo, John Kuroda, Richard Lacasse, Robert A. Laing, Erik M. Leitch, Chao-Te Li, Lupin C.-C. Lin, Ching-Tang Liu,

Kuan-Yu Liu, Li-Ming Lu, Ralph G. Marson, Pierre, L. Martin-Cocher, Kyle D. Massingill, Callie Matulonis, Martin P. McColl, Stephen R. McWhirter, Hugo Messias, Zheng Meyer-Zhao, Daniel Michalik, Alfredo Montaña, William Montgomerie, Matias Mora-Klein, Dirk Muders, Andrew Nadolski, Santiago Navarro, Chi H. Nguyen, Hiroaki Nishioka, Timothy Norton, Michael A. Nowak, George Nystrom, Hideo Ogawa, Peter Oshiro, Harriet Parsons, Scott N. Paine, Juan Peñalver, Neil M. Phillips, Michael Poirier, Nicolas Pradel, Rurik A. Primiani, Philippe A. Raffin, Alexandra S. Rahlin, George Reiland, Christopher Risacher, Ignacio Ruiz, Alejandro F. Sáez-Madaín, Remi Sassella, Pim Schellart, Paul Shaw, Kevin M. Silva, Hotaka Shiokawa, David R. Smith, William Snow, Kamal Souccar, Don Sousa, Ranjani Srinivasan, William Stahm, Anthony A. Stark, Kyle Story, Sjoerd T. Timmer, Laura Vertatschitsch, Craig Walther, Ta-Shun Wei, Nathan Whitehorn, Alan R. Whitney, David P. Woody, Jan G.A. Wouterloot, Melvyn Wright, Paul Yamaguchi, Chen-Yu Yu, Milagros Zeballos, Lucy Ziurys.

## Glosario

AAS (American Astronomical Society - Sociedad Astronómica Estadounidense): sociedad especializada que publica dos importantes revistas astronómicas.

agujero blanco: zona hipotética del espacio-tiempo que representa lo contrario que un agujero negro, pues expulsa masa en lugar de engullirla.

agujero de gusano (puente de Einstein-Rosen): hipotética entidad física que podría conectar dos zonas muy alejadas del espacio-tiempo. Este «túnel» es un resultado teórico de la teoría general de la relatividad.

agujero negro: objeto en el espacio sideral, cuya masa se concentra en un punto diminuto. A su alrededor la gravedad es tan potente que ni siquiera la luz puede escapar de ella. Los agujeros negros se originan durante el colapso de las estrellas muy masivas, después de una supernova o en los centros de las galaxias, donde pueden ser miles de millones de veces más pesados que el Sol y pasan por ser «supermasivos».

ALMA (Atacama Large Millimeter Array): el mayor telescopio en frecuencias milimétricas y submilimétricas. Conjunto de sesenta y seis antenas de radio ubicadas en el desierto chileno de Atacama, a 5000 m de altitud.

año luz: distancia que recorre la luz en el vacío en un año:  $1 \text{ al} = 0,307 \text{ pársec} = 9,46047 \times 10^{12} \text{ km}$ .

APEX (Atacama Pathfinder Experiment - Experimento Pionero de Atacama): radiotelescopio de doce metros, en Chile, cercano al telescopio ALMA.



arcosegundo: medida angular. Un círculo puede dividirse en 0,77 millones de arcosegundos. Tiene  $360^\circ$ , cada grado  $60'$  (arcominutos), cada arcominuto  $60''$  (arcosegundos). Se emplea en la astronomía para determinar distancias transversales o expansiones en el cielo.

átomos: componentes de la materia que forman los elementos. Los átomos se componen de pesados protones de carga positiva y neutrones en el núcleo, y de uno o varios orbitales ligeros de electrones, con carga negativa.

centro galáctico: centro de la Vía Láctea, a una distancia de veintisiete mil años luz de la Tierra.

CNSA (China National Space Administration - Administración Espacial Nacional China): esta agencia estatal china para el espacio sideral es responsable únicamente de los satélites y de las sondas espaciales, pero no de los vuelos espaciales tripulados.

cuásar (radiofuente cuasiestelar): núcleos galácticos activos (agujeros negros) de galaxias muy distantes que emiten muchísima radiación y que son conocidos por su luminosidad.

cúmulos globulares: en su mayoría son antiguas aglomeraciones de forma esférica de hasta cien mil estrellas unidas gravitacionalmente, y que orbitan en torno a las galaxias.

desplazamiento al rojo: debido a la expansión del universo y al movimiento rápido de las galaxias al alejarse de nosotros, la luz tiene un corrimiento hacia longitudes de onda más larga (más roja), véase *efecto Doppler*. Incluso la luz del borde de un agujero negro sufre un desplazamiento al rojo debido a la intensa curvatura del espacio-tiempo.

disco de acreción: disco de gas en rotación en torno a un objeto de gran masa que atrae al centro, como un remolino, los campos magnéticos y la materia (plasma, gas o polvo).

efecto Doppler: describe el desplazamiento de colores, o frecuencias de la luz, a causa del movimiento relativo de dos objetos. En astronomía podemos medir así los movimientos a lo largo de la línea de visión.

EHT (Event Horizon Telescope - Telescopio del Horizonte de Sucesos): red VLBI global de radiotelescopios de ondas milimétricas que ha tomado la primera imagen de un agujero negro.

enana blanca: tras la extinción de la fusión nuclear, la mayoría de las estrellas envejecidas terminan como esferas cristalinas compactas, del tamaño de la Tierra, con aproximadamente una masa solar. Al principio están muy calientes y brillan candentes entre el blanco y el azul, pero se enfrían al cabo de extensos intervalos de tiempo.

energía oscura: hasta la fecha se trata de un misterioso efecto de presión que se cree que conduce a una expansión acelerada del universo. Aproximadamente el 70 por ciento de la energía total del universo es en la actualidad energía oscura.

entropía: medida del desorden de un sistema. La entropía solo puede aumentar sin la adición de energía.

ERC (European Research Council - Consejo Europeo de Investigación): el Consejo Europeo de Investigación de la Unión Europea financia la investigación fundamental de científicos de excelencia.

ESA (European Space Agency - Agencia Espacial Europea): la Agencia Espacial Europea construye telescopios espaciales y gestiona satélites.

ESO (European Southern Observatory - Observatorio Europeo Austral): el Observatorio Europeo Austral gestiona telescopios ópticos en Chile, como el VLT y el Observatorio La Silla, y participa también en el ALMA y en el APEX.

espectroscopia: un método de medición de la luz, en el que esta se descompone en sus colores (su espectro). En física cuántica, los átomos absorben o emiten luz en estrechas gamas de colores, y de esta manera pueden ser identificados. Las velocidades radiales pueden ser medidas a través del corrimiento al rojo y del efecto Doppler.

Estación Espacial Internacional: esta es la única estación espacial permanentemente tripulada en el espacio, y orbita alrededor de la Tierra a cuatrocientos kilómetros de altura.

estrella: bola caliente de gas que genera energía a través de la fusión nuclear. Por consiguiente, el Sol es también una estrella. Cuanto más grande y más masiva sea una estrella, más caliente será y más breve la duración de su vida.

estrella binaria: sistema de dos estrellas que orbitan entre sí. En la Vía Láctea, una de cada dos estrellas se encuentra en un sistema binario o múltiple. Cuando una de ellas colapsa en un agujero negro, puede comenzar a

devorar poco a poco a la otra y generar rayos X en el proceso (lo que llamaríamos una binaria de rayos X).

estrella de neutrones: estrella colapsada y ultracompacta que tiene una masa aproximada a la del Sol, pero que solo tiene unos veinte o veinticinco kilómetros de diámetro y está compuesta por neutrones (véase *átomos*). Está al final de la evolución de muchas estrellas masivas.

estrellas variables Cefeidas: estrellas que pulsan en periodos de uno a cien días. Cuanto más brillantes son, más lentamente pulsan. Si medimos su periodo de pulso, podemos deducir su verdadera luminosidad y colegir su distancia por la comparación con la luminosidad medida. Cuanto más lejos está una estrella, más débil se nos aparece.

exoplaneta: planeta que orbita en torno a una estrella diferente del Sol.

física cuántica: describe sistemas físicos en los cuales algunos estados solo pueden adoptar unos valores determinados (discretos/cuantizados), principalmente de las partículas elementales más pequeñas.

fotones: partículas de luz de la radiación electromagnética. La luz de todas las longitudes de onda puede ser onda y partícula a la vez.

fuerza gravitatoria: fuerza mutua de atracción de las masas. Descrita en la teoría general de la relatividad por la deformación del espacio-tiempo.

fusión nuclear: las estrellas generan energía mediante la fusión de los núcleos atómicos, principalmente de hidrógeno a helio.

Gaia: sonda espacial y telescopio espacial de la ESA para la cartografía de las estrellas de nuestra Vía Láctea.

galaxia: sistema de cientos de miles de millones de estrellas, planetas y nebulosas que están unidas gravitacionalmente y que orbitan alrededor de un centro. Nuestra galaxia natal es la Vía Láctea.

gigante roja: estrella inflada y envejecida, en la cual la fusión nuclear solo se produce en una capa alrededor del núcleo. La estrella se infla y emite una luz rojiza.

GPS (Global Positioning System - Sistema de Posicionamiento Global): red de satélites para la determinación de una posición en la Tierra.

Gran Explosión (Big Bang): principio de nuestro universo, en el que la materia y la energía surgieron de un punto diminuto. Conforme al modelo habitual de los cosmólogos, esto sucedió hace aproximadamente trece mil ochocientos millones de años. El universo se está expandiendo desde entonces.

**GRAVITY:** interferómetro del ESO que conecta los cuatro telescopios del VLT y realiza imágenes de elevada resolución en infrarrojo cercano, por ejemplo, de las estrellas situadas en el centro galáctico.

**GRMHD** (General Relativistic Magnetohydrodynamics - magnetohidrodinámica general-relativista): cálculos de simulaciones de los movimientos de gases con campos magnéticos alrededor de agujeros negros.

**horizonte de sucesos:** límite invisible en las proximidades de un agujero negro a partir del cual la materia, la radiación y toda información cae, sin recuperación posible, en el interior de este.

**interferometría:** técnica de superposición de ondas. En la radioastronomía, las ondas de radio de diferentes telescopios pueden unirse y obtener imágenes a partir de los patrones de interferencia (véase *VLBI*, *radiointerferometría*).

**IRAM** (Instituto de Radioastronomía Milimétrica): colaboración francogermano-española. Gestiona el telescopio NOEMA en Francia (2600 m de altitud) y el telescopio de treinta metros en el pico Veleta (2920 m de altitud) en España; los dos pertenecen al EHT.

**JCMT** (Telescopio James Clerk Maxwell): radiotelescopio submilimétrico ubicado en Hawái, que pertenece al EHT.

**jet:** chorro de plasma caliente concentrado que es expulsado al exterior por algunos objetos cósmicos a través de campos magnéticos. En el caso de los agujeros negros supermasivos, se expulsa casi a la velocidad de la luz hasta alcanzar varios millones de años luz en el espacio sideral.

**lente gravitatoria:** el efecto de una lente gravitatoria, según la teoría general de la relatividad, aparece cuando la luz se desvía por el influjo de una gran masa. Por ejemplo, cuando los rayos de luz, en su camino hacia la Tierra, pasan por un objeto de gran masa, como galaxias, estrellas o un agujero negro; los rayos no pasan en línea recta, sino que se desvían y se tuercen. En ese proceso pueden aparecer efectos similares a los de una lente óptica de cristal, lo cual permite sacar conclusiones sobre la forma y la masa de la lente gravitatoria.

**ley de Hubble-Lemaître:** enuncia que cuanto más lejos están las galaxias de nosotros, más rápido se alejan, a causa de la expansión del universo. Puede emplearse en combinación con el desplazamiento al rojo y con la espectroscopia para la medición de las distancias en el espacio.

LMT (Large Millimeter Telescope - Gran Telescopio Milimétrico): radiotelescopio de cincuenta metros ubicado en México, a 4593 m de altitud, sobre el volcán Sierra Negra; pertenece al EHT.

LOFAR (Low Frequency Array - Red Interferométrica de Baja Frecuencia): red europea de radiointerferometría compuesta por treinta mil antenas de radio de baja frecuencia, que busca señales de la fase temprana del universo. El centro está ubicado en los Países Bajos.

masa solar: equivale a  $2 \times 10^{30}$  kg. Unidad de medida de la masa en astronomía.

materia oscura: una forma desconocida de la materia, cuya existencia solo se deduce a partir de su efecto gravitacional en el universo. Se cree que alrededor del 85 por ciento de la masa total del universo se compone de materia oscura.

Messier 87 (M87): galaxia gigante de forma elíptica a una distancia de cincuenta y cinco millones de años luz de la Tierra. El agujero negro supermasivo en su centro es el primero del que los astrónomos del EHT han sido capaces de realizar una imagen. Fue catalogado por Charles Messier.

MIT (Massachusetts Institute of Technology - Instituto Tecnológico de Massachusetts): universidad técnica de renombre, cercana a Boston, Massachusetts.

NASA (National Aeronautics and Space Administration - Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio): agencia espacial de Estados Unidos.

NSF (National Science Foundation - Fundación Nacional para la Ciencia): autoridad estadounidense para la financiación de proyectos de investigación.

núcleo activo de galaxia: son la región central de una galaxia que emite grandes cantidades de radiación. Este fenómeno se explica mediante los agujeros negros supermasivos.

Observatorio Astrofísico Smithsonian: institución de investigación astronómica en Cambridge, Massachusetts.

Observatorio Haystack: radiobservatorio del MIT en Westford (Massachusetts).

