


DRAKONTOS

FRANK WILCZEK

Ganador del Premio Nobel de Física



LAS DIEZ CLAVES DE LA REALIDAD

«Una espléndida y tentadora síntesis de los hechos
fundamentales de la realidad física.»

STEVEN PINKER

CRÍTICA

LAS DIEZ CLAVES DE LA REALIDAD

Frank Wilczek

Traducción castellana de
Joan Lluís Riera

CRÍTICA
BARCELONA

Primera edición: enero de 2022

Las diez claves de la realidad
Frank Wilczek

No se permite la reproducción total o parcial de este libro, ni su incorporación a un sistema informático, ni su transmisión en cualquier forma o por cualquier medio, sea este electrónico, mecánico, por fotocopia, por grabación u otros métodos, sin el permiso previo y por escrito del editor. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual (Art. 270 y siguientes del Código Penal).

Diríjase a CEDRO (Centro Español de Derechos Reprográficos) si necesita reproducir algún fragmento de esta obra. Puede contactar con CEDRO a través de la web www.conlicencia.com o por teléfono en el 91 702 19 70 / 93 272 04 47.

Título original: *Fundamentals. Ten Keys to Reality*

© Frank Wilczek, 2021

© de la traducción, Joan Lluís Riera, 2022

© Editorial Planeta, S. A., 2022
Av. Diagonal, 662-664, 08034 Barcelona (España)
Crítica es un sello editorial de Editorial Planeta, S. A.

editorial@ed-critica.es
www.ed-critica.es

ISBN: 978-84-9199-366-7
Depósito legal: B. 17.124-2021
2022. Impreso y encuadernado en España por
Huertas Industrias Gráficas, S. A.



Hay mucho espacio

MUCHO FUERA Y MUCHO DENTRO

Cuando decimos que algo es grande, sea el universo visible o el cerebro humano, debemos preguntarnos: ¿en comparación con qué? El punto de referencia natural es el ámbito de la vida humana cotidiana. Este es el contexto de nuestros primeros modelos del mundo, los que construimos de niños. El ámbito del mundo físico, tal como nos lo revela la ciencia, es algo que descubrimos cuando nos permitimos renacer.

Con referencia a la vida cotidiana, el mundo de «ahí fuera» es genuinamente gigantesco. Esa *abundancia exterior* es lo que percibimos de manera intuitiva cuando en una noche clara miramos un cielo estrellado. Sentimos entonces, sin necesidad de análisis meticulosos, que en el universo hay distancias muchísimo mayores que nuestro propio cuerpo, mayores que cualquier distancia que podamos llegar a recorrer. El conocimiento científico no solo respalda esa sensación de vastedad, sino que la magnifica.

La escala del mundo puede hacer que nos sintamos

sobrecogidos. Así se sintió el matemático, físico y filósofo religioso francés Blaise Pascal (1623-1662), y esa sensación lo consumía. Escribió: «El universo me comprende y devora como un punto».

Sentimientos como el de Pascal, que viene a decir «soy *muy* pequeño, no importo nada en el universo», son un tema habitual en la literatura, la filosofía y la teología. Aparecen en muchas plegarias y salmos, y es una reacción natural a la condición humana de insignificancia cósmica, medida por el tamaño.

La buena noticia es que el tamaño no lo es todo. Nuestra *abundancia interior* es más sutil, pero por lo menos igual de profunda. Así lo comprendemos cuando tomamos en consideración las cosas desde el otro extremo, del fondo hacia arriba. Hay mucho espacio en el fondo. En todos los aspectos que realmente importan, somos muy grandes.

En la escuela primaria aprendemos que las unidades estructurales básicas de la materia son los átomos y las moléculas. Medido con referencia a estas unidades, nuestro cuerpo es descomunal. El número de átomos en un solo cuerpo humano es aproximadamente 10^{28} , que es un 1 seguido de 28 ceros:

10.000.000.000.000.000.000.000.000.000.

Esta cifra sobrepasa con mucho cualquier cosa que hayamos visto. Podemos darle un nombre (diez mil cuatrillones) y, con algo de instrucción y práctica, usarlo para realizar cálculos. Pero abruma a nuestra intuición, que construimos a partir de experiencias cotidianas en las que nunca tenemos la ocasión de contar tanto. Visualizar tantos puntos individuales supera con mucho la capacidad de nuestro cerebro.

El número de estrellas que podemos ver a simple vista en una noche sin luna y con el cielo claro es, en el mejor de los casos, de unos pocos millares. Diez mil cuatrillones —el número de átomos de nuestro cuerpo— es alrededor de un millón de veces el número de estrellas del universo visible. En este sentido tan concreto, albergamos en nuestro interior todo un universo.

Walt Whitman (1819-1892), el apasionado poeta estadounidense, sentía de manera instintiva la grandeza de nuestro interior. En su «Canto de mí mismo» escribió: «Soy inmenso, contengo multitudes». La gozosa celebración de la abundancia de Whitman está tan fundamentada en hechos objetivos como en la envidia cósmica de Pascal, y es mucho más relevante para nuestra verdadera experiencia.