Observatorio Nacional de Radioastronomía (NRAO): institución investigadora estadounidense que (co)gestiona diferentes radiotelescopios, entre ellos el ALMA, el VLA y el VLBA.

ondas electromagnéticas: radiación carente de masa que se mueve por el espacio sideral vacío a la velocidad de la luz. Entre ellas se cuentan la luz visible, la radiación infrarroja y la radiación térmica, pero también las microondas y las ondas de radio, así como los rayos X y los rayos gamma.

ondas milimétricas: ondas de radio de frecuencia extremadamente alta en el intervalo de aproximadamente 43 GHz y 300 GHz, con una longitud de onda de milímetros.

paralaje: efecto de un aparente desplazamiento de la posición de un cuerpo celeste cuando este es contemplado desde dos ubicaciones diferentes. Con ayuda del paralaje y de la unidad astronómica puede medirse la distancia a las estrellas.

pársec (paralaje de un arcosegundo): medida astronómica de longitud que corresponde aproximadamente a 3,26 años luz o a 206 000 unidades astronómicas. Su origen está en la medición de distancias por medio de paralajes estelares.

planeta: objeto de forma esférica compuesto por gas o roca, que orbita alrededor del Sol sin grandes perturbaciones. No genera ninguna radiación propia a partir de una fusión nuclear, sino que solo refleja la luz del Sol. Nuestro sistema solar tiene ocho planetas (Mercurio, Venus, Tierra, Marte, Júpiter, Saturno, Urano, Neptuno). Los planetas que orbitan otras estrellas se denominan exoplanetas.

plasma: gas ultracaliente compuesto de protones y de electrones, en el que los átomos se separan en elementos individuales.

protoestrella: estrella joven en fase de nacimiento.

púlsar: estrella de neutrones de rotación rápida que emite ondas de radio y parpadea regularmente como un faro.

radiación de cuerpo negro (ley de Planck): radiación universal que cualquier cuerpo opaco emite y que solo depende de la temperatura y del tamaño del objeto. De esta manera irradian las estrellas y la radiación cósmica de microondas.

radiación de fondo de microondas: radiación de cuerpo negro procedente de la fase temprana del universo, cuando se volvió transparente. Puede verse en el cielo en todas direcciones en el intervalo entre ondas de radio y microondas. Tuvo lugar aproximadamente unos trescientos ochenta mil años después de la Gran Explosión.

radiación de Hawking: hasta la fecha se trata del modelo experimental no confirmado del físico Stephen Hawking, según el cual los agujeros negros podrían evaporarse lentamente por los efectos cuánticos.

radiación de sincrotrón: radiación electromagnética generada por la desviación de electrones con una velocidad cercana a la luz (véase *átomos*) en un campo magnético. Así se explica la emisión de radio de los agujeros negros.

radiointerferómetro: unión de radiotelescopios que observan los mismos cuerpos celestes de manera sincronizada y que alcanzan una resolución equivalente a un telescopio del tamaño de esa distancia (véase *Interferometría, VLBI, ALMA, VLBA, IRAM, LOFAR*).

Radiotelescopio Effelsberg: radiotelescopio de cien metros en la región volcánica de Eifel, que es gestionado por el Instituto Max Planck de Radioastronomía en Bonn.

Sagitario A\* (Sgr A\*): radiofuente compacta en el centro galáctico; probablemente marca el agujero negro supermasivo de nuestra Vía Láctea, tiene cuatro millones de masas solares y está a una distancia de veintisiete mil años luz.

SETI (Search for Extraterrestrial Intelligence - Búsqueda de Inteligencia Extraterrestre): término general para los programas que desde los años sesenta intentan detectar vida extraterrestre en el espacio.

singularidad: es la ubicación detrás del horizonte de sucesos de un agujero negro, donde la curvatura del espacio-tiempo es infinita y la masa se concentra. Con la singularidad de la Gran Explosión se describe el nacimiento del espacio.

SMA (Submillimeter Array - matriz submilimétrica): interferómetro compuesto por ocho radiotelescopios que forma parte de la red EHT. Está ubicado sobre el volcán inactivo Mauna Kea en Hawái, a 4115 metros de altitud.

SMT (Submillimeter-Telescope - telescopio submilimétrico): radiotelescopio en el monte Graham de Arizona, a 3159 metros de altitud, que forma parte de la red EHT.

Sociedad Max Planck para la Promoción de la Ciencia: gran institución alemana de investigación puntera, con institutos en muchos ámbitos científicos.

supernova: la explosión extremadamente brillante de una estrella masiva al final de su vida.

Telescopio de Tecnología Avanzada del Vaticano: telescopio óptico del Observatorio del Vaticano en el monte Graham.

Telescopio Espacial Hubble: potente sonda espacial de la NASA y de la ESA, que ha observado el espacio desde los intervalos de infrarrojos, pasando por la luz visible, hasta llegar a la radiación ultravioleta.

Telescopio Groenlandia: es un radiotelescopio de doce metros ubicado en Groenlandia y forma parte del EHT, así como de la VLBI.

Telescopio Polo Sur: este radiotelescopio de diez metros, ubicado en la estación polar Amundsen-Scott, en la región antártica, pertenece a la red EHT y se halla a 2817 metros de altitud.

teoría especial de la relatividad: teoría de la relatividad de Albert Einstein que describe el cambio del tiempo y de las longitudes a causa de los movimientos relativos. Al contrario que la teoría general de la relatividad, no tiene en cuenta la fuerza gravitatoria, y esos cambios son importantes a velocidades cercanas a la velocidad de la luz.

teoría general de la relatividad: teoría de Albert Einstein que describe la relación entre espacio, tiempo y gravedad. La masa curva el espacio, y el espacio curvo determina el movimiento de la masa y el transcurso del tiempo.

transformada de Fourier: operación matemática que convierte las ondas en sus frecuencias, y viceversa. Se emplea en la radiointerferometría para la generación de imágenes porque miden «fotogramas por segundo».

tránsito de Venus: paso del planeta Venus por delante del Sol. Gracias a las mediciones de este fenómeno pudo calcularse la distancia de la Tierra al Sol (véase *unidad astronómica*).

unidad astronómica: distancia media de la Tierra al Sol. Unidad de medida de la astronomía. Equivale a 149 597 870,700 km.



Universidad Radboud: universidad en Nimega, fundada en 1925 como universidad católica en el este de los Países Bajos.

velocidad de la luz: equivale a 299 792,458 km/s. Es siempre constante. Ni la información, ni la materia pueden transportarse a una velocidad mayor que la luz.

Vía Láctea: nuestra propia galaxia con forma de disco y estructura espiral. Está compuesta por entre doscientos y cuatrocientos mil millones de estrellas. El Sol completa una órbita alrededor del centro de la Vía Láctea en doscientos millones de años.

VLA (Observatorio Astronómico Very Large Array): radiointerferómetro compuesto por veintisiete radiotelescopios de veinticinco metros, ubicado en Nuevo México con una distancia de hasta casi treinta y seis kilómetros.

VLBA (Very Long Baseline Array): red VLBI en Estados Unidos, compuesta por diez antenas de veinticinco metros, con una distancia de hasta ocho mil seiscientos metros. En Europa existe la Red VLBI Europea.

VLBI (Very Long Baseline Interferometry - interferometría de muy larga base): método de medición de interferometría, en el que se interconectan radiotelescopios muy distantes entre sí y que observan simultáneamente una radiofuente. La imagen real se origina después en el ordenador.

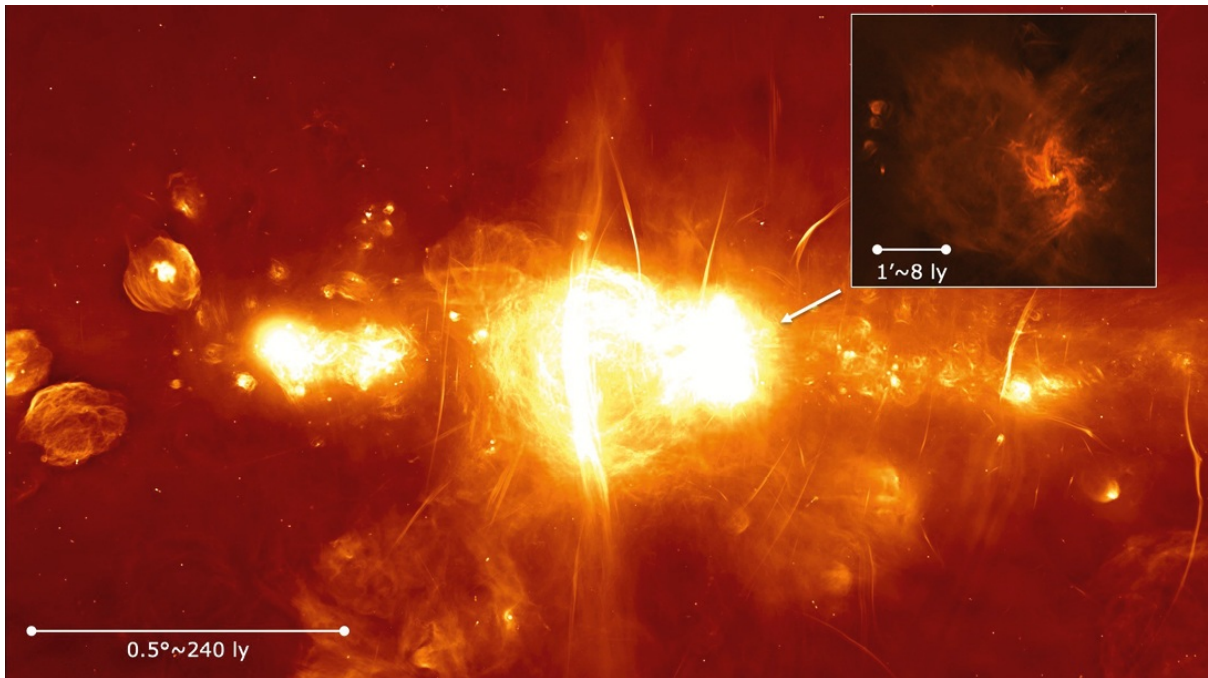
VLT (Very Large Telescope): observatorio con cuatro telescopios individuales de ocho metros, del ESO, en el Cerro Paranal de Chile, a 2850 metros de altitud.

Más detalles sobre otros términos astronómicos, en:

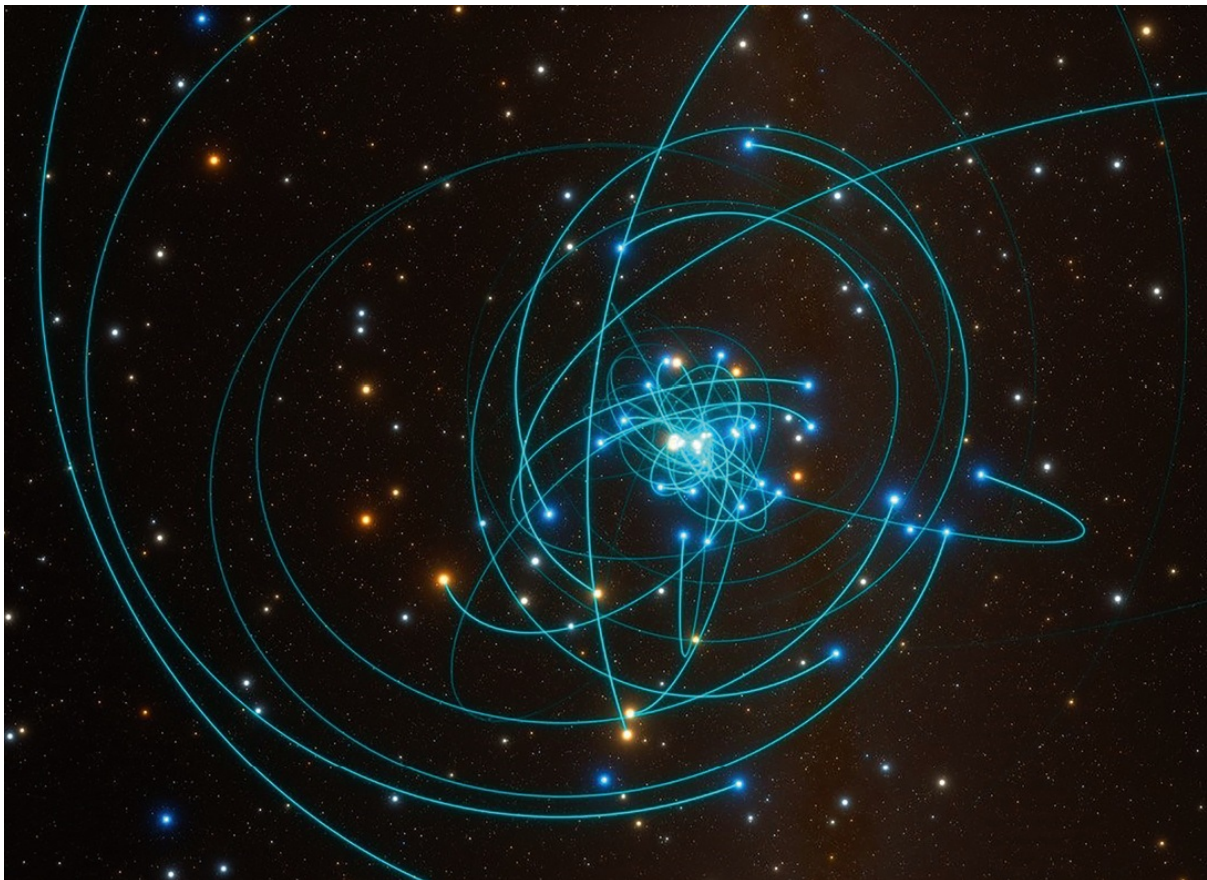
<<https://www.spektrum.de/lexikon/astronomie/>> y <<https://www.einstein-online.info/>> (en la pestaña *Nützliches/Lexikon*).



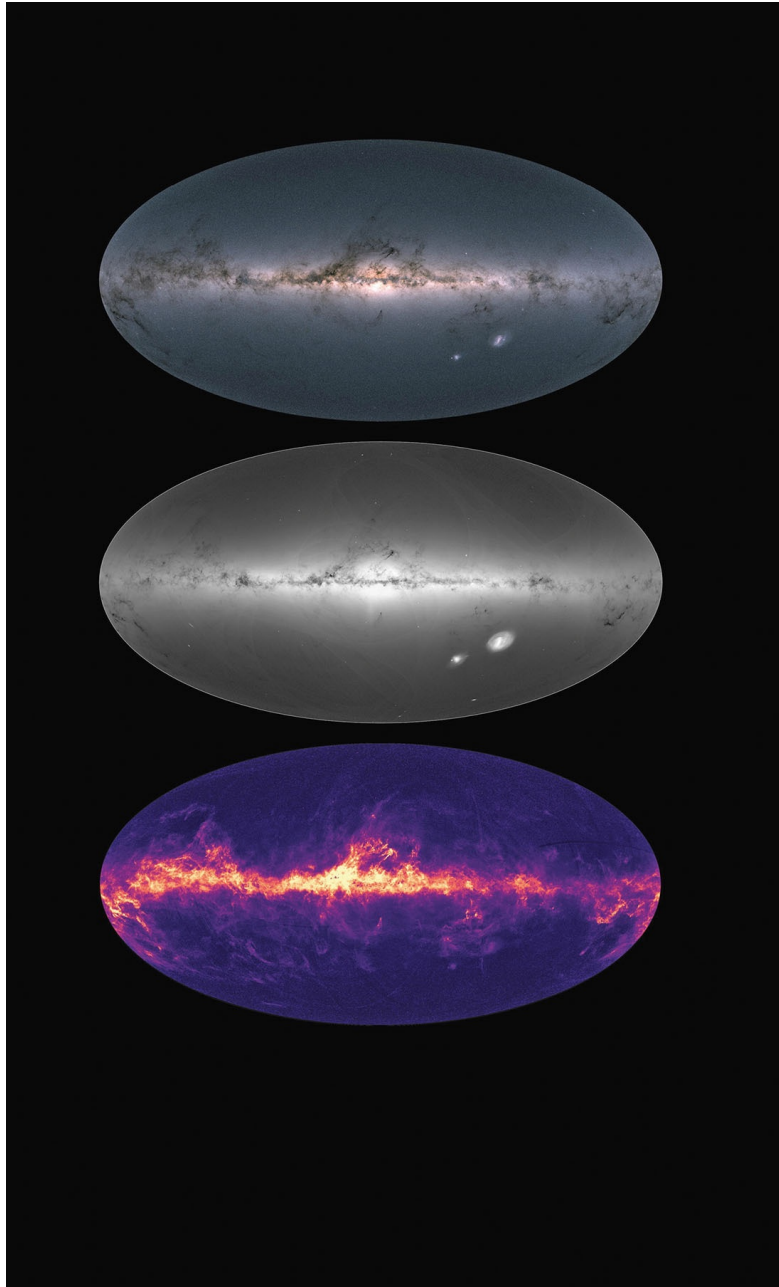
Ilustr. 1. La imagen del agujero negro M87\*; el anillo de luz tiene un diámetro de cien mil millones de kilómetros y está a una distancia de cincuenta y cinco millones de años luz de nosotros.



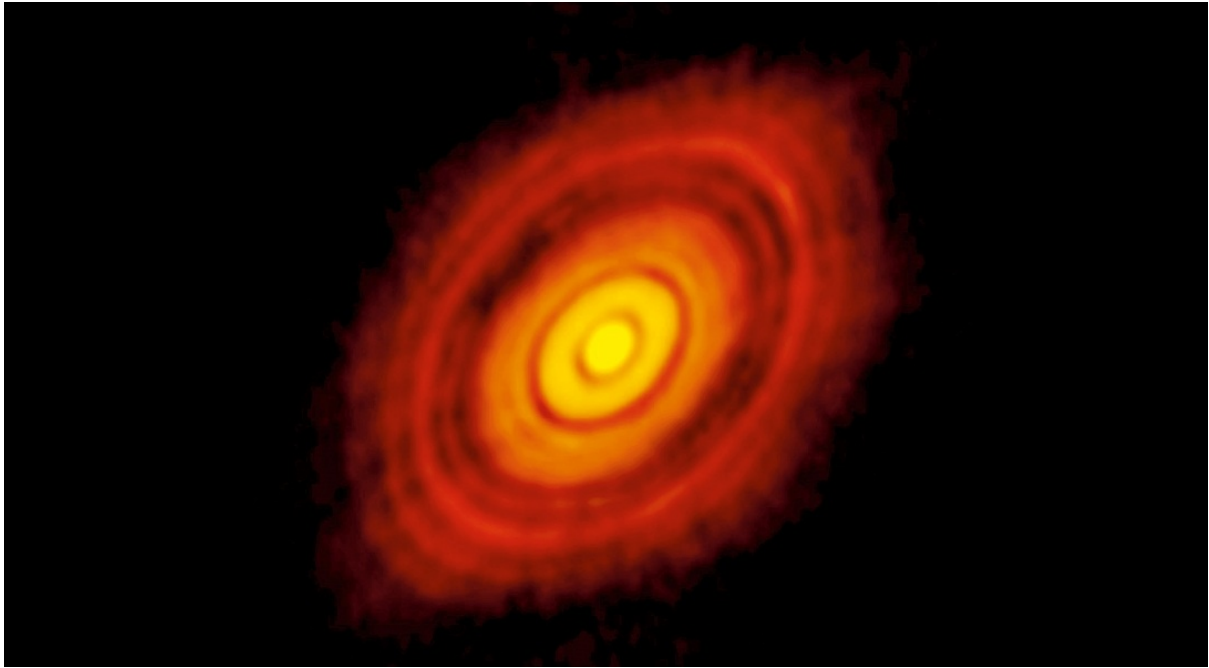
Ilustr. 2. En el centro de la Vía Láctea mediante radiación de luz (telescopio MeerKAT, en Sudáfrica y el VLA, en Estados Unidos) vemos el brillo del gas caliente y de los campos magnéticos en el disco de nuestra galaxia, a una distancia de veintisiete mil años luz. La mancha luminosa de la derecha del centro alberga a Sagitario A\*, nuestro agujero negro central.



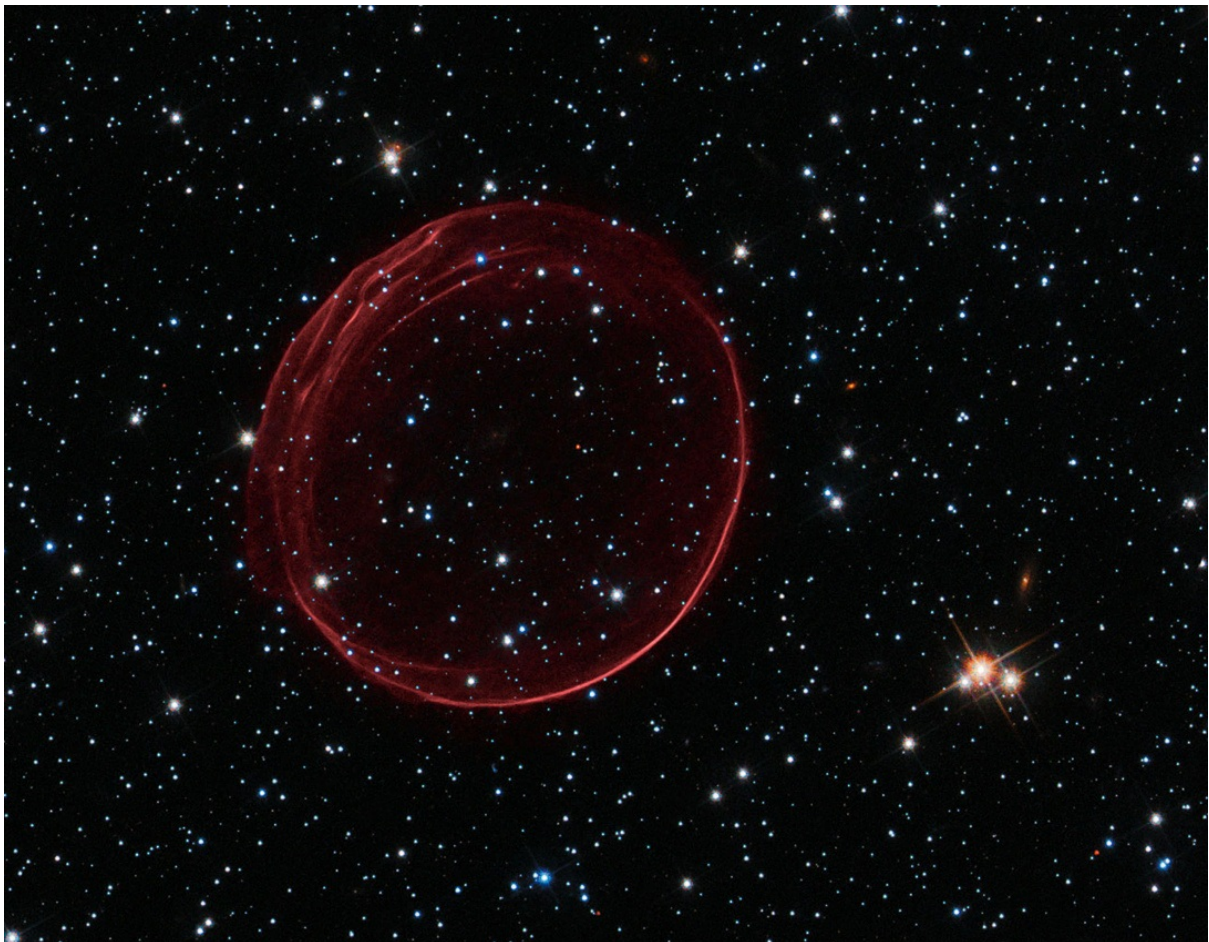
Ilustr. 3. La danza de las estrellas alrededor del agujero negro en el centro galáctico. Simulación basada en los movimientos estelares medidos. Las estrellas viajan a algunos miles de kilómetros por segundo en torno a un punto: la radiofuente Sagitario A\*.



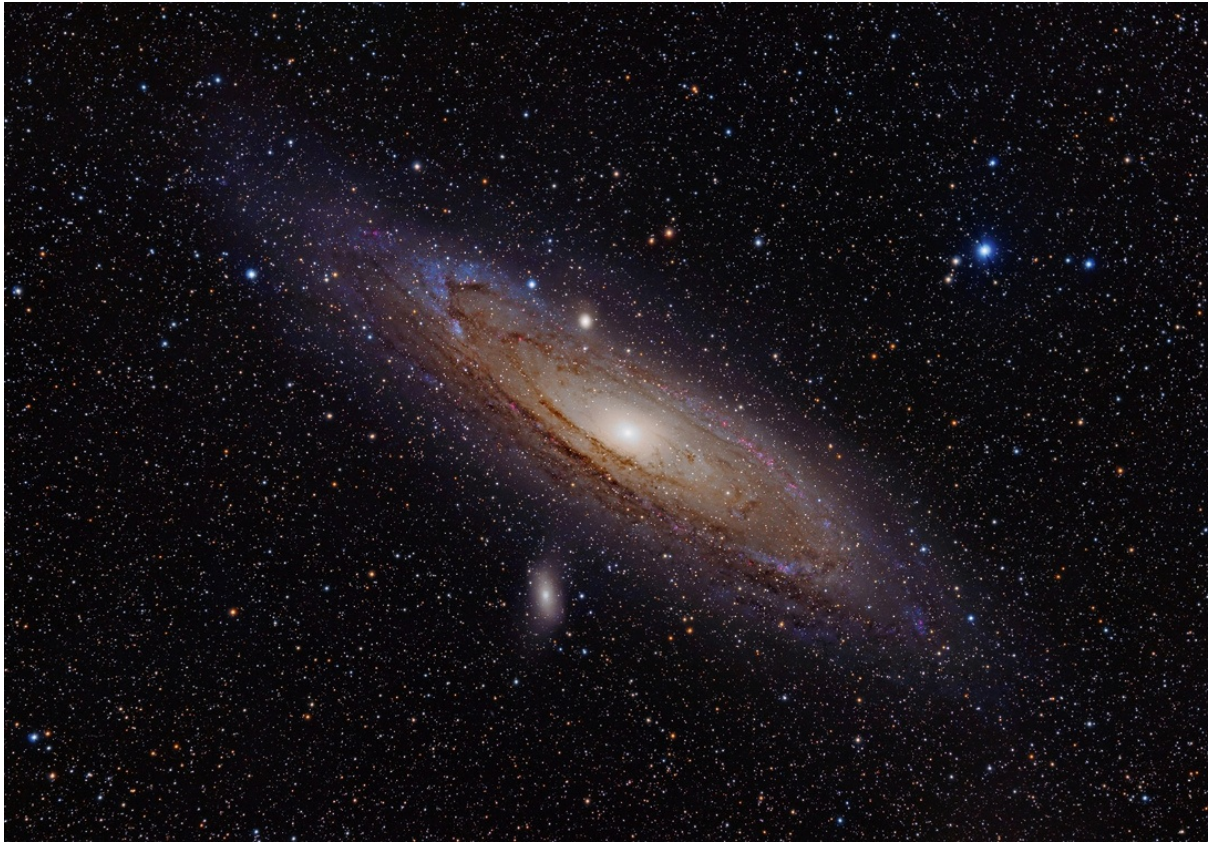
Ilustr. 4. Nuestra Vía Láctea. Mil setecientos millones de estrellas que fueron medidas con el satélite Gaia, de la Agencia Espacial Europea: luminosidad (superior), número (centro), polvo interestelar (inferior). Se ve el cielo entero.



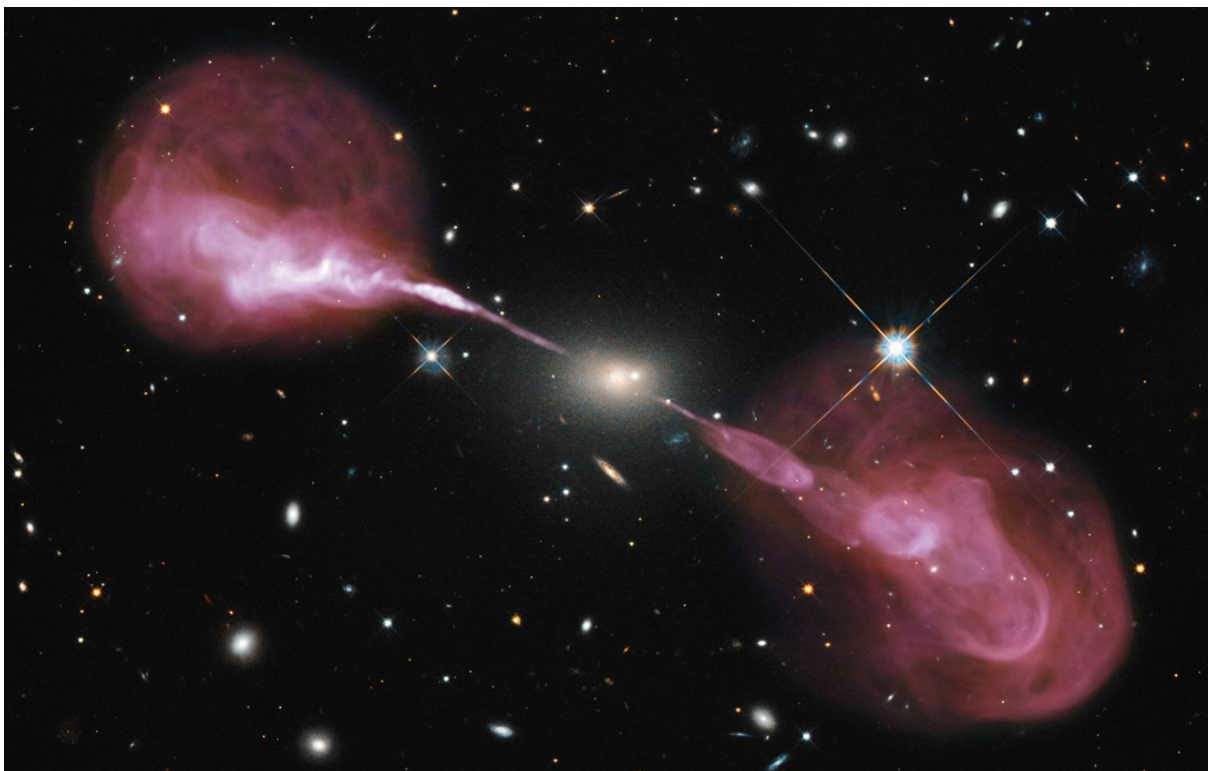
Ilustr. 5. Anillos de polvo en torno a la protoestrella HL Tauri a una distancia de cuatrocientos cincuenta años luz; nace un nuevo sistema solar. El disco es aproximadamente tres veces más grande que la órbita de Neptuno alrededor del Sol. Vemos radiación de onda milimétrica, grabada por el telescopio ALMA.



Ilustr. 6. Restos de una supernova con un diámetro de veintitrés años luz, resultado de una explosión estelar que crea una estrella de neutrones compacta o incluso un agujero negro.