El mundo es grande, pero nosotros no somos pequeños. Es más acertado decir que hay una gran abundancia de espacio tanto si miramos hacia fuera como si miramos hacia dentro. No debemos envidiar al universo solo porque sea grande. También lo somos nosotros. Lo bastante grandes, de hecho, para contener el universo exterior en nuestra mente. El propio Pascal se reconfortó con esta idea, pues a su lamento de que «el universo me comprende y devora como un punto» le sigue la consolación: «Pero, por el pensamiento, yo lo comprendo».

La abundancia de espacio, tanto exterior como interior, es el tema principal de este capítulo. Primero examinaremos con detenimiento los datos concretos, luego nos aventuraremos un poco más allá.

ABUNDANCIA EXTERIOR. QUÉ SABEMOS Y CÓMO
LO SABEMOS

Preludio. Geometría y realidad

La discusión científica sobre las distancias cósmicas se erige sobre los cimientos de nuestro conocimiento del espacio físico y de cómo se pueden medir las distancias: la ciencia de la geometría. Comencemos, pues, por la relación entre geometría y realidad.

La experiencia directa, cotidiana, nos enseña que los objetos pueden moverse de un lugar a otro sin alterar sus propiedades. Esto nos lleva a la idea del «espacio» como una suerte de receptáculo en el que la naturaleza deposita objetos.

Las aplicaciones prácticas para la prospección, la arquitectura y la navegación nos llevaron a medir distancias y ángulos entre objetos cercanos. Gracias a esos trabajos, descubrimos las regularidades que exhibe la geometría euclidiana.

A medida que estas aplicaciones prácticas se tornaron más amplias y exigentes, ese marco mantuvo una impresionante integridad. Fue tan grande el éxito de la geometría euclidiana, y tan majestuosa su estructura lógica, que raramente se contrastó experimentalmente su validez como descripción de la realidad física. A principios del siglo XIX, a Carl Friedrich Gauss (1777-1855), uno de los más grandes matemáticos de todos los tiempos, se le ocurrió que merecía la pena hacerlo. Con este fin, midió los ángulos de un triángulo formado por tres lejanas posiciones de montaña en Alemania y encontró que sumaban 180° , tal como predice Euclides, dentro del margen de incertidumbre de las mediciones. El ac-

tual Sistema de Posicionamiento Global (GPS) se basa en la geometría euclidiana, y realiza cada día millones de experimentos como el de Gauss, solo que a escalas mucho mayores y con mucha más precisión. Dediquemos un momento a ver cómo funciona.

Para obtener nuestra posición mediante GPS, nos conectamos con las emisiones de un conjunto de satélites artificiales situados a gran altura sobre la Tierra, cuyas posiciones conocemos. (Luego veremos cómo conseguimos *eso*.) En la actualidad hay más de treinta de estos satélites situados de manera estratégica alrededor del planeta. Sus emisiones de radio no se traducen en voz o música, sino que envían el simple aviso de dónde se encuentran en un formato digital pensado para sistemas informáticos. Los mensajes incluyen información sobre el tiempo preciso en que fueron enviados. Cada satélite lleva a bordo un soberbio reloj atómico que garantiza que las indicaciones del tiempo son exactas. Entonces:

1. El receptor de la unidad de GPS capta algunas de las señales de los satélites. La unidad, que también tiene acceso a señales de una extensa red de relojes sobre la superficie de la Tierra, calcula cuánto tiempo tardaron en llegar las distintas señales de los satélites. Como las señales viajan a una velocidad conocida (la velocidad de la luz), los tiempos de tránsito se pueden usar para determinar las distancias a los satélites.
2. Con estas distancias, las posiciones de los satélites y la geometría euclidiana, el procesador de la unidad determina una posición única para la fuente (nosotros mismos) mediante triangulación.

3. El procesador informa del resultado, y nosotros averiguamos dónde estamos.

La implementación completa del GPS incluye muchas otras sofisticaciones, pero esta es la idea básica. El sistema guarda un inquietante parecido con el «diseño mental» de marcos de referencia que propuso Albert Einstein en su artículo original sobre la relatividad especial. En 1905, Einstein se anticipó al uso de haces de luz y tiempos de tránsito para determinar posiciones en el espacio, una idea que le gustaba porque recurría a una técnica arraigada en la física básica (la velocidad fija de la luz) para mapear el espacio. La tecnología encuentra la manera de responder a los experimentos mentales.

A modo de ejercicio de imaginación visual, uno puede intentar convencerse a sí mismo de que la distancia a cuatro satélites (cada uno en una posición conocida) proporciona información suficiente para determinar una posición.

(Una pista: los puntos situados a una distancia determinada de un satélite se encuentran sobre una esfera centrada en ese satélite. Dos esferas centradas en dos satélites distintos se intersecarán —si es que se tocan— en un círculo. Como nuestra posición se encuentra en algún lugar de esa intersección, ¡las dos esferas intersecarán! Consideremos ahora una tercera esfera, correspondiente a un tercer satélite, que haga intersección con ese círculo. Por lo común, la intersección se producirá en dos puntos. Por último, la esfera de un cuarto satélite decidirá entre esos dos puntos.)