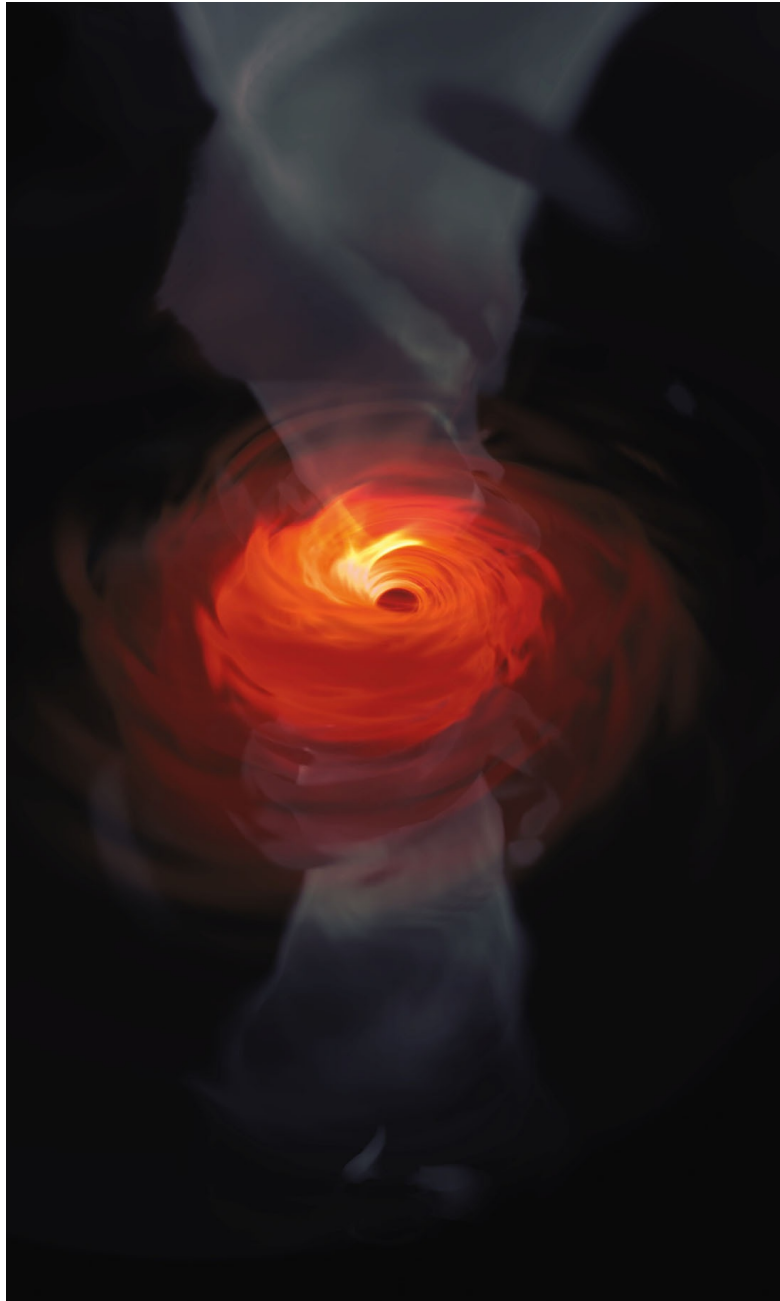


Ilustr. 7. La galaxia Andr6meda, hermana de la Vía Láctea. Tiene un diámetro de cien mil años luz, está compuesta por cientos de miles de millones de estrellas y está aproximadamente a 2,5 millones de años luz de nosotros. En las nubes de polvo de color castaño del disco se originan nuevas estrellas.



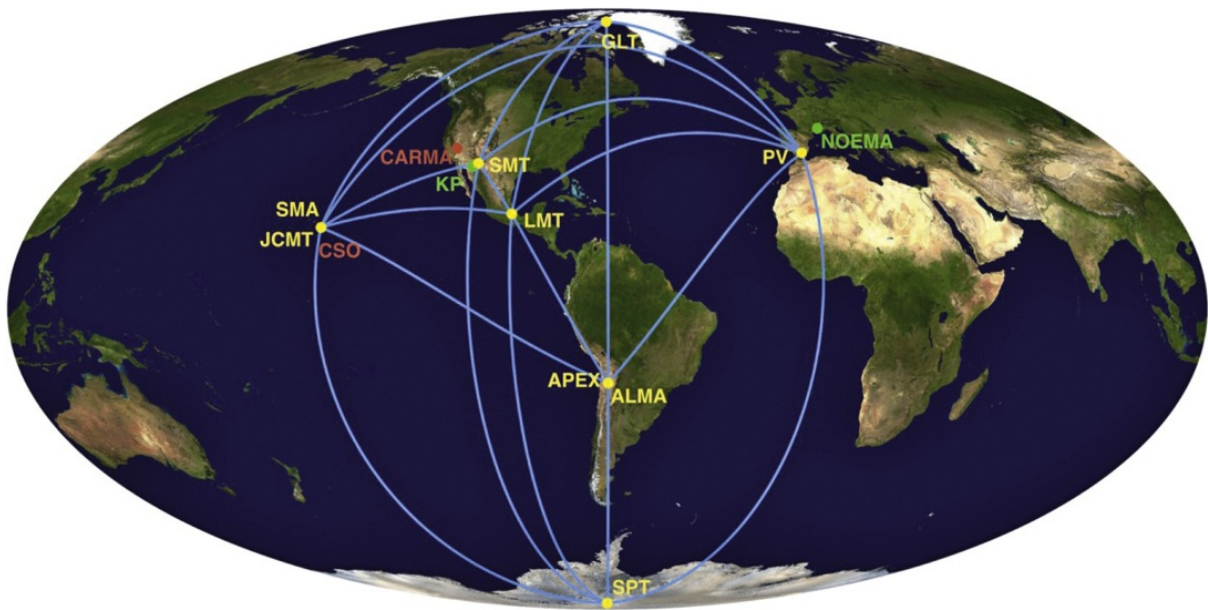
Ilustr. 8. La gran galaxia elíptica Hércules A se encuentra a una distancia de dos mil cien millones de años luz, en un cúmulo de galaxias: un agujero negro dispara al espacio sideral un jet de plasma de 1,6

millones de años luz de longitud. De color rojo: las radiaciones registradas con el VLA. De color negro/multicolor: las detectadas con el telescopio espacial Hubble.



Ilustr. 9. Una detallada simulación magnetohidrodinámica hecha por ordenador de un agujero negro: el disco de acreción en rojo; el jet de plasma, en gris. En el centro se ve la sombra del agujero negro, donde la luz desaparece en el horizonte de sucesos.





Ilustr. 10. El Telescopio del Horizonte de Sucesos (EHT).



Ilustr. 11. Uno de los telescopios del EHT: IRAM, de treinta metros, en el pico Veleta, con el equipo después de la campaña de observación de 2017 (de izquierda a derecha: S. Sánchez, R. Azulay, I. Ruiz,

H. Falcke, T. Krichbaum).



Ilustr. 12. Uno de los telescopios del EHT: JCMT, en Mauna Kea, a cuatro mil doscientos metros de altitud, en Hawái.



Ilustr. 13. Uno de los telescopios del EHT:ALMA, en el llano de Chajnantor, a cinco mil metros de altitud, en Chile.

## Créditos de las imágenes

Los autores y la editorial Klett-Cotta dan las gracias a todos los titulares de los derechos de las imágenes por su amable autorización para emplearlas e imprimirlas. Si en contra de lo esperado se vieran afectados los derechos de otras personas o instituciones, les rogamos que se pongan en contacto con la editorial Klett-Cotta en Stuttgart.

Ilustr. 1: © EHT (Telescopio del Horizonte de Sucesos); red VLBI global compuesta por radiotelescopios.

Ilustr. 2: © Heino Falcke, South African Radio Astronomy Observatory; red VLBI africana, compuesta por radiotelescopios, y Observatorio Nacional de Radioastronomía (institución de investigación dedicada a la radioastronomía, entre otras).

Ilustr. 3-5: © Observatorio Europeo Austral.

Ilustr. 6: Hubble Space Telescope © NASA y la Agencia Espacial Europea.

Ilustr. 7: © Adam Evans, Flickr, Creative Commons Attribution 2.0 Generic.

Ilustr. 8: Rojo: radioimágenes con el VLA. Negro/multicolor: telescopio espacial Hubble. © Observatorio Nacional de Radioastronomía (institución de investigación estadounidense) y NASA.

Ilustr. 9: © Davelaar/Universidad Radboud.

Ilustr. 10: © EHT, Astrophysical Journal Letters.

Ilustr. 11: © Salvador Sánchez.

Ilustr. 12: © William Montgomerie.

Ilustr. 13: © ESO.



Heino Falcke (1966) es profesor de radioastronomía y física de astropartículas en la Universidad de Radboud en Nimega y profesor invitado del Instituto Max Planck de Radioastronomía de Bonn. Su principal campo de investigación son los agujeros negros. Responsable del proyecto Event Horizon Telescope, logró junto con un extraordinario equipo de científicos de todo el mundo tomar las primeras fotos de un agujero negro. Ha sido distinguido con el Premio Spinoza, el galardón científico más prestigioso de los Países Bajos y el Premio Breakthrough in Fundamental Physics.



Jörg Römer, nacido en 1974, es editor científico. Realizó estudios mesoamericanos y latinoamericanos así como estudios de prehistoria y civilizaciones antiguas. Desde 2012, ha trabajado como editor independiente y desde 2015 como editor en el departamento de salud y ciencia de *Der Spiegel*, la revista de noticias líder en Alemania.

# Notas



Prólogo. Y, sin embargo, los vemos

[1] Transmisión en directo de la rueda de prensa de la Unión Europea en Bruselas: <<https://youtu.be/Dr20f19czeE>>. Comunicado de prensa de del Observatorio Europeo Austral: <<https://www.eso.org/public/spain/news/eso1907/>>. Vídeo con el zoom al agujero negro: <<https://www.eso.org/public/spain/videos/eso1907c/>>. Rueda de prensa de la National Science Foundation: <<https://www.youtube.com/watch?v=lnJi0Jy692w>>. <<

[2] Véase el cuadernillo de imágenes. <<

PRIMERA PARTE

Viaje a través del espacio y del tiempo

1. El ser humano, la Tierra y la Luna

[3] La densidad del aire en la órbita terrestre baja:  $5 \times 10^{-9}$  g/cm<sup>3</sup> frente a los 1,204 kg/m<sup>3</sup> ( $10^{-3}$  g/cm<sup>3</sup>) a presión normal. Véase Khalil, Kh. I., y S.W. Samwel (2016), «Effect of Air Drag Force on Low Earth Orbit Satellites During Maximum and Minimum Solar Activity», *Space Research Journal*, vol. 9, pp. 1-9, en <<https://scialert.net/fulltext/?doi=srj.2016.1.9>>. <<

[4] Siegel, E. (2017), «The Hubble Space Telescope is falling», *Forbes*, 18 de octubre de 2017, en <<https://www.forbes.com/sites/startswithabang/2017/10/18/the-hubble-space-telescope-is-falling/#71ac8b1b7f04>>. Wall, M. (2015), «How Will the Hubble Space Telescope Die?», *Space*, 24 de abril de 2015, en <<https://www.space.com/29206-how-will-hubble-spacetelescope-die.xhtml>>. <<

[5] La Biblia, Job 26:7. <<

[6] La Biblia, Salmos 90:4. <<

[7] Brewer, S. M., J.-S. Chen, A. M. Hankin, E. R. Clements *et al.* (2019), «<sup>27</sup>Al<sup>+</sup> Quantum-Logic Clock with a Systematic Uncertainty below 10<sup>-18</sup>», *Physical Review Letters*, vol. 123, p. 033201, en <<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2019PhRvL.123c3201B>>. <<

[8] Utilizaron como reloj la órbita de Ío, una de las lunas de Júpiter, y constataron que ese reloj se atrasaba un poco cuando la Tierra en su órbita alrededor del Sol se hallaba más alejada de Júpiter que unos meses antes. La luz de Júpiter llegaba entonces algunos minutos más tarde de lo esperado, el reloj de Ío se atrasaba. <<



[9] Michelson nació en Prusia y emigró con sus padres a Estados Unidos a la edad de dos años. Véase <<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1907/michelson/biographical/>>. <<

[10] Sin embargo, no es seguro que el experimento de Michelson y Morley influyera de una manera revolucionaria en Einstein. Probablemente fue más importante la casi relatividad del electromagnetismo. Véase: Van Dongen, J. (2009), «On the role of the Michelson-Morley experiment: Einstein in Chicago», *Archive for History of Exact Sciences*, vol. 63 (2009), pp. 655-663, en <<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2009arXiv09081545V>>. <<

[11] Boda con rebote lunar de Andre y Marit en  
<<https://www.youtube.com/watch?v=Rh4z8TwGwrY>>. <<

[12] Hadhazy, A. (2010), «Fact or Fiction: The Days (and Nights) Are Getting Longer», *Scientific American*, 10 de octubre de 2010, en <<https://www.scientificamerican.com/article/earth-rotation-summer-solstice/>>. <<

[13] Van Haarlem, M. P., *et al.* (2013), «LOFAR: The LOw-Frequency ARray», *Astronomy and Astrophysics*, vol. 556, p. A2. <<

## 2. El sistema solar y las visiones del mundo

[14] Wang, P. K., y G. L. Siscoe (1980), «Ancient Chinese observations of physical phenomena attending solar eclipses», *Solar Physics*, vol. 66, pp. 187-193, en <<https://doi.org/10.1007/BF00150528>>. Véase también <<https://eclipse.gsfc.nasa.gov/SEhistory/SEhistory.xhtml#-2136>>. <<

[15] Notsu, Y., H. Maehara, S. Honda, S. L. Hawley *et al.* (2019), «Do Kepler Superflare Stars Really Include Slowly Rotating Sun-like Stars?— Results Using APO 3.5 m Telescope Spectroscopic Observations and GaiaDR2 Data», *The Astrophysical Journal*, vol. 876, p. 58, en <<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2019ApJ...876...58N>>. <<

[16] Tuit de Mark McCaughrean, @markmccaughrean, en <<https://twitter.com/markmccaughrean/status/1213827446514036736>>. <<



[17] Muchas representaciones y hallazgos de la Edad de Piedra (cueva de Lascaux, las tallas en un hueso de águila en Dordoña, Stonehenge, el mapa lunar de Knowth) siguen siendo vagos y controvertidos. Véase: Overmann, K. A. (2016), «The role of materiality in numerical cognition», *Quaternary International*, vol. 405, pp. 42-51, en <<https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.05.026>>. Stooke, P.J. (1994), «Neolithic Lunar Maps at Knowth and Baltinglass, Ireland», *Journal for the History of Astronomy*, vol. 25, n.º 1, pp. 39-55, en <<https://doi.org/10.1177/002182869402500103>>. No obstante, suponer que el ser humano no exploró el cielo hasta el momento de la aparición de fuentes escritas documentadas se halla en contradicción con la curiosidad humana. <<

[18] Römer, J. (2019), «Als den Menschen das Mondfieber packte», *Der Spiegel*, 16 de julio de 2019, en <<https://www.spiegel.de/wissenschaft/mensch/mond-in-der-archaeologie-zeitmesser-der-steinzeit-a-1274766.html>>. <<