Volvamos ahora a la cuestión de cómo saben los satélites GPS donde están *ellos mismos*. Los detalles técnicos son complicados, pero se basan en una idea

muy simple: comienzan en posiciones conocidas y hacen un seguimiento de su propio movimiento. Juntando esas dos fuentes de información, pueden calcular su posición.

Más detalladamente: los satélites siguen su movimiento con la ayuda de giroscopios y acelerómetros que llevan a bordo, como los de cualquier iPhone. A partir de la respuesta de estos instrumentos, el ordenador del satélite lee su aceleración con la ayuda de la física de la mecánica newtoniana, y con estos datos, y usando técnicas de análisis matemático, calcula cuánto se ha desplazado el satélite. De hecho, Newton inventó el cálculo diferencial precisamente para resolver problemas de este tipo.

Si repasamos todos los pasos, veremos que los ingenieros que diseñaron el Sistema de Posicionamiento Global confiaron en un buen número de suposiciones que no son evidentes. El sistema depende de la idea de que la velocidad de la luz es constante. Para medir el tiempo, utiliza relojes atómicos, cuyo diseño e interpretación reposa sobre principios avanzados de teoría cuántica. Usa las herramientas de la mecánica clásica para calcular la posición de los satélites desplegados. También realiza correcciones del efecto provocado por el hecho de que la velocidad de los relojes dependa ligeramente de su altitud sobre la Tierra, tal y como predice la relatividad general. Los relojes van más despacio cerca de la superficie de la Tierra, donde el campo gravitatorio es más fuerte.

Como el Sistema de Posicionamiento Global depende de muchas otras suposiciones además de la validez de la geometría euclidiana, no podemos afirmar que nos ofrezca un test limpio y puro de esa geometría. De

hecho, el éxito del GPS no es un test limpio y puro de ningún principio, sino un sistema complicado con un diseño que reposa sobre una maraña de suposiciones.

Cualquiera de esas suposiciones podría ser errónea o, dicho con más diplomacia, solo verdadera de manera aproximada. Si alguna de las suposiciones que los ingenieros dan por «aproximadamente ciertas» fuese claramente errónea, el GPS nos daría resultados incoherentes. Por ejemplo, podríamos obtener posiciones distintas a partir de la triangulación de distintos conjuntos de satélites. Así que un uso persistente puede desvelar debilidades ocultas.

Y al contrario, en la medida que el GPS funciona, su éxito refuerza nuestra confianza en *todas* sus suposiciones subyacentes, entre ellas la de que la geometría euclidiana describe, de manera precisa, la realidad de la geometría espacial a las escalas de la Tierra. Y, hasta el momento, el GPS han funcionado sin la menor tacha.

De manera más general, la ciencia construye. Los experimentos y tecnologías más avanzados y aventurados dependen de marañas de teorías subyacentes. Cuando esas aplicaciones aventuradas se sostienen, reafirman nuestra confianza en las marañas de teorías que las inspiran. El hecho de que el conocimiento fundamental forme una maraña, una compleja red de ideas que se refuerzan unas a otras, será uno de los temas recurrentes de lo que sigue.

Antes de dar por finalizado este preludio, debo añadir un matiz: cuando consideramos el espacio a escalas cósmicas, descomunales, tal como haremos en un momento, la geometría euclidiana deja de ajustarse a la realidad. Así lo puso de manifiesto Albert Einstein con

sus teorías de la relatividad especial y general (de 1905 y 1915, respectivamente), en las que expuso sus insuficiencias y también sugirió cómo superarlas. Desde entonces, sus ideas teóricas se han visto confirmadas por numerosos experimentos.

En la relatividad especial, Einstein nos enseñó que, cuando pretendemos medir una «distancia», debemos considerar con mucho detenimiento qué estamos midiendo y cómo. Las mediciones reales llevan tiempo, y las cosas se mueven en el tiempo, de modo que lo que de verdad medimos son separaciones entre *eventos*. Los eventos están localizados tanto en el espacio como en el tiempo, y su geometría debe construirse dentro de ese marco más general: el espaciotiempo, no solo el espacio. En la relatividad general, aprendemos además que la geometría del espaciotiempo puede curvarse por influencia de la materia, o de ondas de distorsión que viajan a través de esta. (Nos ocuparemos de todo esto en los capítulos 4 y 8.)

Dentro de los marcos más generales del espaciotiempo y la relatividad, la geometría euclidiana sirve como aproximación a teorías más precisas. Es lo bastante exacta como para usarla en muchas de las aplicaciones prácticas que hemos mencionado antes. Topógrafos, arquitectos y diseñadores de misiones espaciales usan la geometría euclidiana porque facilita su trabajo y con ella tienen más que suficiente. Las teorías más generales, aunque más precisas, son mucho más difíciles de usar.

El hecho de que la geometría euclidiana no consiga proporcionarnos un modelo completo de la realidad no resta valor a su coherencia matemática ni invalida sus muchos éxitos. Pero sí confirma la sabiduría de la ve-

rificación de hechos de Gauss, el enfoque del conservadurismo radical. La relación entre geometría y realidad es una cuestión que la naturaleza tiene que dirimir.