[19] El Sistema de Referencia Celeste Internacional es un sistema referencial de coordenadas construido a partir de las observaciones de los cuásares realizadas por interferometría de muy larga base, y sirve para la orientación terrestre en el espacio a través de los parámetros de orientación de la Tierra del Servicio Internacional de la Rotación de la Tierra y Sistemas de Referencia. Con él pueden vincularse, por ejemplo, las coordenadas en la Tierra del Sistema Internacional de Referencia Terrestre con las coordenadas de los satélites. Véase <<https://www.iers.org/IERS/EN/Science/ICRS/ICRS.xhtml>>. <<

[20] Steele, J. M. (2008), *A Brief Introduction to Astronomy in the Middle East*, SAQI, Londres. Algunos asiriólogos se toparon con pruebas de un rey sustituto. Cuando había un eclipse de sol o de luna, en Mesopotamia se colocaba en el trono a un soberano títere debido a un mal presagio. Para ello se elegía a un preso o a un discapacitado mental. El verdadero rey vivía en ese tiempo como un simple campesino. Solo al cabo de cien días, los sacerdotes daban por concluida la alarma. <<

[21] La Biblia, evangelio de Mateo 2:1-13. De hecho, no aparece en ninguna parte del texto bíblico que se trate de reyes, ni que fueran tres. El uso lingüístico y la situación histórica hacen posible que se describan en ese pasaje a expertos con conocimientos de astrología. Más detalles al respecto se encuentran en mi blog de WordPress: Falcke, H. (2017), «The Star of Bethlehem-a mystery (almost) resolved?», *Random thoughts on politics, science, society, and religion*, WordPress, en <<https://hfalcke.wordpress.com/2014/10/28/the-star-of-bethlehem-a-mystery-almost-resolved/>>; y en la bibliografía citada en él, en concreto: Barthel, P., y Van Kooten, (2015); *The Star of Bethlehem and the Magi: Interdisciplinary Perspectives from Experts on the Ancient Near East, the Greco-roman World, and Modern Astronomy*, Brill Academic Publishers, ISBN 978-9004308480. <<

[22] Bede (siglo ix), *De Natura Rerum*, Ginebra, ms. lat. 50; o Johannes de Sacrobosco (1230 d. C.), *Tractatus de Sphaera*, véase <[http://www.bl.uk/manuscripts/Viewer.aspx?ref=harley\\_ms\\_3647\\_f024r](http://www.bl.uk/manuscripts/Viewer.aspx?ref=harley_ms_3647_f024r)>. <<

[23] Freely, J. (2014), *Aristoteles in Oxford: Wie das finstere Mittelalter die moderne Wissenschaft begründete*, Klett-Cotta, Stuttgart, ISBN 978-3-60894854-7. <<

[24] Follmer, S. (2018), «Woher haben die Wochentage ihre Namen?», *Online Focus*, 11 de septiembre de 2018, en <[https://praxistipps.focus.de/woher-haben-die-wochentage-ihre-namen-alle-details\\_96962](https://praxistipps.focus.de/woher-haben-die-wochentage-ihre-namen-alle-details_96962)>. <<



[25] El enfoque del astrónomo indio Aryabhata (\* 476 d. C.) era geocéntrico, pero suponía que la Tierra rotaba. Plofker, K. (2009), *Mathematic in India*, Princeton University Press. Sobre la astronomía de la India, véase: Podbregar, N. (2017), «Jantar Mantar: Bauten für den Himmel», *Scinexx*, 15 de septiembre de 2017, en <<https://www.scinexx.de/dossier/jantarmantar-bauten-fuer-den-himmel/>>. <<

[26] Needham, J., con la asistencia de Wang Ling (1956), *Science and Civilisation in China*, vol.2: *History of Scientific Thought*, Cambridge University Press, citado en: Cohen, M. L., y S. T. Teise, *Living in the Chinese Cosmos. The Chinese Cosmos: Basic Concepts*, Nueva York, Columbia University, en <<http://afe.easia.columbia.edu/cosmos/bgov/cosmos.htm>>. <<

[27] Por ejemplo, Harrison, P. (2015), *The Territories of Science and Religion*, The Gifford Lectures, University of Chicago Press, ISBN 9780226184487. Un resumen del autor en alemán y en inglés se encuentra en las siguientes direcciones: <<https://www.theologie-naturwissenschaften.de/startseite/leitartikelarchiv/konfliktmythos/>> y en <<https://www.theologie-naturwissenschaften.de/en/dialogue-between-theology-and-science/editorials/conflict-myth/>>. <<

[28] Otro mito, conocido también a partir del cine, es el asesinato de Hipatia por una turba de cristianos y la quema de la biblioteca de Alejandría. Su importancia como mujer valiente y sabia no disminuye aunque su caso no sirva para corroborar la tesis del conflicto «ciencia contra cristianismo». El asesinato fue más bien de índole política, la biblioteca ya no existía allí y, por lo demás, las pruebas son insuficientes. Booth, R. (2016), *Hypatia-Mathematician, Philosopher, Myth*, Durnell, ISBN 978-1-78155-546-0. Véase también: Dzielska, M. (2010), «Hypatia wird zum Opfer des Christentums stilisiert», *Der Spiegel*, 25 de abril de 2010, en <<https://www.spiegel.de/wissenschaft/mensch/interview-zum-film-agera-hypatia-wird-zum-opfer-des-christentums-stilisiert-a-690078.xhtml>>, y *Cynthia Haven's Blog for the written world* (2016), en <<https://bookhaven.stanford.edu/2016/03/the-library-of-alexandria-destroyed-by-an-angry-mob-with-torches-not-verylikely/>>. <<

[29] Hans Lipperhey, de Middelburgo, es conocido públicamente por la invención del telescopio, pero hay otros que también reclaman para sí la autoría de este invento. <<

[30] Livio, M. (2020), *Galileo: And the Science Deniers*, Nueva York, Londres, Simon & Schuster. Para contrastar, véase la reseña del libro de Christie, T. (2020), «How to create your own Galileo», *The Renaissance Mathematicus*, WordPress, en <[https://thonyc.wordpress.com/2020/05/27/how-to-crea te-your-own-galileo/](https://thonyc.wordpress.com/2020/05/27/how-to-crea-te-your-own-galileo/)>, donde Christie muestra que en la imagen actual de Galileo hay muchas licencias poéticas, y no deja títere con cabeza sobre el libro de Livio. <<

[31] Rublack, U. (2019), *Der Astronom und die Hexe. Johannes Kepler und seine Zeit*, Stuttgart, Klett-Cotta, ISBN 978-3-608-98126-1. <<

[32] Newton poseía una cátedra en Teología y entre sus contemporáneos era considerado un excelente biblista; sin embargo, también seguía en secreto ideas alquimistas y heréticas. Iliffe, R. (2013), *Newton's Religious Life and Work*, en <<http://www.newtonproject.ox.ac.uk/view/contexts/CNTX00001>>. <<



[33] Han Solo declara con orgullo en el Episodio IV que consigue hacer el corredor de Kessel en doce pársecs. Eso suena a una medida de tiempo, pero en opinión de sus fans, indica supuestamente una longitud; véase <<https://jedipedia.fandom.com/wiki/Parsec>>. Los astrónomos se estremecen en sus butacas en el cine cuando oyen esa frase. <<

[34] Sanna, A., M. J. Reid, T. M. Dame, K. M. Menten *et al.* (2017), «Mapping spiral structure on the far side of the Milky Way», *Science*, vol. 358, pp. 227-230, en <<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2017Sci...358..227S>>. <<

## SEGUNDA PARTE

### Los secretos del universo

#### 1. El pensamiento más dichoso de Einstein

[35] Tal vez se trate de una cuestión filosófica, pero un espacio completamente vacío no tiene entropía ni desarrollo, por ello no puede hablarse ahí de tiempo. Tampoco tiene materia, y la energía del vacío sería literalmente nada, y sobre esto no puede decir nada la física, aunque sí las matemáticas. <<

[36] Por «luz» se entiende aquí algo más general e incluye todas las formas de interacciones que se dan a la velocidad de la luz. Para un hipotético universo con materia que no interactúa en absoluto, el espacio deja también de tener sentido. Aquí se impone preguntarnos qué es lo que denominamos «realidad». Las soluciones de las ecuaciones de campo de Einstein existen sin que la luz o la materia tengan que estar en el espacio-tiempo. Sin embargo, entonces se reduce el espacio y el tiempo a un concepto puramente matemático que describe la «nada». <<

[37] Por ejemplo, Ball, P. (2018), «Why the Many-Worlds Interpretation Has Many Problems», *Quanta Magazine*, 18 de octubre de 2018, en <<https://www.quantamagazine.org/why-the-many-worlds-interpretation-of-quantum-mechanics-has-many-problems-20181018/>>. Dijkgraaf, R. (2018), «There Are No Laws of Physics. There's Only the Landscape», *Quanta Magazine*, 4 de junio de 2018, en <<https://www.quantamagazine.org/there-are-no-laws-of-physics-theres-only-the-landscape-20180604/>>. <<

[38] El proceso de la pérdida de estados cuánticos en los objetos macroscópicos se describe comúnmente con la expresión «decoherencia cuántica». Un tratamiento de la física cuántica con mayor calado y comprensible para todo el mundo se encuentra, por ejemplo, en el siguiente libro: Kiefer, C. (2008), *Der Quantenkosmos: Von der zeitlosen Welt zum expandierenden Universum*, S. Fischer, ISBN 978-3596370603. <<

[39] El hecho de que los físicos hablen de la velocidad de la luz tiene sus razones históricas. Desde la perspectiva moderna, habría podido denominarse también «velocidad gravitatoria» a esta velocidad límite absoluta conforme a las ondas gravitatorias, o mejor aún, «velocidad de causalidad». En la teoría de la relatividad, la velocidad de la luz es una propiedad fundamental del espacio-tiempo, esto es, la relación natural entre el espacio y el tiempo. <<

[40] Hafele, J. C. y R. E. Keating (1972), «Around-the-World Atomic Clocks: Predicted Relativistic Time Gains», *Science*, vol. 177, pp. 166-170, en <<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1972Sci...177..166H>>. ¡Lo importante es que los tres relojes se mueven en relación con un sistema inercial, no giratorio como el centro de la Tierra o las estrellas fijas! En el ecuador, un reloj se mueve también en tierra a casi 1600 km/h hacia el este. Si volamos en un Airbus A330 a 900 km/h hacia el este, entonces nuestra velocidad es la del avión más la de la rotación terrestre, es decir, hasta los 2500 km/h. Hacia el oeste, en cambio, nos movemos en relación al centro de la Tierra a unos 900 km/h más lentos que en la superficie terrestre, es decir, solo a unos 700 km/h, pero en general siempre hacia el este. El reloj atómico mister Clock, que voló hacia el este, era el que iba más rápido en relación con el centro de la Tierra y por ello el tiempo iba relativamente más lento. El mister Clock que iba hacia el oeste se movía relativamente más lento y el tiempo iba más rápido. El buen reloj que se quedó en tierra tampoco estaba quieto en relación con el centro de la Tierra; nos sirvió como tiempo de referencia y funcionó más lento que un reloj en el centro de la Tierra, más rápido que el reloj que volaba lentamente en dirección al este y más lento que el que volaba rápidamente en dirección al este. De hecho, este experimento prueba también aspectos de la teoría general de la relatividad y del principio de equivalencia. <<



[41] Malhotra, R., M. Holman y T. Ito (2001), «Chaos and stability of the solar system», *Proceedings of the National Academy of Science*, vol. 98, pp. 12 342-12 343, en <<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2001PNAS...9812342M>>. <<

[42] Mi colega Paul Groot fue durante mucho tiempo nuestro director del departamento. <<

[43] Un paso importante en el desarrollo de la mecánica celeste lo dio el físico y matemático Pierre-Simon Laplace en 1823 con su obra *Traité de Mécanique Céleste*. La predicción de Neptuno a través de las perturbaciones de la órbita de Urano la consiguió el matemático Urbain Le Verrier en el año 1846. <<

[44] Einstein comenzó como empleado de tercera clase, pero ya lo habían ascendido cuando presentó su teoría. <<

[45] Gutfreund, H. y J. Renn (2015), *The Road to Relativity-The History and Meaning of Einstein's "The Foundation of General Relativity"*, Princeton University Press, 2015, ISBN 978-0-691-16253-9. <<

[46] Gagnon, P. (2016), «The Forgotten Life of Einstein's First Wife», *Scientific American*, 19 de diciembre de 2016, en <<https://blogs.scientificamerican.com/guest-blog/the-forgotten-life-of-einsteins-first-wife/>>. Una exposición algo diferente se encuentra en: Esterson, A., y D.C. Cassidy (2019), *Einstein's Wife: The Real Story of Mileva Einstein-Maric*, The MIT Press, ISBN 978-0262039611. <<

[47] Einstein, A. (1922), *How I created the theory of relativity*, reimpresso en: Ono, Y. A. (1982), *Physics Today*, vol. 35, n.º 8, p. 45, en <<https://physicstoday.scitation.org/doi/10.1063/1.2915203>>. <<

[48] En rigor, el principio de equivalencia solo es válido para una masa puntual, pues sus pies son atraídos a la Tierra con un poco más de intensidad que la cabeza. Esto se denomina «fuerza de marea». En comparación con la Tierra, Einstein es pequeño; pero en el caso de un pequeño agujero negro, Einstein notaría algo con toda seguridad y quedaría convertido en un espagueti. <<



[49] Una buena comprobación del principio de equivalencia se logra con las mediciones radioastronómicas de un púlsar en un sistema ternario con dos enanas blancas: <https://www.mpg.de/14921807/allgemeine-relativitaetstheorie-pulsar>. Voisin, G., I. Cognard, P. Freire, N. Wex *et al.* (2020), «An improved test of the strong equivalence principle with the pulsar in a triple star system», *Astronomy & Astrophysics*, vol. 638, p. A24, en <https://www.aanda.org/articles/aa/abs/2020/06/aa38104-20/aa38104-20.xhtml>. <<

[50] Kennefick, D. (2009), «Testing relativity from the 1919 eclipse-a question of bias», *Physics Today*, vol.62, ítem 3, p.37, en <<https://physicstoday.scitation.org/doi/10.1063/1.3099578>>. <<

[51] En la desviación de la luz, una mitad se debe a la curvatura del espacio y la otra mitad a la curvatura del tiempo. Esta última ya está contenida en la teoría de Newton que predice, por tanto, el valor de la desviación. <<

[52] Pascual-Sánchez, J.-F. (2007), «Introducing relativity in global navigation satellite systems», *Annalen der Physik*, vol. 16, pp. 258-273, en <<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2007AnP...519..258P>>. Calculado sin cautela, un error de treinta y nueve microsegundos por día se corresponde con un error de posicionamiento de unos diez kilómetros. Esto es lo que se dice en muchos artículos famosos; sin embargo, no está claro si también es válido para el sistema real, donde todos los relojes de los satélites cometen un error comparable. Están en proceso cálculos más precisos (Pössel, M., y Müller, T., en prep.). <<