La prospección del universo

Habiendo tomado ya la medida del espacio cercano, podemos proceder a sondear el cosmos. Las principales herramientas para esta empresa son varios tipos de telescopios. Además de los telescopios más familiares, que utilizan la luz visible, los astrónomos utilizan otros que recogen «luz» de muchas otras regiones del espectro electromagnético, por ejemplo de ondas de radio, microondas, infrarrojo, ultravioleta, rayos X y rayos gamma. Hay, además, ojos más extraños en el cielo que no se basan en la radiación electromagnética, y entre ellos destaca uno que se ha añadido hace muy poco: los detectores de ondas gravitatorias. Hablaremos más sobre ellos en capítulos posteriores.

Comenzaremos por resaltar las conclusiones, de una sorprendente simplicidad, que se desprenden de estos sondeos, y luego revisaremos cómo las alcanzaron los astrónomos. Esto último es más complicado, pero, dado el contexto, sorprendentemente sencillo.

La conclusión más fundamental es que encontramos el mismo tipo de material por todos lados. Además, observamos que en todos los lugares se aplican las mismas leyes.

En segundo lugar, encontramos que la materia está organizada en una jerarquía de estructuras. Miremos donde miremos, reconocemos estrellas. Estas tienden a agruparse en galaxias, que a menudo contienen desde unos

pocos millones a miles de millones de estrellas. Nuestra propia estrella, el Sol, lleva un séquito de planetas y satélites (además de cometas, asteroides, los hermosos «anillos» de Saturno y otros restos de materia). Júpiter, el mayor de los planetas, tiene alrededor de una milésima parte de la masa del Sol, mientras que la de la Tierra es de tres millonésimas de la masa de nuestra estrella. Pese a su módica masa, los planetas y sus satélites deben ocupar un lugar especial en nuestro corazón. Habitamos uno de ellos, por supuesto, pero hay otras razones que nos llevan a sospechar que también otros podrían sustentar otras formas de vida, quizá no en nuestro sistema solar, pero sí en algún otro. Los astrónomos intuían desde hacía tiempo que otras estrellas podían tener planetas, pero solo en tiempos recientes hemos alcanzado la capacidad técnica que nos permite detectarlos. En la actualidad se han descubierto ya cientos de planetas extrasolares, y no paran de llegar nuevos descubrimientos.

En tercer lugar, encontramos que todo este material salpica el espacio de manera casi uniforme. En todas las direcciones y a todas las distancias medimos más o menos la misma densidad de galaxias.

Más tarde refinaremos y complementaremos estas tres conclusiones fundamentales, sobre todo para dar cabida al Big Bang, la «materia oscura» y la «energía oscura». Pero su mensaje central persiste: se encuentran los mismos tipos de sustancia, organizados de las mismas formas, distribuidos de manera uniforme por el universo visible y en enorme abundancia.

A estas alturas, uno se estará preguntando cómo llegan los astrónomos a conclusiones tan trascendentales. Veámoslo con algo más de detenimiento, mientras ponemos valores concretos a los tamaños y las distancias.

No es nada evidente de qué modo podríamos medir las distancias a objetos muy lejanos. Como es natural, no podemos usar reglas ni extender cintas métricas por el cielo, ni tampoco analizar transmisiones de radio que lleven información sobre el momento en que fueron registradas. En su lugar, los astrónomos han tenido que arreglárselas con una técnica llamada *escalera de distancias cósmicas*. Cada peldaño de esta escalera nos lleva a una distancia mayor, y usamos nuestro conocimiento de un escalón para prepararnos para el siguiente.

Podemos empezar por medir las distancias que nos separan de nuestros vecinos. Con la ayuda de técnicas parecidas al GPS —es decir, haciendo rebotar luz (o señales de radio) y midiendo los tiempos de tránsito— podemos determinar distancias en la Tierra, y de esta a otros objetos de nuestro sistema solar. Hay varias otras maneras de conseguir lo mismo, entre ellas algunos métodos ingeniosos, aunque no muy precisos, inventados por los antiguos griegos. Para lo que ahora nos ocupa, basta con reseñar que todos esos métodos arrojan resultados coherentes.

La Tierra es una esfera casi perfecta con un radio de unos 6.400 kilómetros. En nuestra era de los viajes en avión, esta es una distancia fácil de comprender. Es, más o menos, la distancia por tierra entre Nueva York y Estocolmo, o un poco más que la mitad de la distancia entre Nueva York y Shanghái.

Hay otra manera de expresar la distancia que se adapta perfectamente de la astronomía y la cosmología, y se usa con mucha frecuencia en estas disciplinas. Se trata de especificar una distancia estableciendo el tiempo que tardaría un rayo de luz en recorrerla. Para

el radio de la Tierra, eso es alrededor de una cincuentava parte de un segundo. Podemos decir, pues, que el radio de la Tierra es igual a una cincuentava de segundo luz.

En escalones más altos de la escalera de distancias cósmicas resulta más práctico medir las distancias en años luz en lugar de segundos luz. Para empezar, y para que nos sirva de referencia, el radio de la Tierra es de aproximadamente una mil millonésima de año luz. Conviene conservar este valor en la memoria mientras ampliamos nuestra prospección del mundo. Pronto abarcaremos años luz enteros, y luego cientos, millones y, para acabar, miles de millones de años luz.

Nuestro siguiente hito en la secuencia de distancias es la que se extiende entre la Tierra y el Sol, que es de unos 150 millones de kilómetros, lo que también podemos expresar como 8 minutos luz o como 15 millonésimas de año luz.

Merece la pena observar que la distancia entre la Tierra y el Sol es unas 24.000 veces el radio de nuestro planeta. Esta cifra tan descomunal nos hace ver que, incluso dentro del sistema solar, toda la Tierra, por no hablar de un humano, queda realmente «devorado como un punto».

No conviene dejar que eso nos atormente, pues la situación se pone mucho peor. Nuestro ascenso por la escalera de distancias cósmicas no ha hecho más que empezar.

Conociendo el tamaño de la órbita de la Tierra alrededor del Sol, podemos usarla para determinar de manera directa, con la ayuda de la geometría euclidiana, la distancia a algunas estrellas relativamente cercanas, aquellas que son lo bastante próximas a nosotros como

para que su posición en el cielo cambie de forma perceptible en el curso de un año a causa del movimiento de nuestro planeta alrededor del Sol. Este efecto se conoce como paralaje. Nuestra visión binocular usa el paralaje para estimar nuestra distancia a objetos mucho más cercanos, que se presentan con ángulos distintos a cada uno de los dos ojos. La misión espacial Hipparcos, que se mantuvo activa entre 1989 y 1993, utilizó el paralaje para catalogar las distancias a unas cien mil estrellas (relativamente) cercanas.

La que se encuentra más cerca, Próxima Centauri, se encuentra a poco más de cuatro años luz. Tiene dos compañeras cercanas. La estrella de Barnard, la siguiente estrella independiente más cercana a nosotros, se encuentra a unos seis años luz de distancia. La comunicación con (hipotéticos) extraterrestres que habitan cualquiera de estos dos sistemas, o con sus futuros colonos cibernéticos, nos exigirá muchísima paciencia.

En comparación con el espacio interestelar, nuestro sistema solar es un pequeño y acogedor cubil. La distancia del Sol a Próxima Centauri es aproximadamente medio millón de veces la distancia de la Tierra al Sol.

La técnica clave para extender la escalera de distancias cósmicas todavía más lejos aprovecha el hecho, que ya hemos mencionado antes, de que encontramos los mismos tipos de objetos y materiales allá donde miremos. Si podemos identificar una clase de objetos que presenten el mismo brillo intrínseco, diremos que estos objetos nos proporcionan una «candela estándar». Si conocemos la distancia a una de estas candelas estándar, podemos determinar la distancia a cualquier otra comparando el brillo que observamos. Por ejemplo, si una de estas fuentes está el doble de lejos que

otra, su brillo *aparente* será una cuarta parte del de la primera.

Ahora bien, todo esto nos lleva a preguntarnos cómo podemos convencernos a nosotros mismos de que unos objetos que vemos en lugares distintos y muy lejanos tendrían el mismo brillo si nos acercásemos a ellos. La idea básica es que busquemos clases de objetos con muchas propiedades en común, confiemos en que funcione, y verifiquemos la coherencia de los resultados. Un ejemplo simple servirá para ilustrar la idea básica y sus problemas.

Las estrellas son, por lo general, demasiado diversas para servir de candelas estándar. La estrella blanca Sirio A es unas veinticinco veces más brillante que nuestro Sol, mientras que su cercana compañera, Sirio B, una enana, tiene solo una cuadragésima parte del brillo de nuestra estrella aunque, en términos astronómicos, ambas se encuentran más o menos a la misma distancia de la Tierra. Resulta mucho más práctico restringir nuestras comparaciones a estrellas que tienen el mismo color, o, para ser más precisos, que emiten el mismo espectro electromagnético.* Cuando comparamos esas estrellas de aspecto idéntico, es razonable pensar que las diferencias de brillo se deban a diferencias en sus distancias. Así lo predice la teoría física de las estrellas, que explica muchas de sus características observables, pero ¿cómo podemos comprobarlo? Una forma de hacerlo consiste en encontrar un grupo compacto que contenga muchas estrellas cercanas entre sí. El cúmulo de las Híades, que contiene muchos cientos de

* Podemos decir lo mismo de forma más poética: son estrellas que proyectan el mismo arcoíris, hasta en el brillo total.

estrellas, es un ejemplo perfecto. Si las estrellas que tienen espectros parecidos tienen luminosidad intrínseca también parecida, entonces dos de esas estrellas situadas en el mismo cúmulo deberían mostrar el mismo brillo aparente. Y eso es básicamente lo que encontramos.

Los astrónomos profesionales tienen que tomar en cuenta otras complicaciones, como el efecto del polvo interestelar. Al absorber la luz, este polvo puede hacer que los objetos parezcan ser menos lejanos de lo que realmente son. Confío en que mis colegas me disculpen por explicar todo esto por encima, igual que muchos otros detalles técnicos que no modifican la idea central.