[53] Un buen resumen sobre los efectos de la relatividad general en el sistema GPS se encuentra en este artículo: Ashby, N. (2003), «Relativity in the Global Positioning System», *Living Reviews in Relativity*, vol. 6, artículo n.º 1, en <<https://link.springer.com/article/10.12942/lrr-2003-1>>. <<

[54] Doy las gracias a Jun Ye por esta indicación: Oelker, E., *et al.* (2019), «Optical clock intercomparison with  $6 \times 10^{-19}$  precision in one hour», *arXiv e-prints*, p. arXiv: 1902.02741, en «<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2019arXiv190202741O>». <<

## 2. La Vía Láctea y sus estrellas

[55] Véase «espectroscopia» en el glosario. <<

[56] Sokol, J. (2018), «Stellar Disks Reveal How Planets Get Made», *Quantamagazine*, 21 de mayo de 2018, en <<https://www.quantamagazine.org/stellar-disks-reveal-how-planets-get-made-20180521/>>. <<



[57] Solo algunos pocos átomos de hidrógeno en nuestro interior probablemente no estuvieron nunca en las estrellas, sino que han viajado a través del espacio en forma de gas difuso desde la Gran Explosión. <<

[58] Al principio, el planeta Dimidio se llamó «51 Pegasi b». Es también el único nombre que conoce la mayoría de los astrónomos. <<

[59] Enriquez, J. E., A. Siemion, H. Falcke *et al.* (2017), «The Breakthrough Listen Initiative and the Future of the Search for Intelligent Life», *American Astronomical Society*, ítem 229, p. 116.04, en <<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2017AAS...22911604E>>. <<

### 3. Las estrellas muertas y los agujeros negros

[60] Collins, G. W., W. P. Clasp y J. C. Martin (1999), «A Reinterpretation of Historical References to the Supernova of A. D. 1054», *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, vol. 111, pp. 871-880, en <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1999PASP..111..871C>. <<

[61] Algunos investigadores relacionan el dibujo del cañón del Chaco con la supernova del año 1054: <<https://www2.hao.ucar.edu/Education/SolarAstronomy/supernova-pictograph>>. Apareció el 4 de julio de 1054 por la parte oriental de la constelación de Tauro. Recientemente hubo dudas acerca de su interpretación: Moskowitz, C. (2014), «‘Supernova’ Cave Art Myth debunked», *Scientific American*, 16 de enero de 2014, en <<https://blogs.scientificamerican.com/observations/e28098supernovae28099-caveart-myth-debunked/>>. <<

[62] Stairs, I. H. (2003), «Testing General Relativity with Pulsar Timing», *Living Reviews in Relativity*, vol. 6, p. 5, en <<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2003LRR...6...5S>>. <<

[63] Kramer, M., y I. H. Stairs (2008), «The double pulsar», *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, vol. 46, pp. 541-572, en <<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2008ARA&A..46..541K>>. <<

[64] Andreas Brunthaler encontró por casualidad en sus datos la supernova SN 2008iz. <<



[65] Kimani, N., K. Sendlinger, A. Brunthaler, K. M. Menten *et al.* (2016), «Radio evolution of supernova SN 2008iz in M 82», *Astronomy and Astrophysics*, vol. 593, p. A18, en <<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2016A&A...593A..18K>>. <<

[66] Oppenheimer, J. R., y G. M. Volkoff (1939), «On Massive Neutron Cores», *Physical Review*, vol. 55, p. 374. Sin embargo, la primera propuesta para las estrellas de neutrones vino de Baade y Zwicky: Baade, W., y F. Zwicky (1934), «Remarks on Super-Novae and Cosmic Rays», *Physical Review*, vol. 46, pp. 76-77, en <<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1934PhRv...46...76B>>. <<

[67] Probablemente Schwarzschild no encontró la solución en Rusia sino en el frente occidental, al sur de la cordillera de los Vosgos, tal como se desprende de una carta dirigida a Sommerfeld: <<https://leibnizsozietat.de/wp-content/uploads/2017/02/Kant.pdf>>. <<

[68] Pocos meses después, el científico neerlandés Johannes Droste encontró por su cuenta una solución aún más elegante, pero fue ignorada casi por completo porque solo la publicó en neerlandés. En esa época todavía era importante poder comunicarse en alemán. <<

[69] Lexikon der Astronomie: «Schwarzschild-Lösung», Spektrum, en  
<<https://www.spektrum.de/lexikon/astronomie/schwarzschild-loesung/431>>.  
<<

[70] La imagen del río para los agujeros negros me pareció muy original mientras lo escribía, pero al parecer ya había alguien que escribió todo un artículo especializado al respecto: Hamilton, A. J. S., y J. P. Lisle (2008), «The river model of black holes», *American Journal of Physics*, vol. 76, pp. 519-532, en <<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2008AmJPh..76..519H>>. Toda una colección de modelos gráficos de la teoría general de la relatividad se encuentra en: Pössel, M. (2018), «Relatively complicated? Using models to teach general relativity at different levels», *arXiv e-prints*, pp. arXiv:181211589, en <<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2018arXiv181211589P>>. <<

[71] Bernstein, J. (1996), «Albert Einstein und die Schwarzen Löcher», *Spektrum der Wissenschaft*, 8 de enero de 1996, en <<https://www.spektrum.de/magazin/albert-einstein-und-die-schwarzen-loecher/823187>>. <<

[72] Un punto no significa aquí un punto espacial en el sentido de la teoría general de la relatividad. La singularidad central es un límite temporal que se extiende infinitamente en el espacio. <<



[73] Ewing, A. (1964), «“Black Holes” in Space», *The Science News-Letter*, vol. 85, n.º 3, 18 de enero de 1964, p. 39, en <<https://www.jstor.org/stable/3947428?seq=1>>. <<

[74] Kerr, R. P. (1963), «Gravitational Field of a Spinning Mass as an Example of Algebraically Special Metrics», *Physical Review Letters*, vol. 11, pp. 237-238, en <<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1963PhRvL..11..237K>>. <<

[75] Este efecto tiene importancia para la formación de chorros de plasma de los agujeros negros, si bien no es absolutamente necesario. Se le conoce por la expresión «proceso de Blandford-Znajek» y es una variante del proceso Penrose, por el cual puede extraerse energía de rotación del agujero negro con la ayuda de la luz o de partículas. <<

[76] Informaciones sobre el Africa Millimetre Telescope en <<https://www.ru.nl/astrophysics/black-hole/africa-millimetre-telescope/>>. Backes, M., C. Müller, J. E. Conway, R. Deane *et al.* (2016), «The Africa Millimetre Telescope», The 4th Annual Conference on High Energy Astrophysics in Southern Africa (2016), p. 29, en <<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2016heas.confE..29B>>. <<

[77] «Mistkäfer orientieren sich an der Milchstraße [Los escarabajos peloteros se orientan por la Vía Láctea]», *Spiegel online*, 24 de enero de 2013, en <<https://www.spiegel.de/wissenschaft/natur/mistkaefer-orientierensich-an-der-milchstrasse-a-879525.xhtml>>. <<

[78] Lorenzen, D. (2018), «Die Beobachtung der Andromeda-Galaxie», *Deutschlandfunk*, 5 de octubre de 2018, en <[https://www.deutschlandfunk.de/vor-95-jahren-die-beobachtung-der-andromeda-galaxie.732.de.xhtml?dram:article\\_id=429694](https://www.deutschlandfunk.de/vor-95-jahren-die-beobachtung-der-andromeda-galaxie.732.de.xhtml?dram:article_id=429694)>. <<

[79] Hubble, E. P. (1936), *Realm of the Nebulae*, New Haven: Yale University Press, en <<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1936rene.book...H>>. <<

[80] Reid, M.J., y A. Brunthaler (2020), «The Proper Motion of Sagittarius A\*. III. The Case for a Supermassive Black Hole», *The Astrophysical Journal*, vol. 892, p. 39, en <[https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2020ApJ... 892...39R](https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2020ApJ...892...39R)>. <<



#### 4. Galaxias, cuásares y la Gran Explosión

[81] Elizalde, E. (2019), «Reasons in Favor of a Hubble-Lemaître-Slipher's (HLS) Law», *Symmetry*, vol. 11, p. 15, en <<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2019Symm...11...35E>>. <<

[82] Richard Porcas fue el último fotógrafo del telescopio de trescientos pies ubicado en Green Bank. La foto estuvo colgada durante mucho tiempo en el vestíbulo del Instituto Max Planck de Radioastronomía en Bonn. <<

[83] Kellermann, K., «Fifty years of Quasars», simposio de Caltech, en <<http://www.astro.caltech.edu/q50/pdfs/Kellermann.pdf>>. <<

[84] Schmidt, M., «Fifty years of Quasars», simposio de Caltech, en <<http://www.astro.caltech.edu/q50/Program.xhtml>>. <<

[85] En inglés, «Cosmic Microwave Background» (CMB). <<

TERCERA PARTE

El viaje a la imagen

1. El centro galáctico

[86] Townes, C. H., y R. Genzel (1990), «Das Zentrum der Galaxis», *Spektrum der Wissenschaft*, junio de 1990, en <<https://www.spektrum.de/magazin/das-zentrum-der-galaxis/944605>>. <<

[87] Eso solo es posible pronunciarlo en inglés, y suena más o menos como «esyiar eistar». <<

[88] Si cae demasiado material en un agujero negro, se produce tanta radiación que el gas es expulsado por la presión de esta. El límite máximo de acreción de masa se denomina límite de Eddington. <<



[89] Falcke, H., y P. L. Biermann (1995), «The jet-disk symbiosis. I. Radio to X-ray emission models for quasars», *Astronomy and Astrophysics*, vol. 293, pp. 665-682, en <[https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1995A&A... 293..665F](https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1995A&A...293..665F)>. <<

[90] Falcke, H., y P. L. Biermann (1999), «The jet/disk symbiosis. III. What the radio cores in GRS 1915+105, NGC 4258, M 81 and SGR A\* tell us about accreting black holes», *Astronomy and Astrophysics*, vol. 342, pp. 49-56, en <<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1999A&A...342...49F>>. <<

[91] *The Galactic Center, 4th ESO/CTIO Workshop* (1996), vol.102, R. Gredel, en [http://www.aspbooks.org/a/volumes/table\\_of\\_contents/?book\\_id=214](http://www.aspbooks.org/a/volumes/table_of_contents/?book_id=214)>. <<

[92] Eckart, A., y R. Genzel (1996), «Observations of stellar proper motions near the Galactic Centre», *Nature*, vol. 383, pp. 415-417, en <<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1996Natur.383..415E>>. <<

[93] Klein, B. L., A. M. Ghez, M. Morris y E. E. Becklin (1996), «2.2  $\mu\text{m}$  Keck Images of the Galaxy's Central Stellar Cluster at 0".05 Resolution», *The Galactic Center*, vol. 102, p. 228, en <<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1996ASPC..102..228K>>. <<

[94] Ghez, A. M., M. Morris, E. E. Becklin, A. Tanner *et al.* (2000), «The accelerations of stars orbiting the Milky Way's central black hole», *Nature*, vol. 407, pp. 349-351, en <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2000Natur.407..349G>. <<

[95] Menten, K. M., M. J. Reid, A. Eckart y R. Genzel (1997), «The Position of Sagittarius A\* : Accurate Alignment of the Radio and Infrared Reference Frames at the Galactic Center», *The Astrophysical Journal*, vol.475, pp.L111-L114, en <<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1997ApJ...475L.111M>>. <<

[96] Reid, M.J., y A. Brunthaler (2004), «The Proper Motion of Sagittarius A\*. II. The Mass of Sagittarius A\*», *The Astrophysical Journal*, vol. 616, pp. 872-884, en <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2004ApJ...616..872R>. <<



[97] Schödel, R., *et al.* (2002), «A star in a 15.2-year orbit around the supermassive black hole at the centre of the Milky Way», *Nature*, vol. 419, pp. 694-696, en <<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2002Natur.419..694S>>. <<

[98] Meyer, L., A. M. Ghez, R. Schödel, S. Yelda *et al.* (2012), «The Shortest-Known-Period Star Orbiting Our Galaxy's Supermassive Black Hole», *Science*, vol. 338, p. 84, en <<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2012Sci...338...84M>>. <<

[99] Genzel, R., R. Schödel, T. Ott, A. Eckart *et al.* (2003), «Near-infrared flares from accreting gas around the supermassive black hole at the Galactic Centre», *Nature*, vol. 425, pp. 934-937, en <<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2003Natur.425..934G>>. <<

[100] Baganoff, F. K., M. W. Bautz, W. N. Brandt, G. Chartas *et al.* (2001), «Rapid X-ray flaring from the direction of the supermassive black hole at the Galactic Centre», *Nature*, vol. 413, pp. 45-48, en <<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2001Natur.413...45B>>. <<

[101] Gravity Collaboration, R. Abuter, A. Amorim, M. Bauböck *et al.* (2018), «Detection of orbital motions near the last stable circular orbit of the massive black hole SgrA\*», *Astronomy and Astrophysics*, vol. 618, p. L10, en <<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2018A&A...618L..10G>>. <<

[102] Bower, G. C., M. C. H. Wright, H. Falcke y D. C. Backer (2003), «Interferometric Detection of Linear Polarization from Sagittarius A\* at 230 GHz», *The Astrophysical Journal*, vol. 588, pp. 331-337, en <<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2003ApJ...588..331B>>. <<

[103] Falcke, H., E. Körding y S. Markoff (2004), «A scheme to unify low-power accreting black holes. Jet-dominated accretion flows and the radio/X-ray correlation», *Astronomy and Astrophysics*, vol. 414, pp. 895-903, en <<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2004A&A...414..895F>>. <<

[104] Yuan, F., S. Markoff y H. Falcke (2002), «A Jet-ADAF model for Sgr A\*», *Astronomy and Astrophysics*, vol. 383, pp. 854-863, en <<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2002A&A...383..854Y>>. <<



## 2. La idea de la imagen

[105] La Biblia, Juan 20:29. <<

[106] La resolución de imagen de un telescopio se expresa en grados angulares, en este caso en radianes (rad):  $2\pi$  rad son 360 grados. Indica el ángulo de la línea de visión en el que dos puntos de luz deben estar separados para que puedan ser distinguidos. <<

[107] Rogers, A. E. E., S. Doeleman, M. C. H. Wright, G. C. Bower *et al.* (1994), «Small-Scale Structure and Position of Sagittarius A\* from VLBI at 3 Millimeter Wave-length», *The Astrophysical Journal*, vol. 434, p. L59, en <<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1994ApJ...434L..59R>>. <<

[108] Krichbaum, T. P., D. A. Graham, A. Witzel, A. Greve *et al.* (1998), «VLBI observations of the galactic center source SGR A\* at 86 GHz and 215 GHz», *Astronomy and Astrophysics*, vol. 335, pp. L106-L110, en <<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1998A&A...335L.106K>>. <<