Podemos extender nuestra escalera de distancias cósmica y «ascender» de los objetos cercanos a los límites del universo visible con la ayuda de diversas candelas estándar. Algunas funcionan mejor para objetos relativamente cercanos, otras para los que están muy alejados. Además, tenemos que cerciorarnos de que producen resultados coherentes entre sí.

El catálogo de Hipparcos, que ya mencionamos antes, nos ofrece una base sólida para el siguiente paso en nuestro ascenso por la escalera de distancias cósmicas. Una vez que sabemos que las estrellas parecidas tienen la misma luminosidad intrínseca, podemos usarlas para medir la distancia a cúmulos más distantes, demasiado alejados para tener un paralaje observable.

De este modo podemos sondear nuestra propia galaxia, la Vía Láctea, y descubrir que sus estrellas conforman un disco bastante plano, con un abultamiento en medio. Y podemos determinar que su diámetro es de unos cien mil años luz.

Las estrellas variables Cefeidas son estrellas brillantes y pulsantes. Mediante el estudio meticuloso de estas estrellas en las Nubes de Magallanes,* Henrietta Leavitt (1868-1921) estableció que las variables Cefeidas que pulsan con el mismo período tienen también el mismo brillo y, por lo tanto, constituyen candelas estándar. Este tipo de estrella es bastante fácil de identificar porque es inusualmente brillante y manifiesta una extraordinaria variabilidad. Al usarlas como candelas estándar, los astrónomos han logrado medir nuestra distancia a muchas galaxias.

La distribución de las galaxias es irregular, de modo que no hay un valor único para la distancia que las separa. Con todo, podemos identificar una distancia típica entre una galaxia y su vecina grande más cercana. Esa distancia intergaláctica resulta ser de unos pocos cientos de miles de años luz. A diferencia de lo que sucede con los planetas y las estrellas, que casi de manera invariable se encuentran separados de sus vecinos por distancias muchas veces superiores a su propio tamaño, la separación típica entre galaxias no es muchísimo mayor que su propio tamaño.

Hay varias otras candelas estándar que resultan útiles, y muchos más detalles interesantes de su estructura, dentro del ámbito de las galaxias. Toda esta riqueza de detalles de la astronomía añade profundidad a la imagen que hemos ido esbozando hasta ahora, y refuerza los mensajes básicos. Pero dado que mi objetivo

* Las dos Nubes de Magallanes son galaxias menores vecinas de nuestra Vía Láctea. Son características destacadas del firmamento austral, donde los navegantes polinesios ya las usaban antes de Magallanes.

es transmitir los fundamentos, y no un conocimiento enciclopédico, será mejor que avancemos sin mayor demora hasta las fronteras más lejanas.

El horizonte cósmico

En sus estudios pioneros sobre las galaxias lejanas, en los que usó las variables Cefeidas como principal herramienta, Edwin Hubble (1889-1953) descubrió algo fundamentalmente nuevo y de grandes consecuencias. Observó que los patrones de la luz estelar que emiten las galaxias lejanas (es decir, su espectro de emisión) se encuentran corridos hacia longitudes de onda más larga en comparación con los patrones de luz de las galaxias más cercanas. Es lo que se conoce como corrimiento o desplazamiento al rojo. La razón de este nombre es que si estirásemos de manera sistemática las longitudes de onda de la luz de un arcoíris, los colores de sus franjas cambiarían. Los colores del lado del azul se correrían hacia los colores del lado del rojo. Este efecto persiste más allá de lo que los humanos podemos ver: aparecería una «nueva» franja azul donde antes había una ultravioleta, y la franja roja se desvanecería en el infrarrojo.

Las observaciones del corrimiento al rojo que realizó Hubble tienen una interpretación convincente que revolucionó nuestra imagen del universo, y que depende de un efecto simple, pero sorprendente, que había descrito Christian Doppler en 1842. Este nos hizo ver que cuando una fuente de ondas se desplaza alejándose de nosotros, los picos sucesivos del tren de ondas que emite nos llegarán cada vez desde más lejos, de modo

que las ondas nos llegarán estiradas. En otras palabras, observamos ondas corridas hacia longitudes de onda más largas de las que habrían tenido si la fuente se hubiera mantenido estacionaria. La interpretación simple del corrimiento al rojo de Hubble nos indicaría, por tanto, que las galaxias se alejan de nosotros.

Hubble descubrió un patrón sorprendentemente simple en los corrimientos al rojo que observó: cuanto más lejos se encontraba una galaxia, mayor era el corrimiento. Al analizar sus datos con más detalle, se percató de que la magnitud del corrimiento era proporcional a la distancia. Eso implicaba que *las galaxias más lejanas se alejaban a velocidades proporcionales a su distancia*.