[109] Falcke, H., W.M. Goss, H. Matsuo, P. Teuben *et al.* (1998), «The Simultaneous Spectrum of Sagittarius A\* from 20 Centimeters to 1 Millimeter and the Nature of the Millimeter Excess», *The Astrophysical Journal*, vol. 499, pp. 731-734, en <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1998ApJ...499..731F>. <<

[110] Falcke, H., A. Cotera, W. J. Duschl, F. Melia *et al.* (1999), «The central parsecs of the Galaxy: Galactic Center Workshop: proceedings of a meeting held at Tucson, Arizona, USA 7-11 September, 1998», *The Central Parsecs of the Galaxy*, ASPC, vol. 186, en <[https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1999ASPC..186... F](https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1999ASPC..186...F)>. <<

[111] Zensus, J. A., y H. Falcke (1999), «Can VLBI Constrain the Size and Structure of SGR A\*?», The Central Parsecs of the Galaxy, ASPC, vol. 186, p. 118, en <<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1999ASPC..186..118Z>>. <<

[112] Una buena visualización de las órbitas de la luz se encuentra en: Müller, T., y M. Pössel (2019), «Ray-tracing eines Schwarzen Lochs und dessen Schatten», *Haus der Astronomie*, en <http://www.haus-der-astronomie.de/3906466/BlackHoleShadow>. <<



[113] Majer, U., y T. Sauer (2009), *David Hilbert's Lectures on the Foundation of Physics 1915-1927*, Berlín, Springer Verlag, en <<https://books.google.it/books?id=-fBDAAAAQBAJ>>. Véase también: Von Laue, M. (1921), *Die Relativitätstheorie*, Brunswick, Friedrich Vieweg & Sohn, p. 226. <<

[114] Cunningham, C. T., y J. M. Bardeen (1973), «The Optical Appearance of a Star Orbiting an Extreme Kerr Black Hole», *The Astrophysical Journal*, vol. 183, pp. 237-264, en <<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1973ApJ...183..237C>>. Véase también: Luminet, J.-P. (1979), «Image of a spherical black hole with thin accretion disk», *Astronomy and Astrophysics*, vol. 75, pp. 228-235, en <<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1979A&A...75..228L>>; y Viergutz, S. U. (1993), «Image generation in Kerr geometry. I. Analytical investigations on the stationary emitter-observer problem», *Astronomy and Astrophysics*, vol. 272, p. 355, en <<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1993A&A...272355V>>. En el primer artículo se calculó y se dibujó a mano; en el segundo, se calculó con ordenador y se dibujó a mano; y en el tercero se calculó y se dibujó con ordenador. <<

[115] Más tarde, el profesor Schmidt-Kaler, que en aquella época quiso promoverme y tuvo la amabilidad de proponerme para el Premio de la Academia de Ciencias y Humanidades de Berlín, me señaló que un antiguo discípulo suyo —solo unas pocas semanas después y de manera independiente por completo de nosotros— también había introducido en la bibliografía el término de «sombra» de un agujero negro, pero en un trabajo muy abstracto y matemático. De Vries, A. (2000), «The apparent shape of a rotating charged black hole, closed photon orbits and the bifurcation set  $A_4$ », *Classical and Quantum Gravity*, vol. 17, pp. 123-144, en <<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2000CQGra..17..123D>>. <<

[116] Falcke, H., F. Melia y E. Agol (2000), «Viewing the Shadow of the Black Hole at the Galactic Center», *The Astrophysical Journal*, vol. 528, pp. L13-L16, en <<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2000ApJ...528L..13F>>. <<

[117] Falcke, H., F. Melia y E. Agol (2000), «The shadow of the black hole at the galactic center», *American Institute of Physics Conference Series*, vol. 522, pp. 317-320, en <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2000AIPC..522..317F>. <<

[118] Comunicado de prensa del Instituto Max Planck de Radioastronomía en Bonn, 17 de enero de 2000, «First image of a black hole's "shadow" may be possible soon», en [http://www3.mpifr-bonn.mpg.de/staff/junkes/pr/pr1\\_en.xhtml](http://www3.mpifr-bonn.mpg.de/staff/junkes/pr/pr1_en.xhtml). <<

### 3. Nace un telescopio mundial

[119] El Instituto Max Planck en Bonn y el Observatorio Steward habían construido el telescopio Heinrich Hertz, un plato de diez metros, en el monte Graham en Arizona. Cuando los alemanes se retiraron algunos años después, se le cambió el nombre por telescopio submilimétrico, y la Universidad de Arizona trató de mantenerlo con vida con muchas iniciativas propias. En Hawái, en el volcán Mauna Kea se hallaba el telescopio James Clerk Maxwell, con un plato de antena de quince metros. En la actualidad, cooperan allí, entre otros, astrónomos de China, Corea, Japón y la Academia Sínica ubicada en Taipéi. Los dos telescopios europeos del IRAM en el pico Veleta, en España, y en el pico de Bure, en los Alpes franceses, estaban cimentados sólidamente y se hallaban en constante desarrollo. Otras estaciones de medición se encontraban en la fase de planificación, entre ellas el Gran Telescopio Milimétrico Alfonso Serrano en México, desde un punto de vista geográfico la mejor ubicación para nosotros. Debía convertirse en un supertelescopio de cincuenta metros, pero la puesta en marcha se demoró hasta el año 2011, y ni siquiera entonces estuvo acabado. Se planeó un telescopio especializado en cosmología incluso en el Polo Sur, que entró en funcionamiento en el año 2007. Sin embargo, pasarían todavía ocho años más hasta que mi colega Dan Marrone, de Arizona, y sus colaboradores pudieron conectar el telescopio a una red VLBI en medio de la aislada región de la Antártida. <<

[120] Falcke, H., S. Markoff, F. Yuan, N. Nagar *et al.* (2002), «Active Galactic Nuclei in Nearby Galaxies», *American Astronomical Society*, resúmenes del 200.º congreso, vol. 200, n.º 51.06, en <<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2002AAS...200 5106F>>. <<



[121] Shaver, P. A. (2003), «Prospects with ALMA», *The Mass of Galaxies at Low and High Redshift*, vol. p. 357, en <<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2003mglh.conf..357S>>. <<

[122] Bower, G. C., H. Falcke, R. M. Herrnstein, J.-H. Zhao *et al.* (2004), «Detection of the Intrinsic Size of Sagittarius A\* Through Closure Amplitude Imaging», *Science*, vol. 304, pp. 704-708, en <<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2004Sci...304..704B>>. <<

[123] GCNEWS -Galactic Center Newsletter, vol. 18, eds. Markoff *et al.*, en <<http://www.aoc.nrao.edu/~gcnews/gcnews/Vol.18/editorial.shtml>>. <<

[124] Las actas están en mi archivo privado. Mi colega chileno Neil Nagar participó también ocasionalmente. <<

[125] Doeleman, S., *et al.* (2008), «Event-horizon-scale structure in the supermassive black hole candidate at the Galactic Centre», *Nature*, vol. 455, pp. 78-80, en <<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2008Natur.455...78D>>. <<

[126] *A Science Vision for European Astronomy*, ASTRONET, 2010, ISBN 978-3-923524-62-4, p. 27, en <[https://www.eso.org/public/products/books/book\\_0028/](https://www.eso.org/public/products/books/book_0028/)>. <<

[127] Doeleman, S., *et al.* (2009), «Imaging an Event Horizon: submm -VLBI of a Super Massive Black Hole», *Astro2010: The Astronomy and Astrophysics Decadal Survey*, vol. 2010, p. 68, en <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2009astro2010S..68D>. <<

[128] Moscibrodzka, M., C. F. Gammie, J. C. Dolence, H. Shiokawa *et al.* (2009), «Radiative Models of SGR A\* from GRMHD Simulations», *The Astrophysical Journal*, vol. 706, pp. 497-507, en <<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2009ApJ...706..497M>>. <<



[129] Mos'cibrodzka, M., H. Falcke, H. Shiokawa y C. F. Gammie (2014), «Observational appearance of inefficient accretion flows and jets in 3D GRMHD simulations: Application to Sagittarius A\*», *Astronomy and Astrophysics*, vol. 570, p. A7, en <<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2014A&A...570A...7M>>. <<

[130] Moscibrodzka, M., H. Falcke y H. Shiokawa (2016), «General relativistic magnetohydrodynamical simulations of the jet in M 87», *Astronomy and Astrophysics*, vol. 586, p. A38, en <<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2016A&A...586A..38M>>. También el trabajo de Dexter proporcionó una predicción excelente sobre la base de las simulaciones GRMHD: Dexter, J., J. C. McKinney y E. Agol (2012), «The size of the jet launching region in M87», *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 421, pp. 1517-1528, en <<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2012MNRAS.421 1517D>>. <<

[131] Al final, debido a las malas perspectivas de éxito, se presentaron un 50 por ciento menos de solicitudes, así que las probabilidades reales eran del 3 por ciento. <<

[132] Las imágenes y los vídeos de nuestro proyecto ERC se encuentran en: <<https://blackholecam.org>>. Goddi, C., Falcke, H., Kramer, M., Rezzolla, L. *et al.* (2017), «BlackHoleCam: Fundamental physics of the galactic center», *International Journal of Modern Physics D*, vol. 26, id. 1730001-239, en <<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2017IJMPD..2630001G>>. <<

[133] Eatough, R. P., *et al.* (2013), «A strong magnetic field around the supermassive black hole at the centre of the Galaxy», *Nature*, vol. 501, pp. 391-394, en <<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2013Natur.501..391E>>. <<

[134] Estudiantes de doctorado: Michael Janßen (Alemania), Sara Issaoun (Canadá), Freek Roelofs, Jordy Davelaar, Thomas Bronzwaer, Christiaan Brinkerink (Países Bajos), Raquel Fraga-Encinas (España), Shan Shan (China). Científicos sénior: Ciriaco Goddi (Italia), Monika Moscibrodzka (Polonia), Daan van Rossum (Países Bajos). Director del proyecto: Remo Tilanus (Países Bajos). <<

[135] Matthews, L. D., *et al.* (2018), «The ALMA Phasing System: A Beamforming Capability for Ultra-high-resolution Science at (Sub)Millimeter Wavelengths», *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, vol. 130, p. 015002, en <<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2018PASP..130a5002M>>. <<

[136] La propuesta para la melodía vino probablemente del operador jefe Bob Moulton, pero la programó Tom Folkers, quien escribió todo el sistema operativo del SMT. <<



[137] Tuits e imágenes del 11 de febrero de 2016, cuando seguimos la rueda de prensa de la plataforma colaborativa LIGO/Virgo, después de la lectura de una tesis doctoral en el aula magna de la Universidad Radboud en: <<https://twitter.com/hfalcke/status/697819758562041857?s=21>> y <<https://twitter.com/hfalcke/status/697805820143276033?s=21>>. <<

[138] Entrevista a Karsten Danzmann en la emisora de radio alemana *Deutschlandfunk* en:  
<[https://www.deutschlandfunk.de/gravitationswellennachweis-einstein-hatte-recht.676.de.xhtml?dram:article\\_id=345433](https://www.deutschlandfunk.de/gravitationswellennachweis-einstein-hatte-recht.676.de.xhtml?dram:article_id=345433)>. <<

[139] Steijaert, M. (2019), «The rising star of Sara Issaoun», *Vox, Independent Magazine of Radboud University*, 21 de junio de 2019, en <<https://www.voxweb.nl/international/the-rising-star-of-sara-issaoun>>. <<

#### 4. De expedición

[140] Para los telescopios del experimento del EHT, véase el cuadernillo de imágenes y el glosario: ALMA y APEX en el desierto de Atacama en Chile; el SMT en el monte Graham, en Arizona; el telescopio James Clerk Maxwell y el telescopio submilimétrico en el volcán Mauna Kea de Hawái; el telescopio del IRAM, de treinta metros, en el pico Veleta, en España; el Gran Telescopio Milimétrico en el volcán extinto de Sierra Negra, en México; y el telescopio del Polo Sur en la base Amundsen-Scott de la Antártida. Este último no puede observar la galaxia M87 porque esta se encuentra en la parte norte del cielo. <<

[141] En esta ocasión, Michael Janßen fue a México junto con la informática Katie Bouman, del MIT. Mi colaborador italiano, Ciriaco Goddi, viajó con Geoff Crew desde Haystack hasta Chile, al telescopio ALMA. Remo Tilanus voló a Hawái para trabajar en el telescopio JCMT con Mareki Honma y otros colegas de Asia. Sara Issaoun volvió a ocuparse del telescopio de Arizona con Freek Roelofs y Juhan Kim, quien ya había preparado el del Polo Sur durante las Navidades. <<

[142] El director del grupo de Ondas Submilimétricas del Instituto Max Planck de Radioastronomía era Peter Mezger. Su libro *Blick in das kalte Weltall* [Mirada al frío cosmos] se publicó en 1992 con la historia del telescopio, en concreto del SMT/HHT. <<

[143] Thomas Krichbaum, de Bonn, y Rebecca Azulay, una joven española, doctora por la Universidad de Valencia y desde 2017 con una beca posdoctoral en el Instituto Max Planck de Bonn, así como los dos españoles Pablo Torne y Salvador Sánchez, del IRAM. Torne es especialista en observaciones astronómicas, y Sánchez, en equipamiento técnico. Al principio nos acompañó también el director de la estación, Carsten Kramer.  
<<

[144] Se filmaron incluso dos películas: *The Edge of All We Know*, de Peter Galison (Harvard), en <<http://www.blackholefilm.com>>, y *How To See a Black Hole: The Universe's Greatest Mystery*, de Henry Fraser (Windfall Films), los dos iniciados por el grupo de Harvard. <<



[145] Valtonen, M. J., *et al.* (2008), «A massive binary black-hole system in OJ287 and a test of general relativity», *Nature*, vol. 452, pp. 851-853, en <<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2008Natur.452..851V>>. <<

[146] Andrew Nadolski era el segundo hombre en el Polo Sur. <<

[147] Karl Schuster, director del IRAM. <<

[148] David Hughes, director del LMT. <<

[149] Wade, L. (2019), «Violence and insecurity threaten Mexican telescopes», *Science Magazine*, 6 de febrero de 2019, en <<https://www.sciencemag.org/news/2019/02/violence-and-insecurity-threaten-mexican-telescopes#>>. <<

## 5. La primera imagen

[150] En el equipo de calibración estaban Lindy Blackburn y Maciek Wielgus, de la Universidad de Harvard; Chi-Kwan, de Arizona; y mis estudiantes de doctorado Sara Issaoun y Michael Janßen, así como Ilse van Bommel, de Dwingeloo. <<

[151] Thompson, A. R., J. M. Moran y G. W. Swenson (2017), *Interferometry and Synthesis in Radio Astronomy, 3rd Edition, Interferometry and Synthesis in Radio Astronomy*, Springer, en <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2017isra.book...T>. <<

[152] *Radboud Pipeline for the Calibration of high Angular Resolution Data.* Janßen, M., *et al.* (2019), «rPICARD: A CASA - based calibration pipeline for VLBI data. Calibration and imaging of 7 mm VLBA observations of the AGN jet in M 87», *Astronomy and Astrophysics*, vol. 626, p. A75, en <<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2019A&A...626A..75J>>. También participó aquí el equipo JIVE, de Mark Kettenis e Ilse van Bemmel, así como las dos italianas Kazi Rygl y Elisabetta Liuzzo, de Boloña. <<