Si imaginamos que invertimos los movimientos de las galaxias para reconstruir el pasado, esa proporcionalidad adquiere un significado nuevo y dramático. Significa que, en el flujo invertido, las galaxias más lejanas se acercan a nosotros más deprisa, recorriendo la distancia del modo preciso para que *todo se junte al mismo tiempo*. Dicho de otro modo, nos lleva a sospechar que, en el pasado, toda la materia del universo se hallaba empaquetada a una densidad mucho mayor que en la actualidad. Si volvemos a la dirección natural del tiempo, todo adquiere el aspecto de una explosión cósmica.

¿Es posible que el universo proceda de una explosión? Cuando el sacerdote jesuita Georges Lemaître propuso por primera vez esta interpretación de las observaciones de Hubble, su «Big Bang» era una idea valiente y hermosa, pero sin apenas pruebas que la respaldasen ni un asiento sólido en la física.* (Lemaître

* Los estudios teóricos básicos de Lemaître precedieron a las observaciones de Hubble.

hablaba de un «átomo primigenio» o un «huevo cósmico». El nombre, menos poético, de «Big Bang» o «gran explosión» vendría más tarde.) Sin embargo, investigaciones posteriores nos han permitido entender mucho mejor el comportamiento de la materia en condiciones extremas. En la actualidad, las pruebas a favor del concepto del Big Bang son abrumadoras. En el capítulo 6 comentaremos la historia cósmica mucho más a fondo, y revisaremos toda esa evidencia.

De momento, para acabar de perfilar nuestra proyección del cosmos, utilizaremos la imagen que nos ofrece el Big Bang para definir el límite y extensión del universo visible. Si mentalmente corremos para atrás la película de la historia cósmica, encontramos que todas las galaxias se encuentran en un momento bien definido en el tiempo. ¿Cuándo? Para calcularlo, basta con dividir la distancia que debe recorrer una galaxia por la velocidad a la que se desplaza. (Como, de acuerdo con las observaciones de Hubble, la velocidad de una galaxia es proporcional a su distancia, obtendremos siempre el mismo resultado con independencia de qué galaxia escojamos.) Al hacerlo, podemos estimar que las galaxias debieron estar todas juntas hace unos 20.000 millones de años. Los cálculos más precisos, que tienen en cuenta cómo cambian las velocidades con el tiempo a causa de la gravedad, arrojan un resultado ligeramente menor. En la actualidad, la mejor estimación es que desde el Big Bang hasta ahora han pasado 13.800 millones de años.

Cuando observamos objetos en el cosmos más distante, lo que hacemos es mirar al pasado. Como la luz viaja a una velocidad finita, la luz que recibimos hoy procedente de un objeto lejano debió emitirse hace mucho

tiempo. Cuando miramos hacia atrás unos 13.800 millones de años, hasta el Big Bang, alcanzamos los límites de nuestra visión. Quedamos «cegados por la luz». La explosión cósmica inicial fue tan brillante que no podemos ver más allá de ella. (O, por lo menos, nadie sabe cómo.)

E igual que no podemos mirar más allá de cierto tiempo, tampoco podemos ver más allá de cierta distancia: la que puede viajar la luz en el limitado tiempo de que ha dispuesto hasta día de hoy. Por muy grande que «realmente» sea el universo, el que hoy nos resulta *visible* es finito.

¿Y cómo es de grande? Aquí es donde de verdad resulta brillante la idea de medir la distancia en unidades de años luz. Como el tiempo limitante es de 13.800 millones de años, la distancia limitante es... ¡13.800 millones de años luz! Para acabar de comprender lo que esa inmensidad significa, recordemos que el radio de la Tierra es de una mil millonésima de año luz.

Con este brutal contraste damos por finalizada nuestra prospección del tamaño del universo. El mundo es grande. Hay mucho espacio para que prosperen los humanos, y mucho más todavía que podemos admirar a lo lejos.

LA ABUNDANCIA INTERIOR. QUÉ SABEMOS Y CÓMO LO SABEMOS

Miremos ahora hacia nuestro interior. También ahí descubriremos una gran abundancia. Encontraremos, una vez más, que hay mucho espacio que podemos usar, y mucho más que podemos admirar.

Distintos tipos de microscopios nos permiten observar la riqueza que contienen las cosas pequeñas. La microscopia es una disciplina muy amplia, repleta de ideas ingeniosas y útiles. Aquí solo esbozaré de manera concisa cuatro técnicas básicas que desvelan distintos planos de la estructura profunda de la materia.

Los microscopios más simples y familiares sacan partido de la capacidad del cristal y otras sustancias transparentes de curvar la luz. Si fabricamos lentes de cristal y las colocamos de manera estratégica, podemos desviar los rayos de luz incidentes de tal modo que dispersen los ángulos con los que alcanzarán la retina del observador o el sensor de una cámara. Se consigue así que la imagen nos llegue con mayor tamaño. Este potente y versátil truco nos permite explorar el mundo de lo más pequeño hasta distancias de alrededor de una millonésima de metro, o algo menos. Con su ayuda podemos ver las células de las que están hechas plantas, animales y humanos. Y podemos vislumbrar las hordas de bacterias que nos ayudan o que causan enfermedades.