[153] Un equipo joven liderado por Michael Johnson, Katie Bouman y Kazunori Akiyama estaba a cargo del grupo de procesamiento de las imágenes. También participó Andrew Chael, estudiante de doctorado. Por el lado europeo, Thomas Krichbaum y el español José Luis Gómez andaban muy metidos en el asunto. En total había más de cincuenta científicos involucrados, entre ellos también Sara Issaoun, e incluso la teórica Monika Moscibrodzka lo intentó con la «imagen». <<

[154] El grupo de Harvard liderado por Bouman y Johnson formó un equipo. Yo estaba en el segundo equipo junto con mis estudiantes de doctorado, Freek Roelofs, Michael Janßen y Sara Issaoun. Thomas Krichbaum y el español José Luis Gómez compusieron con sus colegas un tercer equipo, que se especializó en el algoritmo CLEAN. El cuarto equipo estaba compuesto por un grupo de jóvenes colegas asiáticos liderado por Keiichi Asada. <<

[155] FITS, de *Flexible Image Transport System*. <<

[156] Falcke, H. (2018), *How to make the invisible visible*, TEDXRW TH Aquisgrán, *YouTube*, en <<https://www.youtube.com/watch?v=ZHeBi4e9xoM>>. <<

[157] Las imágenes del taller imaginero del EHT en Harvard del año 2018 se encuentran en el siguiente enlace: <<https://eventhorizontelescope.org/galleries/eht-imaging-workshop-october-2017>>. <<

[158] Se trata de dos métodos: *regularized maximum likelihood* (estimación y SMILI), y el algoritmo CLEAN. <<

[159] Chi-kwan Chan dirigió un grupo para establecer la escala cromática. <<

[160] «NASA Visualization Shows a Black Hole's Warped World», *NASA*, 25 de septiembre de 2019, en <<https://www.nasa.gov/feature/goddard/2019/nasa-visualization-shows-a-black-hole-s-warped-world>>. <<



[161] Los grupos de teoría del EHT se formaron en torno a Charles Gammie en Illinois, Ramesh Narayan en Harvard, Luciano Rezzolla en Frankfurt y Monika Moscibrodzka en Nimega. <<

[162] Bajo la dirección de Feryal Özel, de Arizona, Keiichi Asada, de Japón, Jason Dexter, de Garching, y Avery Broderick, del Instituto Perimeter de Física Teórica en Canadá. Christian Fromm, del equipo BlackHoleCam de Frankfurt desarrolló al mismo tiempo un «algoritmo genético» para evaluar los parámetros del agujero negro a partir de la comparación de imágenes con simulaciones. <<

[163] Las imágenes y los vídeos de la reunión colaborativa de noviembre de 2018 en Nimega, en: <<https://www.ru.nl/astrophysics/black-hole/eventhorizon-telescope-collaboration-0/eht-collaboration-meeting-2018/>>. <<

[164] El comité de publicación del EHT estaba bajo la dirección de Laurent Loinard, de México, y de mi colega neerlandés Huib-Jan van Langevelde, así como de Ramesh Narayan y John Wardle, de Estados Unidos. <<

[165] Mizuno, Y., Z. Younsi, C. M. Fromm, O. Porth *et al.* (2018), «The current ability to test theories of gravity with black hole shadows», *Nature Astronomy*, vol.2, pp.585-590, en <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2018NatAs...2..585M>. <<

[166] «UH Hilo professor names black hole capturing world's attention», comunicado de prensa de la Universidad de Hawái, 10 de abril de 2019, en <<https://www.hawaii.edu/news/2019/04/10/uh-hilo-professor-namesblack-hole/>>. <<

[167] «Acercádonos al corazón de Messier 87», en:  
<<https://www.eso.org/public/spain/videos/eso1907c/?lang>>. <<

[168] «Wahrscheinlich», vídeo musical de [NIK ], en <<https://www.youtube.com/watch?v=oaUBCDpsFCw>>, con escenas filmadas con teléfono móvil de la rueda de prensa y de la imagen del agujero negro. <<



[169] El atento bloguero de astronomía fue Daniel Fischer, en <<https://skyweek.lima-city.de>>. ¡Muchas gracias! <<

CUARTA PARTE

Más allá de los límites

1. Más allá de nuestro poder de imaginar

[170] Christensen, L. L., *et al.* (2019), «An Unprecedented Global Communications Campaign for the Event Horizon Telescope First Black Hole Image», *Communicating Astronomy with the Public Journal*, vol. 26, p. 11, en <<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2019CAPJ...26...11C>>. <<

[171] Doodle de Google, en <<https://www.google.com/doodles/firstimage-of-a-black-hole>>. <<

[172] Elfrink, T. (2019), «Trolls hijacked a scientist's image to attack Katie Bouman. They picked the wrong astrophysicist», *Washington Post*, 12 de abril de 2019, en <<https://www.washingtonpost.com/nation/2019/04/12/trolls-hijacked-scientists-image-attack-katie-bouman-they-picked-wrong-astrophysicist/>>. <<

[173] Véase la nota 1 de este capítulo. <<

[174] Rivinius, T., D. Baade, P. Hadrava, M. Heida, *et al.* (2020), «A nakedeye triple system with a nonaccreting black hole in the inner binary», *Astronomy and Astrophysics*, vol. 637, p. L3, en <<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2020A&A...637L...3R>>. <<

[175] El diámetro del agujero negro es aproximadamente de veinticuatro kilómetros. <<

[176] La historia de la imagen del agujero negro desde el punto de vista del arte es el tema de una tesis doctoral de Emilie Skulberg en Cambridge. <<



[177] Backes, M., *et al.* (2016), «The Africa Millimetre Telescope», *Proceedings of the 4th Annual Conference on High Energy Astrophysics in Southern Africa* (HEASA 2016), p. 29, en [https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2016 heas.confE..29B](https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2016heas.confE..29B). <<

[178] Roelofs, F., Falcke, H., Brinkerink, *et al.* (2019), «Simulations of imaging the event horizon of Sagittarius A\* from space», *Astronomy and Astrophysics*, vol. 625, p. A124, en <<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2019A&A...625A.124R>>. Y Palumbo, D. C. M., S. S. Doeleman, M. D. Johnson, K. L. Bouman, *et al.* (2019), «Metrics and Motivations for EarthSpace VLBI: Time-resolving Sgr A\* with the Event Horizon Telescope», *The Astrophysical Journal*, vol. 881, p. 62, en <<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2019ApJ...881...62P>>. <<

## 2. ¿Más allá de Einstein?

[179] Event Horizon Telescope Collaboration, K. Akiyama, *et al.* (2019), «First M87 Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the Supermassive Black Hole», *The Astrophysical Journal*, vol. 875, p. L1, en <[https:// ui.adsabs.harvard.edu/abs/2019ApJ...875L...1E](https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2019ApJ...875L...1E)>. <<

[180] La predicción de que la antimateria cae exactamente igual que la materia está siendo probada experimentalmente en el CERN: <<https://newatlas.com/cern-antimatter-gravity-experiments/57090/>>. <<

[181] Overbye, D. (2019), «How to Peer Through a Wormhole», *New York Times*, 13 de noviembre de 2019, en <<https://www.nytimes.com/2019/11/13/science/wormholes-physics-astronomy-cosmos.xhtml>>. <<

[182] Para las teorías de la fuerza gravitatoria basadas en la información de Eric Verlinde, véase, por ejemplo: Van Calmthout, M. (2019), «Tug of war around gravity», *Phys.org*, en <<https://phys.org/news/2019-08-war-gravity.xhtml>>; Wolfram, S. (2020), «Finally We May Have a Path to the Fundamental Theory of Physics and It's Beautiful», *Stephen Wolfram Writings*, en <<https://writings.stephenwolfram.com/2020/04/finally-we-may-have-a-path-to-the-fundamental-theory-of-physics-and-its-beautiful/>>; Campbell, T., H. Owhadi, J. Sauvageau y D. Watkinson (2017), «On Testing the Simulation Theory», *International Journal of Quantum Foundations*, vol. 3, n.º 3, pp. 78-99, en <<https://www.ijqf.org/archives/4105>>; o Keulemans, M. (2017), «Leven we eigenlijk in een hologram? Het zou zomaar kunnen», *deVolkskrant*, 10 de marzo de 2017, en <<https://www.volkskrant.nl/wetenschap/leven-we-eigenlijk-in-een-hologram-het-zou-zomaar-kunnen~bb4b0da3/>>. <<

[183] De hecho, removiendo infinitamente en una gran sopa de letras puede que surja un libro, pero no sería uno excelente y desaparecería de inmediato, habría que detenerse en el momento justo. Resulta más efectivo escribir un libro que esperar a que surja uno de repente. <<

[184] Siegel, E. (2017), «Ask Ethan: What was the Entropy of the Universe at the Big Bang?», *Forbes*, 15 de abril de 2017, en <<https://www.forbes.com/sites/startswithabang/2017/04/15/ask-ethan-what-was-the-entropyof-the-universe-at-the-big-bang/>>. <<



[185] En física cuántica, la conservación de la información de un sistema cuántico, es decir, el desarrollo de su función de onda, se denomina con el término *unitaridad*, y el proceso de medición de una partícula cuántica se suele designar como *colapso de la función de onda*. El «estado» de una partícula cuántica, o bien de su función de onda, determina entonces la probabilidad con la que se mide una determinada propiedad. Antes de cualquier medición, solo puede predecirse con exactitud el valor más probable, es decir, el valor medio de muchas mediciones. Sin embargo, cuando se ha medido una vez una propiedad, permanece constante hasta que se mide otra. De ahí que cada medición cambie las propiedades de las partículas. <<

[186] «Schwarze Löcher erinnern sich an ihre Opfer», *Spiegel Online*, 9 de marzo de 2004, en <<https://www.spiegel.de/wissenschaft/weltall/hawkingverliert-wette-schwarze-loecher-erinnern-sich-an-ihre-opfer-a-289599.xhtml>>. <<

[187] Incluso en los sistemas cuánticos aislados sin gravedad podría ocurrir que la información se termalizara y se perdiera, si es que son ciertos los cálculos descritos en el siguiente artículo: Kiefer-Emmanouilidis, M., R. Unanyan, M. Fleischhauer, J. Sirker (2020), «Evidence for Unbounded Growth of the Number Entropy in Many-Body Localized Phases», *Phys. Rev. Lett.*, vol. 124, en <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.124.243601>>. El enlace al resumen, aquí: <https://physics.aps.org/articles/v13/s80>>. <<

### 3. Omnipotencia y límites

[188] La Biblia, Jeremías 33:22. <<

[189] Horgan, K. (2000), *An den Grenzen des Wissens. Siegeszug und Dilemma der Naturwissenschaften*, trad. del inglés de Thorsten Schmidt, S. Fischer. <<

[190] Siegel, E. (2020), «No Galaxy will ever truly disappear, even in a Universe with dark energy», *Forbes*, 4 de marzo de 2020, en <<https://www.forbes.com/sites/startswithabang/2020/03/04/no-galaxy-will-ever-trulydisappear-even-in-a-universe-with-dark-energy/>>. <<

[191] Harris, S. (2012), *Free Will, Free Press*, versión Kindle, p. 5: «El libre albedrío es una ilusión. Nuestra voluntad no es obra nuestra, así de simple. Las ideas y las intenciones surgen de cuestiones de fondo de las que no somos conscientes y sobre las cuales no ejercemos ningún control consciente. No poseemos la libertad que creemos poseer. El libre albedrío es, en realidad, algo más que una ilusión (o algo menos), en el sentido de que no puede hacerse conceptualmente coherente. O bien nuestras voluntades están determinadas por causas previas y no somos responsables de ellas, o bien son producto del azar y no somos responsables de ellas». <<

[192] Entretanto, los científicos debaten en este contexto también el concepto de «emergencia». <<



[193] Un ejemplo para el lector versado en matemáticas: la frecuencia de una onda de luz la determino en los espacios planos empleando una transformada de Fourier. Sin embargo, esta proporciona solo un valor infinitamente exacto cuando integro la onda de  $-\infty$  a  $+\infty$ . Entonces, por ejemplo, la transformada de Fourier de una función sinusoidal es justo la función delta. Si dispongo de menos tiempo que el infinito, entonces siempre es imprecisa la frecuencia misma de una función sinusoidal perfecta. Por ese mismo motivo, solo puedo medir con una precisión infinita el momento o el lugar de un suceso si tengo a mi disposición un número infinito de frecuencias o de longitudes de onda. Ahora bien, dado que cada suceso y cada partícula están siempre limitados espacial y temporalmente, siempre serán, de hecho, imprecisos. <<

[194] Wolchover, N. (2020), «Does time really flow? New clues come from a century-old approach to math», *Quanta magazine*, 7 de abril de 2020, en <<https://www.quantamagazine.org/does-time-really-flow-new-cluescome-from-a-century-old-approach-to-math-20200407/>>. <<

[195] Krauss, Lawrence (2012), *A Universe from Nothing: Why There Is Something Rather than Nothing*, Atria Books, versión Kindle (Pos. 104/3284).  
<<

[196] Por este motivo, en los comienzos del universo, la entropía era más baja que ahora, cuando la energía y la masa están distribuidas extensamente en el espacio. Toda estrella, planeta o ser humano individuales parece estar ciertamente «más ordenado» que la Gran Explosión, pero visto en el universo entero, esto apenas desempeña algún papel. Es como la caja de bloques de construcción en la habitación de los críos: durante la Gran Explosión estaba todo metido en una caja pequeña; ahora está todo diseminado en una gigantesca habitación infantil. Aunque se construyan aquí o allá bonitas casitas con unos pocos bloques, en conjunto imperará un desorden monumental. <<

[197] Exceptuando, probablemente, la «energía oscura», que podría ser una energía del espacio vacío. <<

[198] Rees, M. (2001). *Just Six Numbers: The Deep Forces That Shape The Universe*, Basic Books. <<

[199] Landsman, K. (2015), «The Fine-Tuning Argument», *arXiv e-prints*, vol. p. arXiv: 150505359, en <<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2015arXiv150505359L>>. <<

[200] Me habría gustado debatirlo con él, pero de todos modos podemos seguir leyendo sus pensamientos: Hawking, S. (2018), *Kurze Antworten auf große Fragen*, Klett-Cotta, ISBN 978-3-608-96376-2. [Hay trad. cast.: *Breves respuestas a las grandes preguntas*, Barcelona, Crítica, 2018, trad. de David Jou i Mirabent.] <<



[201] La Biblia, Evangelio de Juan 1:1, «En el principio era el Verbo». <<

[202] La Biblia, Génesis 11:1-9. La construcción de la torre de Babel. En esta conocida historia, Dios tiene que bajar primero para poder observar la torre (v. 5). <<

[203] La Biblia, 1. Corintios 13:13. El himno al amor, de Pablo. <<