Si intentamos llevar más lejos esta técnica de desviar los rayos de la luz para distinguir objetos todavía más pequeños, topamos con un problema fundamental: la técnica se basa en manipular las trayectorias de los rayos de luz, pero la idea de que la luz está compuesta de rayos solo es cierta de manera aproximada, puesto que la luz viaja en forma de ondas. Usar estas para desvelar detalles más pequeños que el tamaño de las propias ondas es como intentar recoger una canica con unos guantes de boxeo. Las longitudes de onda de la luz visible son de aproximadamente una millonésima de metro, de manera que por debajo de esa distancia

los microscopios basados en la luz visible forman imágenes borrosas.

Los rayos X tienen longitudes de onda de cien a mil veces más pequeñas que la luz visible, así que, en principio, nos permiten resolver distancias mucho más pequeñas. Pero no disponemos para los rayos X de nada equivalente al cristal para luz visible, es decir, un material que podamos esculpir para construir lentes y manipular los rayos. Sin lentes, los métodos clásicos para aumentar las imágenes no tienen donde agarrarse.

Por suerte, hay una forma de abordar el problema que es radicalmente diferente, pero funciona. Con la difracción de rayos X podemos olvidarnos de las lentes. Lo que hacemos es proyectar un haz de rayos X sobre el objeto de interés, dejamos que este desvíe y disperse el haz, y luego registramos el resultado. (Para evitar confusiones, debo aclarar que estas imágenes son bastante diferentes de las más simples y conocidas que utilizan médicos y dentistas. Estas son proyecciones mucho más burdas, poco más que sombras de rayos X. En las técnicas de difracción se usan haces mucho mejor controlados y dianas mucho más pequeñas.) Las «imágenes» que produce una cámara de difracción de rayos X no tienen para nada el aspecto del objeto, pero contienen una gran cantidad de información sobre su forma, solo que de una manera codificada.

Sobre ese calificativo de «una gran cantidad» descansa una larga y fascinante saga, jalonada de premios Nobel. Por desgracia, los patrones de difracción de rayos X no proporcionan información suficiente para reconstruir el objeto con la sola ayuda de cálculos matemáticos. Son como archivos corruptos de fotografías digitales.

Para afrontar este problema, varias generaciones de científicos han construido una *escalera de interpretación* que nos permite ascender de los objetos más simples a otros más complicados. Los primeros objetos que se descifraron a partir de patrones de difracción de rayos X eran cristales simples, comenzando por la sal de mesa. En este caso, los investigadores ya se hacían una buena idea de cómo debía ser la respuesta gracias a lo que conocían de la química de la sal, a saber, una redícula regular con un número igual de dos tipos de átomos: sodio y cloro. También tenían razones para esperar, a partir de la forma observada en cristales grandes de sal, que esa redícula debía adoptar una forma cúbica. Lo que no conocían era la distancia que separaba los átomos. Por suerte, podemos calcular el aspecto que debe tener el patrón de difracción de rayos X para modelos de cristal de cualquier valor posible de esa distancia. Al encontrar uno que se corresponde con el patrón observado, se consigue validar el modelo al mismo tiempo que se determina la distancia interatómica.

Para abordar el estudio de materiales más complicados, los científicos aprovechaban lo que sabían de los más simples, recurriendo a los modelos validados previamente. Construían modelos más complicados que, en una nueva fase, sirvieran de candidatos para describir materiales con una estructura espacial más compleja. A continuación comparaban los patrones de difracción de rayos X calculados para los candidatos con los que observaban. Mediante una combinación de arduo trabajo e inspiradas conjeturas, a veces lograban el éxito. Con cada nuevo logro, pasaban a conocerse nuevas características estructurales que se podían incorporar a la siguiente generación de modelos.

Los hitos históricos de esta línea de investigaciones incluyen la determinación, de la mano de la extraordinaria química Dorothy Crowfoot Hodgkin, de las estructuras tridimensionales del colesterol (1937), la penicilina (1946), la vitamina B₁₂ (1956) y la insulina (1969), así como la determinación de la estructura tridimensional del ADN (1953) —la famosa doble hélice— por Francis Crick y James Watson, que decodificaron las imágenes de difracción de rayos X tomadas por Maurice Wilkins y Rosalind Franklin.

En la actualidad, unos ordenadores mucho más avanzados, junto con programas que incorporan las investigaciones del pasado, permiten a químicos y biólogos resolver de manera rutinaria problemas mucho más complejos de difracción de rayos X. De este modo, se ha podido determinar la estructura de decenas de miles de proteínas y de otras biomoléculas importantes. El arte de la elaboración de imágenes científicas sigue siendo una frontera esencial para la biología y la medicina.

Para mí, la escalera de interpretación es a la vez un bello ejemplo y una metáfora de cómo construimos nuestros modelos del mundo de manera general. En la visión natural, tenemos que convertir los patrones bidimensionales que nos llegan a la retina en una representación útil del mundo de los objetos en un espacio tridimensional. De manera abstracta, es un problema imposible: la información es insuficiente. Para compensarlo, añadimos suposiciones sobre cómo funciona el mundo. Sacamos partido de cambios abruptos en patrones de color, sombras y movimiento para identificar objetos, sus propiedades, su movimiento y sus distancias.